

## PREVISÃO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE MOINHO VERTMILL ATRAVÉS DO MODELO DO BALANÇO POPULACIONAL

MAZZINGHY, D.B.<sup>1</sup>, ALVES, V.K.<sup>2</sup>, SCHNEIDER, C.L.<sup>3</sup>, GALERY, R.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UFMG. douglasmazzinghy@ufmg.com

<sup>2</sup>Vale S.A. vladmir.alves@vale.com

<sup>3</sup>Cetem. cschneid@cetem.gov.br

<sup>4</sup>UFMG. rgalery@demin.ufmg.br

### RESUMO

Uma campanha de testes em escala piloto com um moinho VertiMill foi realizada com amostras de minério de ferro e de minério de cobre da Vale S.A com o objetivo de avaliar a aplicação deste tipo de equipamento em moagens primárias. Os profissionais envolvidos no dimensionamento de novos circuito de moagem tem discutido bastante sobre qual metodologia utilizar para dimensionar os moinhos VertiMill. Este trabalho apresentada uma nova metodologia para escalonamento e simulação de moinho VertiMill através do modelo do balanço populacional utilizando parâmetros de quebra determinados através de um moinho de bolas tubular em escala de laboratório. O teste requer pequenas quantidades de amostras e pode ser realizado em qualquer laboratório de processo que possua um moinho de bolas para testes. Para a determinação dos parâmetros de quebra foi utilizado um *software* específico denominado *BatchMill*<sup>TM</sup>, que interpola as várias curvas granulométricas geradas nos testes de bancada de forma a obter parâmetros de quebra que representem uma ampla faixa de operação do moinho VertiMill. Estes parâmetros de quebra foram utilizados para simulação dos testes em escala piloto utilizando o *software* *Modsim*<sup>TM</sup>, que simula a operação de equipamentos de moagem e classificação. Os resultados obtidos nas simulações indicam que é possível prever a distribuição granulométrica do produto do moinho VertMill com precisão aceitável utilizando a metodologia proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** VertiMill; moagem; simulação; dimensionamento.

### ABSTRACT

A test campaign with a pilot scale VertiMill was performed with samples of iron ore and copper ore from Vale S.A. in order to evaluate the application of this type of equipment in primary grinding. Professionals involved in the design of new grinding circuit have discussed a lot about what methodology to use to scale-up VertiMill. This paper presented a new methodology for VertiMill scale-up and simulation by population balance model using parameters determined through results from a conventional tubular batch ball mill. The test requires small amounts of samples and can be carried out in any laboratory that has a batch ball mill. To determine the breakage parameters it was used *BatchMill*<sup>TM</sup> software, which interpolates different particle size distributions from batch tests to obtain parameters that represent a wide range of VertiMill operation. These breakage parameters were used to simulate the pilot scale tests using the *Modsim*<sup>TM</sup> software, which simulates the operation of grinding and classification equipment. The simulation results indicate that it is possible to predict the particle size distribution of the VertMill product with acceptable accuracy using the methodology proposed.

**KEYWORDS:** VertiMill; grinding; simulation; scale-up.

## 1. INTRODUÇÃO

A Vale S.A. tem estudado a utilização de moinho VertiMill na etapa de moagem primária, onde normalmente tem sido utilizado o moinho tubular de bolas. Um campanha de testes em escala piloto com moinho VertiMill foi realizada com amostras de minério de ferro e minério de cobre com o objetivo de verificar o consumo energético e as distribuições granulométricas do circuito de moagem utilizando este tipo de equipamento. Durante os testes todas as variáveis operacionais foram registradas de forma redundante para fechamento de balanço de massas. Estudos indicam que o VertiMill é, em média, 35% mais eficiente que o moinho de bolas (PENA *et al.*, 1985; DUFFY, 1994; VANDERBEEK, 1998; JANKOVIC *et al.*, 2006; BRISSETTE, 2009; JUNIOR *et al.*, 2011; MAZZINGHY *et al.*, 2012; MAZZINGHY *et al.*, 2013).

### 1.1. VertiMill

O moinho VertiMill 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. A Figura 1 mostra os componentes principais do VertiMill.

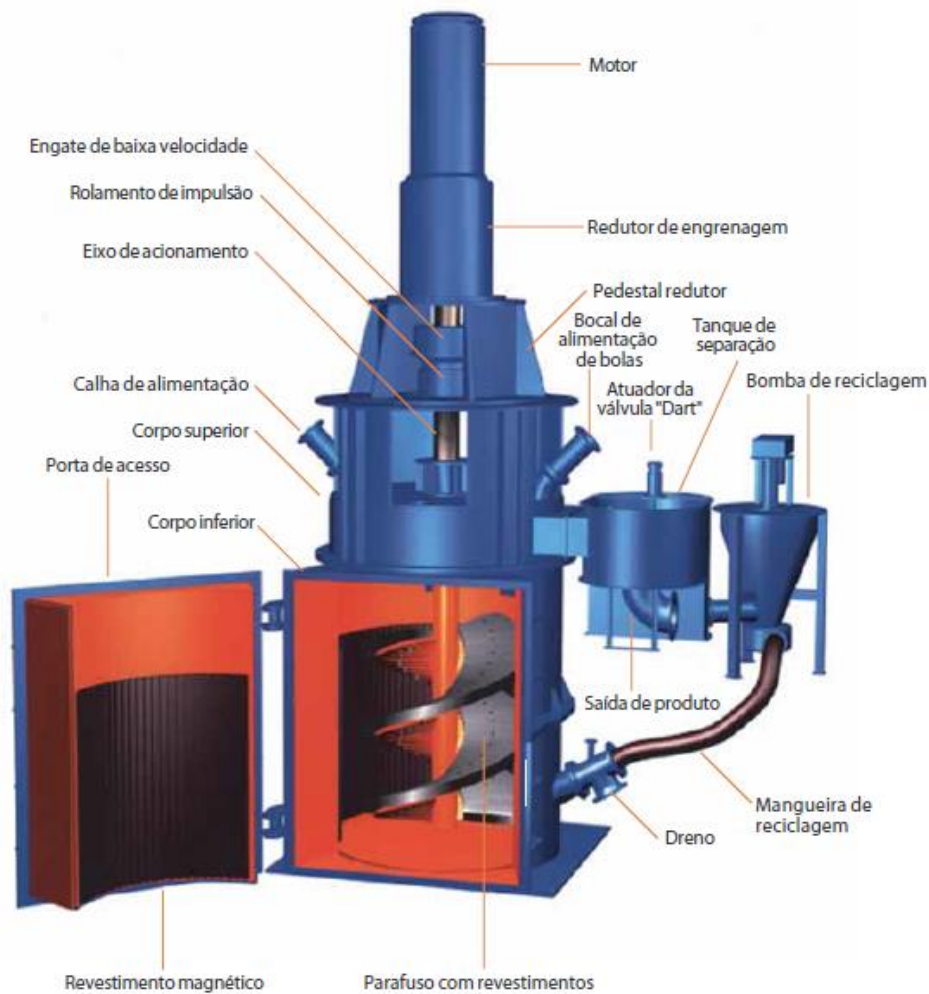


Figura 1. Componentes principais do VertiMill (Cortesia Metso).

O VertiMill normalmente é aplicado em moagens finas e ultrafinas e utiliza bolas de menor diâmetro se comparado ao moinho de bolas.

## 1.2. Modelo do Balanço Populacional

O modelo do balanço populacional é uma ferramenta robusta para a simulação do processo de moagem na indústria mineral. Formulado para propósitos de engenharia química por HULBURT & KATZ (1964), este modelo considera populações de partículas sofrendo redução de tamanho durante um determinado intervalo de tempo. É possível prever a redução de cada fração de tamanho da distribuição granulométrica. O modelo aplicado ao moinho de bolas encontra-se consolidado e não há dúvidas sobre a acurácia da previsão realizada por este. A equação 1 descreve o modelo do balanço populacional para a moagem em batelada (AUSTIN *et al.*, 1984).

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

$m_i(t)$  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 (AUSTIN *et al.*, 1984).

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

$B_{ij}$  sendo a função quebra acumulada e os parâmetros  $\beta, \phi, \gamma$  sendo constantes dependentes das características do material.

HERBST & FUERSTENAU (1980) consideram que 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.

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

$S_i$  ( $\text{min}^{-1}$ ) 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 e pode ser modelada através da equação 4 (RAJAMANI & HERBST, 1984).

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

$S_i^E$  (t/kWh) sendo a função seleção específica em energia,  $SI^{E*}$  (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  $\zeta_1, \zeta_2$  são parâmetros característicos do material e das condições de moagem. Para simulação do VertiMill o parâmetro  $SI^E$ , da equação original, foi multiplicado por um fator de escalonamento  $k = 1,35$  de forma a representar a maior eficiência do VertiMill, tornando-se  $SI^{E*}$  (MAZZINGHY, 2012). Estudos anteriores mostraram que o fator de

escalonamento de VertiMill  $k = 1,35$  é aplicável há diferentes minérios (MAZZINGHY, 2012; MAZZINGHY *et al.*, 2012; MAZZINGHY *et al.*, 2013).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Amostras

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de minério de ferro e de minério de cobre testadas com VertiMill em escala piloto.

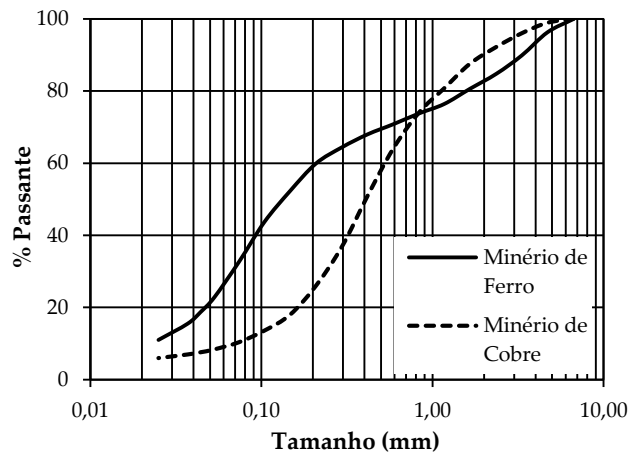


Figura 2. Distribuição granulométrica das amostras testadas com VertiMill em escala piloto.

A amostra de minério de cobre apresentou perfil granulométrico típico com boa distribuição de frações grossas e finas. Já a amostra de minério de ferro apresentou um perfil granulométrico típico de amostra bimodal, com pequena quantidade de material de frações grossas e elevada quantidade de finos.

### 2.2. Teste Piloto

Os testes em escala piloto foram realizados em circuito direto de moagem fechado com peneiras de alta frequência (Derrick). Foi utilizada uma abertura de tela de acordo com a especificação de produto desejada. O VertiMill foi operado com velocidade constante da espiral de 87rpm.

As amostras tiveram a sua distribuição granulométrica reduzida, através de britagem, para  $100\% < 6,3\text{mm}$ , pois este seria o limite de tamanho máximo de partículas para uma operação eficiente do moinho vertical, segundo o fabricante. A Tabela I apresenta a distribuição de tamanhos das bolas utilizadas no teste piloto com VertiMill.

Tabela I. Distribuição de tamanhos das bolas utilizadas no teste piloto com VertiMill.

Bola (mm)	% Ret.
35	38,4
30	27,5
25	14,5
19	17,7
12	1,9
Total	100

O balanço de massas dos testes foi fechado conforme o método dos multiplicadores de Lagrange através da distribuição granulométrica, da concentração de sólidos e das vazões de sólidos de cada um dos fluxos do circuito.

### 2.3. Caracterização tecnológica

Foram realizados testes com um moinho de bolas de laboratório com as amostras da alimentação nova, com a mesma distribuição de tamanho de bolas e mesma concentração de sólidos da polpa considerados nos testes em escala piloto.

As amostras foram britadas em  $100\% < 3,6\text{mm}$  com o objetivo de manter adequada proporção entre o maior tamanho de bola e o diâmetro do moinho utilizado nos testes. As amostras foram submetidas à moagem por quatro diferentes intervalos de tempo, estimados segundo a quebra de primeira ordem (AUSTIN *et.al.*, 1984), com o objetivo de se obter distribuições granulométricas espaçadas de tal forma que fosse possível determinar as funções seleção e quebra para um amplo intervalo de distribuição de tamanho de partículas.

Após cada tempo de moagem, todo o material foi retirado do moinho para obtenção da distribuição granulométrica. As perdas, em massa, de material foram avaliadas e o material foi devolvido ao moinho para a continuação do teste. A Tabela II apresenta as condições operacionais dos testes com moinho de bolas de bancada.

**Tabela II. Condições operacionais do teste com moinho de bolas de bancada.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Unid.</b>	<b>Valores</b>
Diâmetro Interno	m	0,254
Comprimento Interno	m	0,254
Porosidade	%	40,0
J - Enchimento Bolas	%	40,0
U – Enchimento Material	%	100,0
Velocidade Crítica	%	70,0

A amostra de minério de cobre foi testada a seco sendo que um teste foi realizado a úmido com um tempo 30% menor que o último tempo de moagem a seco (ALVES *et al.*, 2004). A execução dos testes dessa forma é realizada em menor tempo, pois o manuseio do material seco é mais fácil, além de minimizar as perdas de material, uma vez que os testes a úmido tem a necessidade de filtragem do material para determinação da distribuição granulométrica.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Parâmetros de quebra

Os parâmetros de quebra foram determinados usando as curvas granulométricas geradas nos testes com moinho de bolas de bancada através do *software BatchMill™* versão 1.6 (MTI, 2003). O programa interpola as distribuições granulométricas para encontrar os parâmetros de quebra que melhor representam uma ampla faixa de curvas granulométricas de alimentação do moinho.

A Tabela III apresenta os parâmetros de quebra para as amostras estudadas.

Tabela III. Parâmetros de quebra das amostras estudadas

Amostra	Função Seleção			Função Quebra			Erro
	$SIE^*$ (t/kWh)	$\square\square$	$\square\square$	$\square$	$\square$	$\square$	
Ferro	4,808	1,198	-0,086	0,654	1,729	0,131	0,301
Cobre	0,941	0,665	-0,011	0,615	3,328	0,463	1,489

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas geradas através de testes com moinho de bancada e o ajuste realizado pelo software *BatchMill*<sup>TM</sup>.

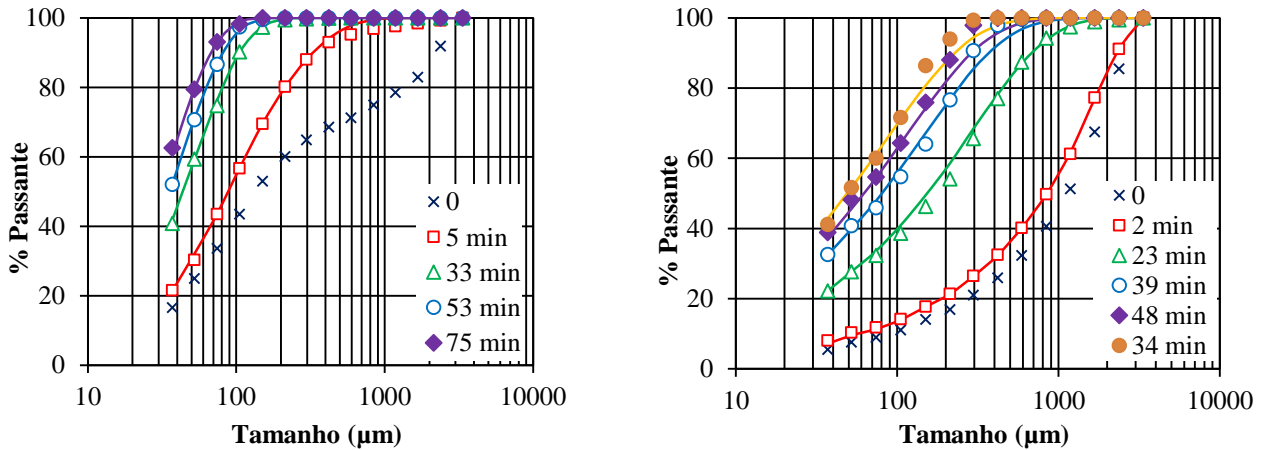


Figura 3. Curvas granulométricas geradas nos testes com moinho de bancada, amostra de minério de ferro a esquerda e amostra de minério de cobre a direita.

O modelo do balanço populacional representou de forma satisfatória as curvas granulométricas geradas em diferentes tempos de moagem. Apenas o último teste da amostra de minério de cobre foi executado a úmido (tempo de moagem 30% menor que o quarto teste a seco). A Figura 4 apresenta as curvas de função seleção específica e função quebra para as duas amostras testadas. As curvas de função seleção específica das duas amostras apresentam um comportamento próximo de linear, demonstrando que o tamanho máximo de bola considerado nos testes possui boa relação de proporcionalidade com o tamanho máximo de partículas (*Top size*).

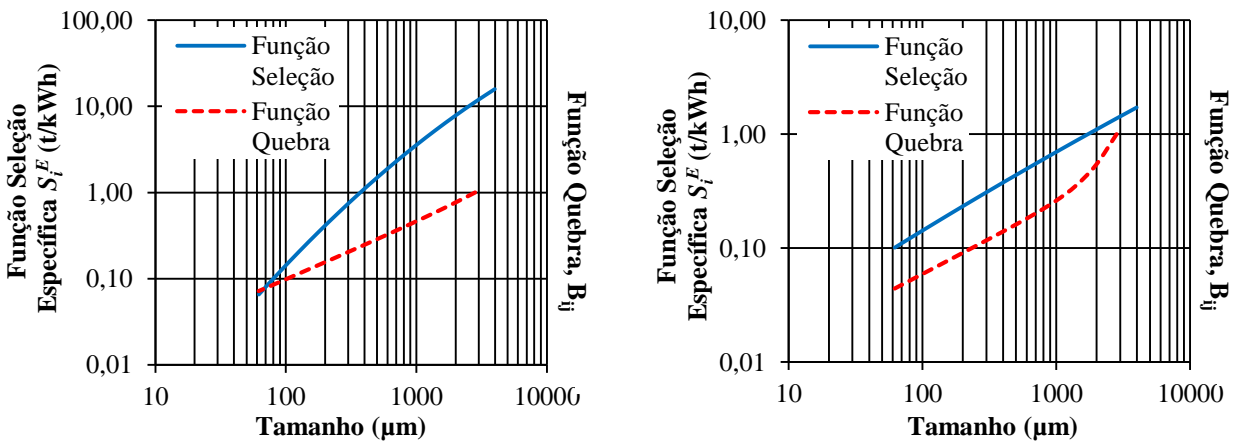


Figura 4. Função seleção específica e função quebra, amostra de minério de ferro a esquerda e amostra de minério de cobre a direita.

### 3.2. Simulações

As simulações foram realizadas utilizando o modelo de VertiMill implementado no programa de simulação de plantas de processos minerais *Modsim<sup>TM</sup>* versão 3.6.25 (MTI, 2009). Os parâmetros de quebra foram alimentados no simulador para previsão da distribuição granulométrica do produto do moinho VertiMill em escala piloto. O modelo utilizado fez previsões consideradas adequadas utilizando um parâmetro de escalonamento de VertiMill  $k = 1,35$ . A Figura 5 apresenta o resultado das simulações realizadas.

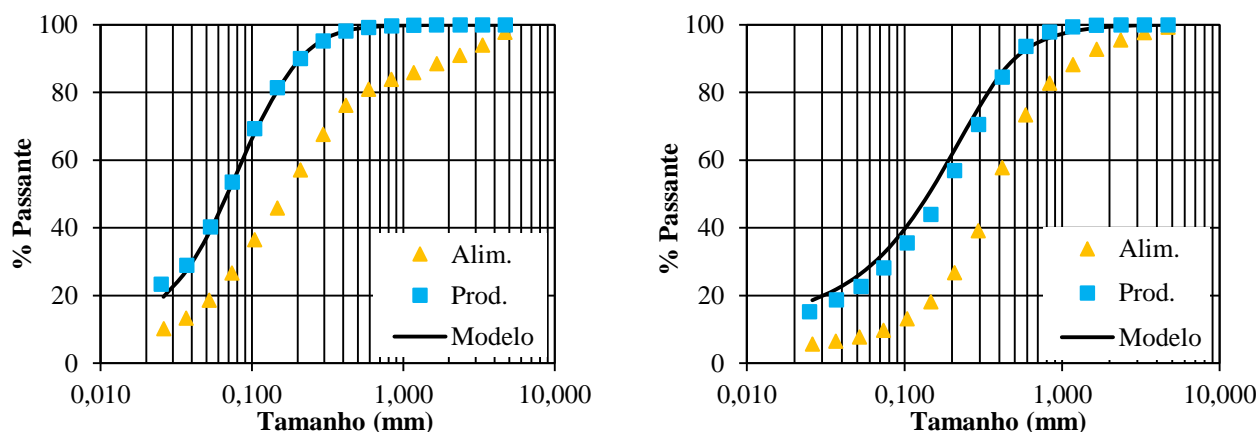


Figura 5. Previsão de distribuição granulométrica do produto do VertiMill, amostra de minério de ferro a esquerda e amostra de minério de cobre a direita.

## 4. CONCLUSÕES

As simulações indicaram que é possível prever a distribuição granulométrica do moinho vertical utilizando o modelo do balanço populacional. O escalonamento do VertiMill foi realizado através de um fator  $k = 1,35$  aplicado sobre o parâmetro  $SI^E$  da equação que descreve a função seleção específica. Este fator representa a maior eficiência do VertiMill frente ao moinho de bolas e tem se mostrado constante para diferentes minérios. Os engenheiros de processo envolvidos no dimensionamento de novas usinas de beneficiamento mineral possuem mais uma ferramenta para dimensionar novos circuitos de moagem com moinho VertiMill utilizando reduzida quantidade de amostras e sem a necessidade de equipamentos específicos.

## 5. REFERÊNCIAS

ALVES, V. K., GALÉRY, R., PERES, A. E. C., SCHNEIDER, C. L. Estudo de Otimização de Carga de Moinho Utilizando Tecnologia de Simulação, XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis, Vol. 2, pp. 227-234, 2004.

AUSTIN, L. G., KLIMPEL, R. R., LUCKIE, P. T. Process Engineering of Size Reduction, SME - AIME, 1984.

BRISSETTE, M. Energy Savings and Technology Comparison by Using Small Grinding Media, Procemin, Santiago, Chile, 2009.

DUFFY, S. M. Investigation into the Performance Characteristics of Tower Mills, Master Thesis - University of Queensland, JKMR, Brisbane, Australia, 1994.

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.

HULBURT, H. M. & KATZ, S. Some problems in particle technology: A statistical mechanical formulation. Chemical Engineering Science, Vol. 19, pp. 555-574, 1964.

JANKOVIC A., VALERY W., CLARKE G. Design and Implementation of an AVC Grinding Circuit at BHP Billiton Cannington, SAG 2006 Conference, 2006.

JUNIOR, L. T. S., GOMES, M. P. D., GOMIDES, R. B., JUNIOR, G. G. O., PHILLIPS, W. Vantagens e Desvantagens do Uso de Moinho Vertical na Remoagem de Concentrado da Kinross Paracatu, XXIV ENTMME, Salvador/Bahia, 2011.

MAZZINGHY, D.B. Metodologia para Escalonamento e Simulação de Moinho Vertical, Tese de Doutorado, PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, UFMG, 2012.

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.

MAZZINGHY, D. B., SCHNEIDER, C.L., ALVES, V. K., GALÉRY, R. Simulação de Moinho Vertical Aplicada aos Minérios de Ferro, 43º Simpósio de Redução e Minério de Ferro e Matérias-primas, Submetido, 2013.

MTI - Mineral Technologies International, Inc. BatchMill™ Standard Batch Test Analyzer, Manual do Usuário, 1ª Edição, 2003.

MTI - Mineral Technologies International, Inc. Modsim™ - MODular SIMulator for Mineral Processing Plants, Manual do Usuário, 12ª Edição, 2009.

PENA, F., LAWYER, W., JONES, S. The Versatile Tower Mill a Recent Application, AIME Intermountain Conference, 1985.

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.

VANDERBEEK J. Tertiary Grinding Circuit Installation at Chino Mines Company, SME Comminution Practices, Chapter 31, 1998.