

SIMULAÇÃO DE MOINHO VERTICAL APLICADA AOS MINÉRIOS DE FERRO¹

Douglas Batista Mazzinghy²
Claudio Luiz Schneider³
Vladimir Kronemberger Alves⁴
Roberto Galéry²

Resumo

O moinho vertical tem sua aplicação consolidada na remoagem de minérios e tem despertado interesse em aplicações de moagem primária, devido a sua maior eficiência se comparado com o moinho de bolas, normalmente utilizado nesta etapa de processo. Neste estudo, quatro amostras distintas de minério de ferro foram processadas em uma campanha de testes em escala piloto com um moinho vertical. As amostras foram caracterizadas através de testes em laboratório com um moinho de bolas tubular. Os parâmetros de quebra determinados a partir dos resultados dos testes em laboratório foram utilizados para simulação dos testes em escala piloto utilizando o *software* de simulação de processos minerais *Modsim*TM. As simulações fizeram previsões satisfatórias para a distribuição granulométrica considerando a potência líquida demandada pelo moinho vertical nos testes em escala piloto. O modelo desenvolvido e implementado no *software Modsim*TM tem sido aplicado com sucesso para representar o moinho vertical operado com diferentes minérios. A metodologia utilizada permite realizar escalonamento e simulação de moinho vertical a partir de testes em laboratório com moinhos convencionais e com pequenas quantidades de amostras.

Palavras-chave: Simulação; Escalonamento; Moinho vertical; Minério de ferro.

VERTICAL MILL SIMULATION APPLIED TO IRON ORES

Abstract

The vertical mill has consolidated its application in regrind circuits and has attracted interest in primary grinding applications, due to its higher efficiency compared with ball mill, usually used in this process stage. In this study, four different samples of iron ore were processed in a test campaign on a pilot scale with a vertical mill. The samples were characterized by laboratory tests with a batch ball mill. Selection and breakage parameters were determined from the results of laboratory tests that were used for simulation the tests on a pilot scale using *Modsim*TM software. The model developed and implemented in software *Modsim*TM has been successfully applied to represent the vertical mill operated with different ores. Simulations made satisfactory predictions for the particle size distribution considering the net power demanded of the vertical mill on a pilot scale tests. The methodology allows performing scale-up and simulation of vertical mill from laboratory tests with conventional mills with small amounts of samples.

Key words: Simulation; Scale-up; Vertical mill; Iron ore.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, Pesquisador Sênior. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁴ Engenheiro de Minas, Líder de Processo, Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM), Vale, Santa Luzia, MG, Brasil.

1 REVISÃO

O moinho vertical foi desenvolvido no Japão, na década de 1950, pela *Kubota Tower Mill Corporation*, para aplicações em moagens finas e ultrafinas, e foi o primeiro moinho vertical aplicado na indústria mineral.⁽¹⁾ A Figura 1 apresenta o moinho vertical, também chamado de moinho de torre (*Tower Mill*).

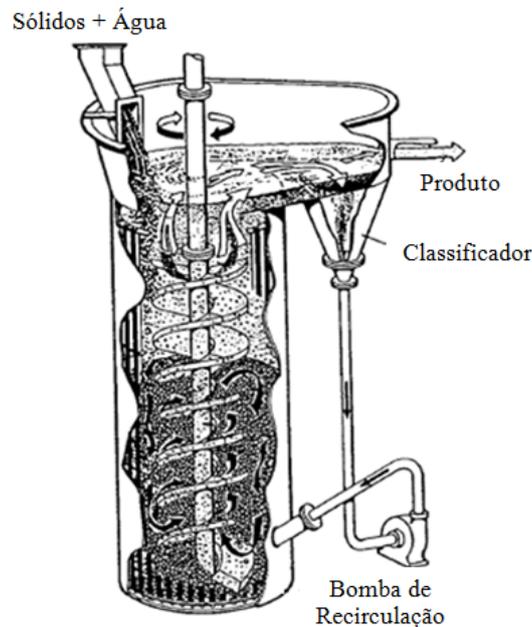


Figura 1. Moinho vertical ou moinho de torre – *Tower Mill*.⁽²⁾

O moinho vertical é composto, basicamente, de um cilindro com uma espiral interna que promove a movimentação dos corpos moedores e da polpa. Este movimento é proporcionado através de um motor instalado na parte superior do cilindro e conectado à espiral através de um redutor. Um tanque separador direciona parte do material que sai do moinho para recirculação através de uma bomba de polpa. Os projetos mais recentes de VertiMill, principalmente em moagens de material fino, não consideram a bomba de recirculação.⁽³⁾ Assim, a alimentação do moinho vertical é realizada pela parte inferior do moinho e o produto é extravasado pela parte superior, sem tanque separador e sem bomba de recirculação. A Vale S.A. tem investigado a aplicação de moinho vertical tanto para moagens de material fino como para moagens de material grosso, que normalmente são processados em moinhos de bolas.

2 TEORIA

O balanço populacional foi utilizado para modelar populações biológicas no início da década de 1960⁽⁴⁾ e posteriormente foi formulado para propósitos de engenharia química.⁽⁵⁾ Atualmente esta ferramenta é utilizada para descrever e controlar uma ampla gama de processos de partículas como pulverização, aglomeração, floculação, cristalização, polimerização e combustão.⁽⁴⁾ A Equação 1 descreve o modelo do balanço populacional para a moagem em batelada.⁽⁶⁾

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

$m_i(t)$ sendo a fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho i após o tempo t de moagem, S_i a função seleção das partículas no intervalo de tamanho i e b_{ij} a função quebra ou fração em massa de partículas no intervalo de tamanho i produzidas pela quebra de partículas no intervalo de tamanho j .

A função quebra acumulada B_{ij} pode ser modelada através da Equação 2⁽⁶⁾.

$$B_{i,j} = \phi \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1-\phi) \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, \quad 0 < \phi < 1 \quad (2)$$

B_{ij} sendo a função quebra acumulada e os parâmetros β , ϕ , γ sendo constantes dependentes das características do material.

Segundo Herbst e Fuerstenau⁽⁷⁾ a função seleção S_i apresenta uma relação de proporcionalidade com a potência absorvida pelo moinho e a massa contida neste, conforme a Equação 3.

$$S_i = S_i^E \left(\frac{P}{H} \right) \quad (3)$$

S_i (min^{-1}) sendo a função seleção no intervalo de tamanho i , S_i^E (t/kWh) a função seleção específica em energia, H (t) a massa de material contida no moinho e P (kW) a potência líquida gasta na moagem. A função seleção específica em energia S_i^E independe das dimensões do moinho⁽⁸⁾ e pode ser modelada através da Equação 4.⁽⁹⁾

$$S_i^E = S1^E \exp \left\{ \zeta_1 \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) + \zeta_2 \left[\ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

S_i^E (t/kWh) sendo a função seleção específica em energia, $S1^E$ (t/kWh) um parâmetro equivalente a função seleção específica para o tamanho 1mm, d_i (mm) o diâmetro das partículas do intervalo de tamanho i , d_1 (mm) o tamanho de normalização e ζ_1 , ζ_2 são parâmetros característicos do material e das condições de moagem. Para simulação do moinho vertical o parâmetro $S1^E$ foi multiplicado por um fator k de forma a representar a maior eficiência deste tipo de moinho, tornando-se $S1^{E*}$, conforme proposto por Mazzinghy⁽³⁾ e indicado na Equação 5.

$$S_i^E = S1^{E*} \exp \left\{ \zeta_1 \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) + \zeta_2 \left[\ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\} \quad (5)$$

A equação 5 foi utilizada para descrever a função seleção de um moinho vertical em escala piloto.⁽¹⁰⁾ Foram testadas três amostras de minério de ferro (*Pellet Feed*), nomeadas aqui de amostras A, B e C. As previsões obtidas através de simulação foram satisfatórias para as três amostras estudadas considerando um fator de escalonamento $k = 1,35$. O objetivo deste trabalho é verificar se o fator k adotado nos estudos anteriores se aplica na simulação de uma quarta amostra nomeada de amostra D. Todas as amostras serão comparadas com relação à função seleção e quebra.

3 EXPERIMENTAL

3.1 Testes em Escala Piloto

Quatro amostras distintas de minério de ferro foram testadas em um circuito de moagem em escala piloto composto por um moinho vertical (VertiMill) e uma peneira de alta frequência (Derrick). Os testes foram realizados considerando o circuito do tipo direto. Foi utilizada uma abertura de tela de acordo com a especificação de produto desejada. O moinho vertical foi operado com velocidade constante da espiral de 87rpm.

A amostra D teve a sua distribuição granulométrica reduzida, através de britagem, para 100% < 6,3mm. Segundo o fabricante do moinho vertical, este seria o limite de tamanho de partículas para uma operação eficiente. A Tabela 1 apresenta a distribuição de tamanhos das bolas utilizadas no teste piloto.

Tabela 1. Distribuição de tamanhos das bolas utilizadas no teste piloto

Amostra	A	B,C	D
Bola (mm)	% Ret.	% Ret.	% Ret.
35	-	-	38.4
30	-	-	27.5
25	30.7	-	14.5
19	34.6	40.7	17.7
15	29.7	-	-
12	5	42.5	1.9
9	-	16.8	-
Total	100	100	100

Através da distribuição granulométrica, da concentração de sólidos e das vazões de sólidos de cada um dos fluxos do circuito fez-se o balanço de massas dos testes.

3.2 Testes em Escala de Laboratório

Foram realizados testes com um moinho de bolas de laboratório com as amostras da alimentação nova do circuito de moagem dos testes em escala piloto. As amostras foram britadas em 100% < 3,6mm com o objetivo de manter uma proporção adequada entre o tamanho das bolas e o diâmetro do moinho utilizado nos testes.

As amostras foram submetidas a moagem por quatro diferentes intervalos de tempo. Após cada tempo de moagem, todo o material foi retirado do moinho para obtenção da distribuição granulométrica. A Tabela 2 apresenta as condições operacionais dos testes com moinho de bolas de bancada.

Tabela 2. Condições operacionais do teste com moinho de bolas de bancada

Parâmetros	Unid.	Valores
Diâmetro Interno	m	0,254
Comprimento Interno	m	0,254
J – Enchimento de Bolas	%	40,0
U – Enchimento de Material	%	100,0
Porosidade	%	40,0
Velocidade Crítica	%	70,0
Levantadores de Carga	Quant.	8

Os testes em escala de laboratório foram realizados com a mesma concentração de sólidos e a mesma distribuição de tamanho de bolas dos testes em escala piloto.

4 SIMULAÇÃO

4.1 Parâmetros de Quebra para Calibração do Modelo de Moagem

Os parâmetros de quebra foram determinados utilizando os resultados dos testes com moinho de bolas de bancada através do programa *BatchMill*TM versão 1.6.⁽¹¹⁾ A Tabela 3 apresenta os parâmetros de quebra para as amostras estudadas.

Tabela 3. Parâmetros de função seleção e função quebra

Amostra	Função Seleção			Função Quebra			Erro
	$S1^{E*}$ (t/kWh)	ζ_1	ζ_2	γ	β	ϕ	
A	5,108	0,115	-0,435	1,508	2,348	0,414	0,277
B	12,991	0,626	-0,312	2,500	5,549	0,635	0,230
C	5,207	0,009	-0,401	2,307	2,661	0,837	0,459
D	4,808	1,198	-0,086	0,654	1,729	0,131	0,301

O programa interpola as distribuições granulométricas para encontrar os parâmetros de quebra que melhor representam uma ampla faixa de possíveis curvas granulométricas de alimentação do moinho. O parâmetro $S1^{E*}$ representa a função seleção do moinho vertical em escala piloto ou o parâmetro $S1^E$, que representa a função seleção do moinho de bolas em escala de bancada, multiplicado pelo fator de escalonamento $k = 1,35$ ($S1^{E*} = kS1^E$).

Através da avaliação crítica das curvas de função seleção e função quebra é possível comparar o comportamento de diferentes minérios com relação à cominuição. A Figura 2 apresenta um comparativo entre a função seleção específica das amostras testadas.

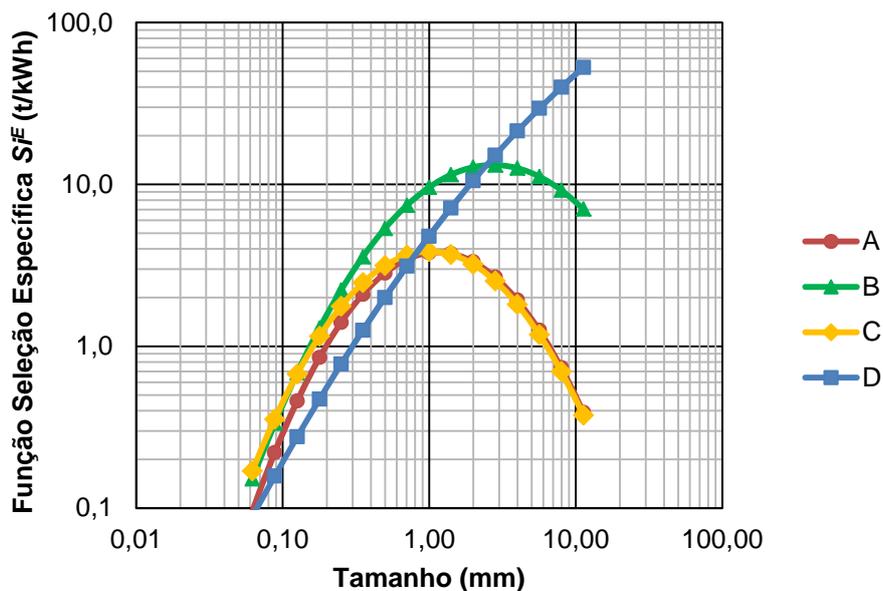


Figura 2. Comparativo da função seleção específica para as amostras testadas.

As curvas de função seleção específica das amostras A, B e C são parecidas, sendo que a amostra B possui maior taxa de quebra, devido ao maior deslocamento da curva na vertical.

A amostra D possui a maior taxa de quebra entre todas as amostras e tem curva de função seleção específica com um perfil próximo de linear, mostrando que o tamanho de bola utilizado para moer esta amostra tem boa relação de proporcionalidade com o maior tamanho de partícula considerada. A Figura 3 apresenta um comparativo entre a função quebra das amostras testadas.

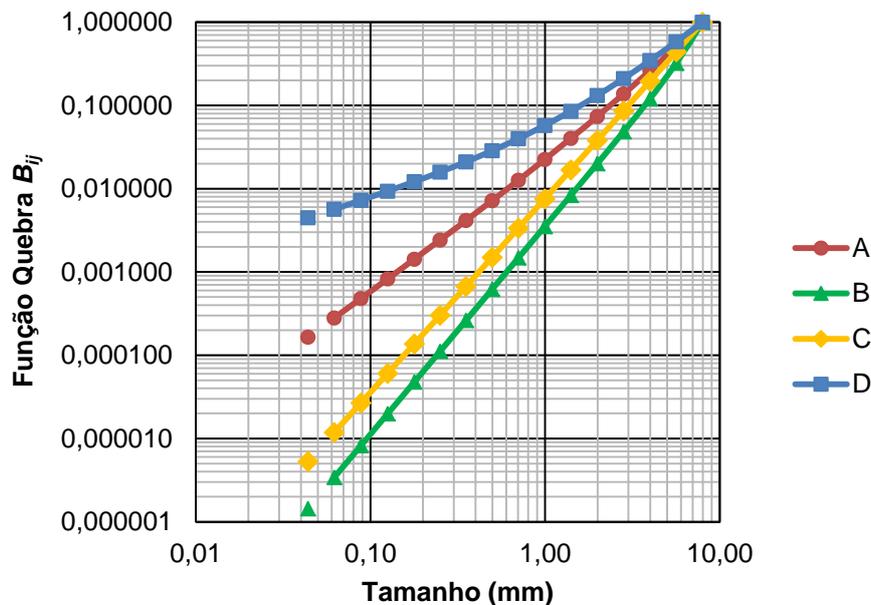


Figura 3. Comparativo da função quebra para as amostras testadas.

A curva de função quebra da amostra de D está bem horizontalizada, indicando elevada geração de finos quando comparada com as demais amostras.

4.2 Previsões do Modelo de Moagem

As simulações foram realizadas utilizando o modelo de moinho vertical implementado no programa de simulação de plantas de processos minerais *ModsimTM* versão 3.6.25.⁽¹²⁾ Os parâmetros de quebra foram alimentados no simulador para previsão da distribuição granulométrica do produto do moinho vertical em escala piloto. A Figura 4 apresenta o resultado das simulações realizadas.

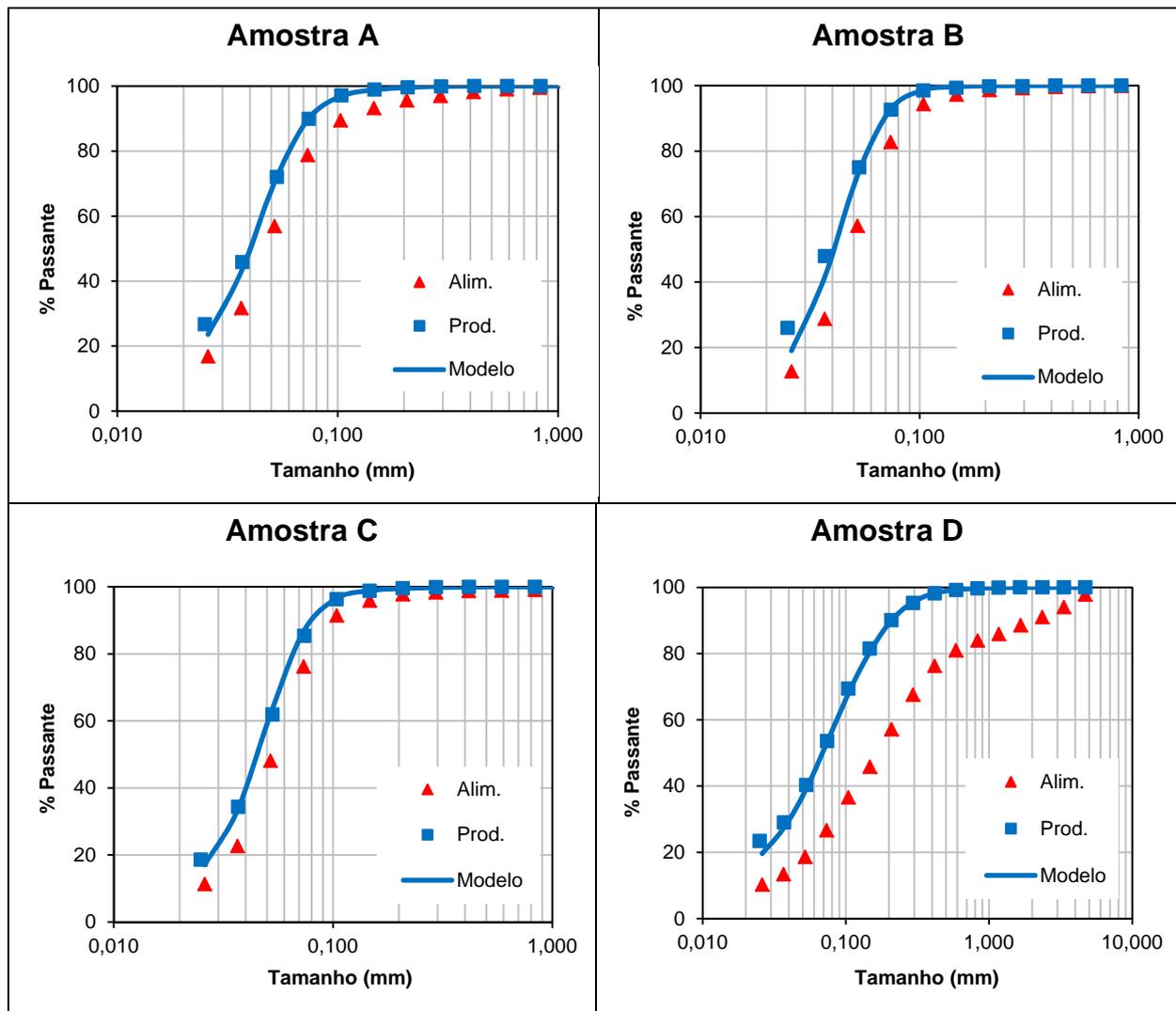


Figura 4. Previsão de distribuição granulométrica das amostras testadas.

O modelo utilizado foi capaz de prever com precisão aceitável a distribuição granulométrica do produto de um moinho vertical. Estes resultados indicam que os mecanismos de fratura dos moinhos de bolas e dos moinhos verticais são semelhantes, uma vez que não foi necessário incluir uma função extra para descrever uma, possível, maior taxa de redução das partículas através do mecanismo de atrição, conforme muito discutido na indústria mineral ⁽³⁾.

O fator $k = 1,35$ se mostrou adequado para representar a maior eficiência do moinho vertical em relação ao moinho de bolas. Em termos de potência líquida, o moinho vertical seria cerca de 35% mais eficiente que o moinho de bolas. Contudo, deve-se atentar para a potência em vazio dos dois tipos de moinhos. Estudos preliminares indicam que o moinho vertical possui maior potência em vazio que um moinho de bolas, considerando a mesma potência instalada (potência bruta). Estudos mais detalhados se fazem necessários para confirmação destes dados.

5 CONCLUSÃO

As simulações indicaram que é possível prever a distribuição granulométrica e a potência líquida de um moinho vertical utilizando o modelo do balanço populacional. O modelo baseado em energia de Herbst e Fuerstenau,⁽⁸⁾ utilizado para simulação

de moinho de bolas, foi modificado com a inclusão de um fator de escalonamento k aplicado sobre um dos parâmetros que descreve a função seleção específica de forma a representar a maior eficiência de moagem do moinho vertical, conforme proposto por Mazzinghy.⁽³⁾

REFERÊNCIAS

- 1 STIEF, D. E., LAWYER, W.A., WILSON, L. J. *Tower mill and its application to fine grinding*, Minerals and Metallurgy Processing Vol. 4, pp. 45-50, 1987.
- 2 WILLS, B. A. *Mineral Processing Technology*, Pergamon Press, Oxford, 4th ed., pp. 286-287, 1988.
- 3 MAZZINGHY, D. B. *Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical*, Belo Horizonte, Tese de Doutorado, PPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- 4 VERKOEIJEN, D, POUWA, G. A., MEESTERS, G. M. H., SCARLETT, B. *Population balances for particulate processes—a volume approach*, Chemical Engineering Science, Vol. 57, pp. 2287-2303, 2002.
- 5 HULBURT, H. M. & KATZ, S. *Some problems in particle technology: A statistical mechanical formulation*. Chemical Engineering Science, Vol. 19, pp. 555-574, 1964.
- 6 AUSTIN, L. G., KLIMPEL, R. R., LUCKIE, P. T. *Process Engineering of Size Reduction*, SME - AIME, 1984.
- 7 HERBST, J. A. & FUERSTENAU, D. W. *Scale-Up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models*, International Journal of Mineral Processing, Vol. 7, pp. 1-31, 1980.
- 8 HERBST J. A. AND FUERSTENAU D. W. *Mathematical Simulation of Dry Ball Milling using Specific Power Information*, Trans. AIME, Vol. 254, pp. 343, 1973.
- 9 RAJAMANI, K. & HERBST, J.A. *Simultaneous estimation of selection and breakage functions from batch and continuous grinding data*, Transactions of Institution of Mining and Metallurgy, Vol. 93, pp. 74-85, 1984.
- 10 MAZZINGHY, D. B., ALVES, V. K., SCHNEIDER, C. L., 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 9th International Mineral Processing Conference - Procemin, Santiago, Chile, pp. 412-420, 2012.
- 11 MTI - Mineral Technologies International, Inc. *BatchMill™ Standard Batch Test Analyzer*, Manual do Usuário, 1^a Edição, 2003.
- 12 MTI - Mineral Technologies International, Inc. *Modsim™ - MODular SIMulator for Mineral Processing Plants*, Manual do Usuário, 12^a Edição, 2009.