

# RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ELÉTRICA E ENCHIMENTO DE CARGA MOEDORA EM MOINHOS VERTICAIS\*

Priscila Esteves<sup>1</sup>

Marcelo Martins Stopa<sup>2</sup>

Roberto Galery<sup>1</sup>

Douglas Batista Mazzinghy<sup>3</sup>

José Francisco Cabello Russo<sup>3,4</sup>

## Resumo

Os moinhos verticais (Vertimill) possuem uma relação entre a potência elétrica consumida e o enchimento de carga moedora, assim como acontece nos moinhos de bolas convencionais (tubulares). Contudo, existem poucas referências na literatura sobre esta relação para os moinhos verticais. Este estudo visa apresentar uma curva de relação entre potência e enchimento de carga moedora para o Vertimill VTM-1500 da Metso. Os dados foram obtidos durante o comissionamento dos moinhos verticais do Projeto Minas-Rio. Todas as grandezas elétricas foram registradas através de um analisador de qualidade de energia, durante o carregamento e descarregamento do moinho. A potência em vazio do moinho foi obtida através da curva de descarregamento e representa 11,6% da potência total. Essa potência é perdida no acionamento na forma de perdas elétricas e mecânicas, não sendo utilizada efetivamente no processo de moagem. Através desta informação é possível determinar a potência líquida de moagem, dado essencial para estudos de comparação da eficiência energética entre moinhos de bolas e moinhos verticais.

**Palavras-chave:** Moinhos verticais; Vertimill; Eficiência energética; Potência elétrica; Projeto Minas-Rio.

## POWER MODELLING FOR BALL CHARGE IN VERTICAL MILLS

### Abstract

The vertical mills (Vertimill) have a relationship between the consumed electric power and the load charge filling, as well as in conventional ball mill (tube). However, there are few references in the literature about this relationship for vertical mills. This study aims to present a curve between power and load charge filling for VTM-1500 Vertimill supplied by Metso. Data were obtained during the mills commissioning of the Minas-Rio Project. All electrical parameters were recorded using a power quality analyzer, during mill loading and unloading. The mill no-load power was obtained by unloading curve and represents 11.6% of the total power. This power is lost in drive by electrical and mechanical losses and is not effectively used in the grinding process. With this information it is possible to determine the net power grinding, important for studies comparing the energy efficiency of ball mills and vertical mills.

**Keywords:** Vertical mills; Vertimill; Energy efficiency; Electric power; Minas-Rio project.

\*Uma versão deste trabalho foi apresentada no Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, XXVI, Poços de Caldas, MG, Brasil, 18 a 22 de outubro de 2015.

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: pmxesteves@gmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup>Anglo American - Minério de Ferro Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>4</sup>Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira – FUNCESI, Itabira, MG, Brasil.



## I INTRODUÇÃO

O moinho vertical tem sido escolhido como opção de equipamento de cominuição em novos projetos, principalmente nas etapas de remoagem de minérios. A Figura 1 apresenta um esquemático do Vertimill [1].

Apesar de já amplamente utilizado, poucos estudos sobre a eficiência energética e sobre o consumo de potência dos moinhos verticais são encontrados na literatura. Os estudos relacionados ao tema concentram-se na comparação do consumo energético entre moinhos verticais e moinhos de bolas. Através da aplicação de diversas metodologias, conclui-se que o moinho vertical apresenta-se energeticamente mais eficiente que o moinho de bolas [2-5]. Também são encontrados estudos voltados ao desenvolvimento de metodologias para simulação e escalonamento de moinhos verticais [6-9], além de trabalhos focados na influência de características como dimensões e velocidade [10,11] na performance do equipamento. No entanto, a bibliografia sobre o assunto carece de estudos capazes de propor um modelo para o consumo energético desses equipamentos.

Ao contrário do caso dos moinhos de bolas, em que é possível encontrar modelos consolidados para prever as características de potência e consumo energético, no caso do moinho vertical esse comportamento não é bem conhecido. Sobre o assunto, destaca-se a curva que relaciona a carga de bolas com a potência elétrica, cujo modelo já existe para o moinho de bolas, mas ainda não encontra-se consolidado no caso do moinho vertical.

Segundo Jankovic e Morrell [2], as principais variáveis que afetam a potência elétrica consumida por um moinho vertical são: diâmetro do moinho, geometria e velocidade do agitador, massa de bolas e densidade da carga. Ainda de acordo com Jankovic et al. [5], a curva que relaciona o enchimento de carga moedora com a potência elétrica consumida apresenta características lineares quando o agitador tem características espirais, como é o caso do moinho Vertimill. Os testes foram realizados em um moinho vertical de laboratório e a potência consumida foi modelada através de regressão não linear multivariável. A equação obtida tem um grau de 0,98 para a relação entre potência e enchimento de carga moedora, ou seja,

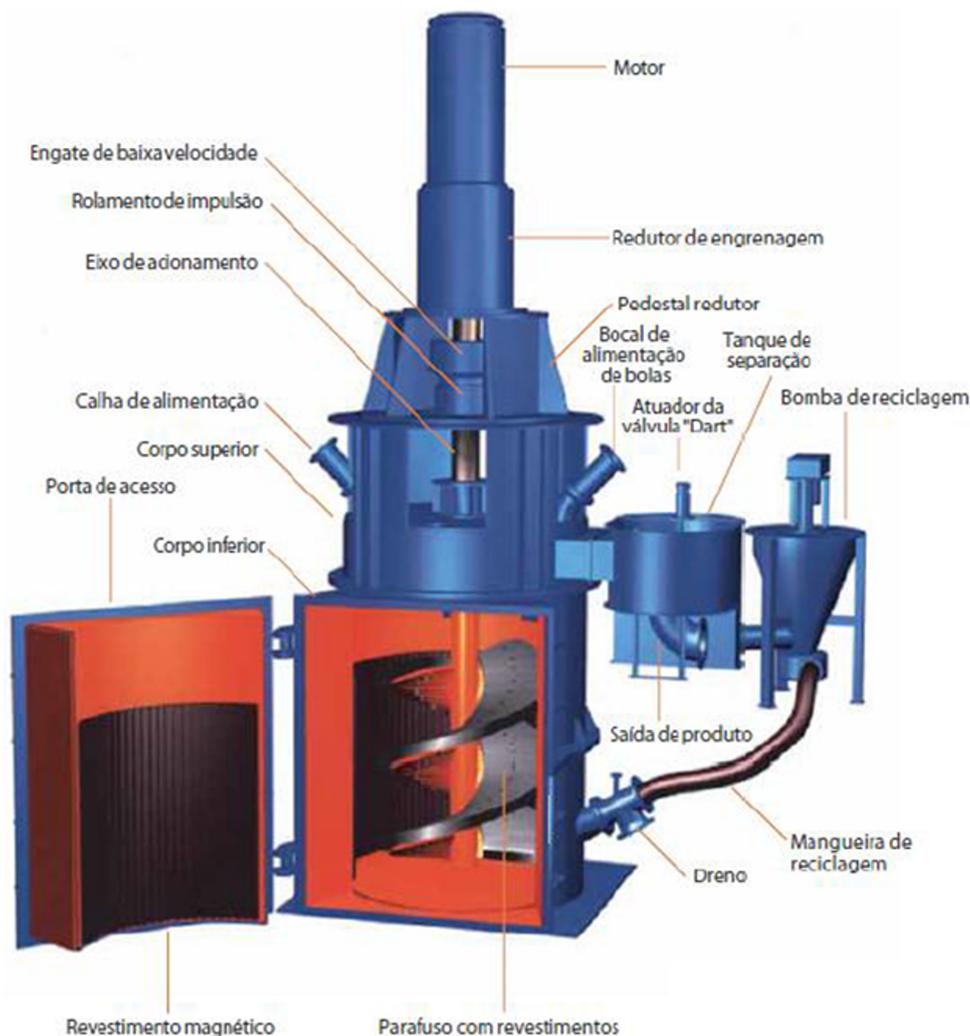


Figura 1. Esquemático do moinho vertical [1].

a relação é praticamente linear. Essa característica linear também é demonstrada graficamente por Nitta et al. [12], que apresenta a relação entre o enchimento de carga moedora para moinhos verticais de potências variadas. Através de uma análise dimensional e física dos elementos que afetam a potência consumida os autores propõe uma modelagem teórica para o cálculo da potência. Nesse modelo o grau da equação que relaciona o enchimento de carga moedora com a potência é de 0,88. Resultados mostram que a tendência de erro do modelo obtido é reduzida para maiores valores de carga, sendo o modelo utilizado a partir de aproximadamente 30% do enchimento. Os objetivos principais desse artigo são a modelagem de uma curva que relacione o enchimento de carga moedora com a potência elétrica no moinho vertical, além da obtenção da potência em vazio do equipamento. Conhecendo a potência em vazio é possível determinar a potência líquida de moagem, dado essencial para estudos de comparação da eficiência energética entre moinhos de bolas e moinhos verticais. Os dados foram obtidos durante o comissionamento dos moinhos verticais do Projeto Minas-Rio, modelo Vertimill VTM-1500 fabricados pela Metso.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes foram realizados em um moinho vertical alimentado diretamente por um motor trifásico de indução WEG com rotor de gaiola. O método de partida é direto e os parâmetros elétricos do acionamento são mostrados na Tabela 1, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante.

A carga do motor é a espiral do moinho vertical. O acoplamento com a carga é realizado através de um redutor planetário que realiza a redução para a velocidade nominal de giro do moinho. As informações mecânicas da carga e do trem de acionamento são mostradas na Tabela 2.

**Tabela 1.** Parâmetros elétricos do acionamento do moinho vertical

Parâmetro	Valor
Pólos	6
Velocidade de rotação (rpm)	1190
Potência nominal (kW)	1119
Tensão nominal (V)	4000
Corrente Nominal (A)	201,8
Frequência (Hz)	60

**Tabela 2.** Parâmetros mecânicos do acionamento do moinho vertical

Parâmetro	Valor
Taxa de Redução	60,86
Velocidade de rotação da espiral (rpm)	19,32
Massa da espiral (t)	32,20
Diâmetro do eixo da espiral (m)	0,476
Comprimento da espiral (m)	3,30

Os testes foram realizados em duas etapas diferentes, sendo a primeira a de carregamento do moinho, e a segunda a de descarregamento. Para ambas as etapas não houve carga de minério no moinho, sendo os testes realizados apenas com carga de bolas de 12,5 mm de diâmetro e água. As medidas elétricas foram registradas através do analisador de qualidade de energia Anawin MARH-21/992. Foram coletados todas as tensões, correntes, potências ativa, reativa e aparente, além de fator de potência do motor. A frequência de amostragem dos dados obtidos foi de 1 Hz para os testes de descarregamento e de 10 Hz para os testes de carregamento. Todos os dados foram registrados utilizando o software do próprio analisador e posteriormente tratados com o uso do software Matlab®. As informações levantadas foram analisadas e tratadas para exclusão de ruídos com o objetivo de obter uma relação precisa entre potência e enchimento. O método utilizado para obtenção da curva que relaciona a potência elétrica consumida pelo moinho ao enchimento de carga moedora do mesmo é descrito a seguir.

Numa primeira etapa a potência ativa consumida pelo motor foi monitorada durante o enchimento do moinho com a carga moedora. Por limitações técnicas e de segurança do equipamento não é possível medir essa potência com o moinho totalmente vazio, com isso as medições são realizadas apenas para uma quantidade mínima de carga moedora. Através desses dados obtêm-se a curva parcial que relaciona potência e enchimento do moinho para cargas moedoras maiores. Em uma etapa posterior foi realizada a medição da potência elétrica durante o descarregamento das bolas do moinho, que é um processo contínuo. A medição foi realizada até que restasse apenas um volume morto de bolas entre a espiral e o fundo do moinho. Como esse volume morto não toca a espiral, a potência final desse teste representa a potência em vazio do equipamento, ou seja, a potência necessária apenas para girar a espiral. Essa potência em vazio pode ser utilizada, juntamente com os dados obtidos durante o carregamento de bolas do moinho, na obtenção de uma expressão gráfica e matemática que relacione o enchimento de carga moedora à potência consumida pelo moinho vertical. A relação gráfica é obtida a partir dos dados empíricos descritos anteriormente. A expressão matemática, por sua vez, pode ser obtida através de aproximações polinomiais que representem bem os dados medidos.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Carregamento do Moinho Vertical

O carregamento do moinho vertical é realizado através de um guindaste que carrega as bolas no interior do moinho em sacos de 6 t. O carregamento é feito pela parte superior do moinho. A espiral do moinho é uma carga com grande massa e alto momento de inércia, como pode ser confirmado pelos dados da Tabela 2. Com isso, o seu

acionamento e giro somente são permitidos a partir de uma quantidade mínima de bolas no interior do moinho, de modo a estabilizar a espiral, evitando assim o desbalanceamento da carga. Para a energização do moinho e giro da espiral é necessária uma carga mínima de 40 t de bolas. Devido a limitações técnicas e de disponibilidade em campo as medições da potência elétrica foram iniciadas com uma carga de 68 t de bolas no interior do moinho e finalizadas com uma carga de 125 t de bolas. Os pontos de medição são apresentados na Tabela 3.

Foram registradas as cargas e os momentos de carregamento durante o teste. Os resultados ao longo do tempo são apresentados na Figura 2, juntamente com o valor médio de potência obtida para cada carga de bolas.

Dos dados medidos ao longo do tempo pode-se perceber um comportamento semelhante a degraus na potência a cada carregamento de bolas. Esse comportamento era esperado, visto que o aumento da carga de bolas eleva a carga no eixo do motor, elevando assim a potência elétrica consumida. O carregamento completo do moinho foi realizado em dois dias diferentes, e o último ponto de medição foi tomado no segundo dia. Como o motor permaneceu desligado no intervalo entre essas medições é possível perceber um período de potência nula entre os dois últimos carregamentos. Para o gráfico que relaciona o enchimento de carga moedora com a potência, percebe-se que a curva obtida apresenta características lineares. No entanto, o coeficiente linear da reta obtida apresenta valor negativo de 345. Isso significa que essa modelagem indica um valor negativo para a potência nula (em vazio) do equipamento, o que é fisicamente impossível. Percebe-se então que a curva de carregamento não apresenta resultados coerentes para a estimativa da potência em vazio do moinho vertical.

Portanto, faz-se necessário utilizar de outros métodos para a obtenção dessa variável. A potência em vazio será obtida através da curva de descarregamento do moinho, como será mostrado a seguir.

### 3.2 Descarregamento do Moinho Vertical

Ao contrário do carregamento, o descarregamento de bolas é feito de forma contínua, através de uma abertura na parte traseira do moinho por onde as bolas saem continuamente até que o moinho se esvazie. O que é chamado de moinho vazio é a presença de apenas um volume morto de bolas entre a espiral e o fundo do moinho, o que não influencia a potência consumida pelo mesmo, pois essas bolas não tocam a espiral. O descarregamento é um processo rápido, com duração de cerca de quatro minutos. Durante esse intervalo foram realizadas as medições elétricas no motor, os resultados obtidos são mostrados na Figura 3.

O início do descarregamento do moinho apresenta um pequeno decréscimo em degrau na potência, seguindo depois um comportamento linear, até atingir o valor mínimo de potência de 130 kW. Após esse valor o motor é desligado, por isso o final dos dados apresenta valor nulo de potência medida.

### 3.3 Modelagem da Potência em Vazio

Do teste de carregamento verificou-se que o valor da potência em vazio do moinho é de 130 kW, o que representa 11,6% da potência total (1119 kW). Através das informações elétricas e mecânicas dos elementos que constituem o acionamento é possível modelar as perdas em vazio. No entanto, a modelagem da eficiência de redutores

Tabela 3. Carga de bolas durante os testes (t)

Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5	Carga 6	Carga 7
68	74	80	86	92	98	125

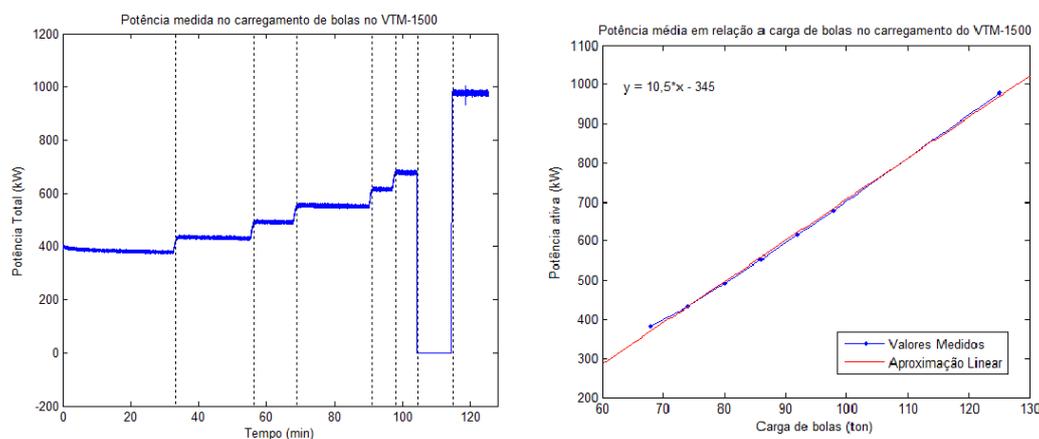
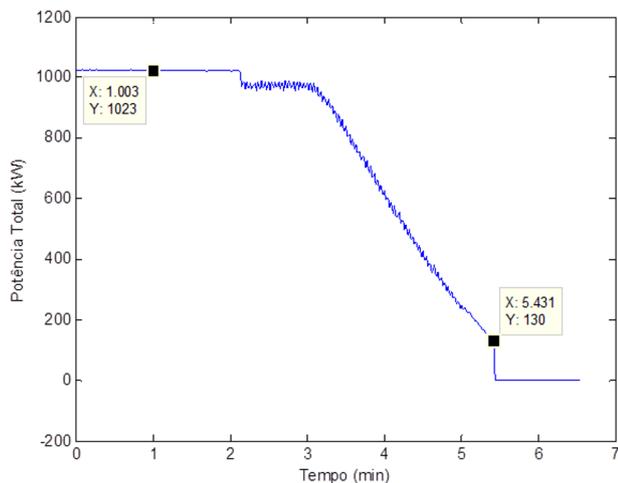


Figura 2. Potência elétrica medida durante carregamento de bolas no VTM-1500.



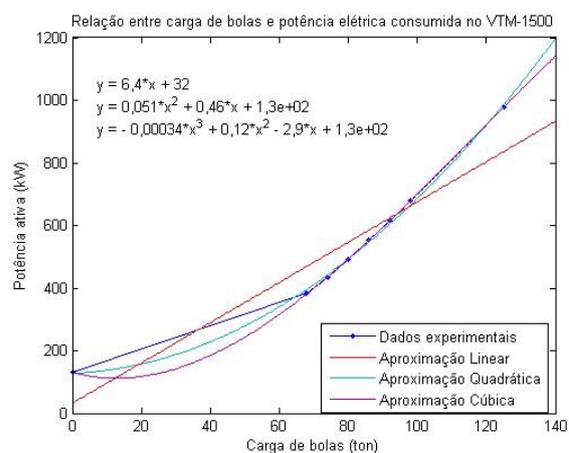
**Figura 3.** Potência elétrica medida no descarregamento do VTM-1500.

planetários é uma questão muito complexa que envolve a análise de alguns dados indisponíveis sobre as características do acionamento. As perdas do motor podem ser facilmente calculadas através da curva de rendimento fornecida pelo fabricante. Das curvas do motor temos que a eficiência para a carga em vazio de 130 kW é de aproximadamente 82%. Com isso é possível afirmar que 23,40 kW são perdidos no motor, entre perdas joulicas, de magnetização e correntes de Foucault. O restante da potência em vazio, de aproximadamente 106,6 kW representa as perdas mecânicas do acionamento, entre atrito, perdas de engrenamento e calor dissipado. Justificadas as intensidades das perdas mecânicas e elétricas do acionamento, conclui-se que a curva de descarregamento do moinho fornece um valor coerente para a potência em vazio desse equipamento. Com isso tem-se um novo ponto para acrescentar à curva que relaciona a potência e o enchimento de carga moedora do moinho vertical. A obtenção dessa relação é descrita a seguir.

### 3.4 Modelagem da Curva

A curva que relaciona a potência elétrica consumida com o enchimento de carga moedora no moinho vertical foi obtida utilizando-se a curva de carregamento e o valor de potência em vazio. O resultado obtido para essa relação é mostrado na Figura 4, com algumas possíveis aproximações polinomiais.

Como é possível perceber, a modelagem linear, que apresentou resultados muito bons para os dados de carregamento, não apresenta uma boa aproximação quando inserimos o ponto de carga em vazio. Já as modelagens quadrática e cúbica apresentam uma aproximação mais coerente com os dados experimentais. A aproximação cúbica apresenta valores de potência inferiores ao da potência em vazio para cargas até cerca de 30 t, o que é impossível fisicamente. Por isso essa modelagem também é descartada. Com isso, das modelagens polinomiais possíveis,



**Figura 4.** Relações gráficas e matemáticas entre a potência elétrica consumida e o enchimento de carga moedora para o moinho vertical VTM-1500.

a que melhor representa os dados experimentais obtidos é a quadrática. No entanto, segundo Nitta et al. [12] e Jankovic e Morrell [2], a equação que relaciona o enchimento de carga moedora com a potência ativa do motor é linear. Com isso, propõe-se a modelagem em duas faixas de enchimento de carga de bolas distintas. Ao observar a curva de eficiência do motor elétrico percebe-se que a eficiência do motor é praticamente constante para valores a partir de 30% da carga nominal, decaindo rapidamente para cargas mais baixas. Para sistemas mecânicos sabe-se que a eficiência do acionamento também é reduzida para baixos valores de carga, pois aumentam os coeficientes de atrito e as perdas elevam-se, reduzindo assim a eficiência. Com isso temos que as perdas elétricas e mecânicas no acionamento aumentam para valores baixos da carga, alterando assim a linearidade da curva que relaciona a carga no acionamento com a potência elétrica consumida. Ou seja, do ponto de vista das perdas do acionamento, a não linearidade da eficiência afeta a característica linear obtida na curva de carregamento que relaciona o enchimento de carga moedora e a potência ativa. Sabendo-se da característica não linear da eficiência do acionamento em baixas cargas, a modelagem aqui proposta separa a análise da curva que relaciona carga de bolas e potência ativa em duas faixas diferentes. Tomando como base a curva de eficiência do motor, a faixa linear de operação será considerada a partir de 30% da potência nominal, ou seja, 336 kW. Essa faixa de linearidade a partir de 30% também é considerada por Nitta et al. [12]. Para essa modelagem serão utilizados os dados de carregamento do moinho de bolas. Do segundo gráfico apresentado na Figura 2, temos que a equação linear que relaciona carga de bolas  $x$ , com a potência elétrica,  $P$ , medida no motor, é obtida como:

$$P = 10,5x - 345 \quad (1)$$

Em que a potência é dada em kW e a carga de bolas em t. Como não foram realizadas medições para valores inferiores a 30% da potência nominal, não é proposta uma modelagem matemática para essa faixa, já que não há dados experimentais para realizar a validação. O principal objetivo em se realizar testes com baixos valores de carga seria o de encontrar o valor da potência em vazio do moinho, que já foi obtido através da curva de descarregamento. Como essa faixa não compreende valores usuais de operação, a análise não fica comprometida.

#### 4 CONCLUSÃO

Conclui-se que a equação matemática que relaciona o enchimento de carga moedora com a potência ativa medida no motor, para um moinho vertical VTM-1500, é linear para potências superiores a 30% do valor nominal. Valores

inferiores de potência não foram medidos por limitações mecânicas e de segurança do equipamento.

A potência em vazio do equipamento representa 11,6% da potência total. Essa potência é perdida no acionamento na forma de perdas elétricas e mecânicas, não sendo utilizada efetivamente no processo de moagem. Essa informação é muito importante na análise da eficiência energética do equipamento.

#### Agradecimentos

Agradeço à Anglo American, pela disponibilização do equipamento, do material e pessoal necessário para a realização dos testes. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do CEFET-MG e ao Laboratório de Tratamento de Minérios da UFMG, pela acolhida, apoio e pelo interesse demonstrado no trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Metso Minerals. Moinho vertical (VERTIMILL™): moagem de finos e ultrafinos em via úmida. Sorocaba: Metso Minerals; 2006, p. 7.
- 2 Jankovic A, Morrell S. Power modelling of Stirred mills. In: Proceedings of the 36th Annual Conference of Metallurgists of CIM; 1997 Aug 17-19; Ottawa, Canada. 1997, p. 1-11. [acesso em 03 mar. 2016]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/288827039\\_Power\\_Modelling\\_of\\_Stirred\\_Mills](https://www.researchgate.net/publication/288827039_Power_Modelling_of_Stirred_Mills)
- 3 Junior LTS, Gomes MPD, Gomides RB, Junior GGO, Phillips W. Advantages and disadvantages of using tower mill in paracatu Kinross concentrate regrind. In: Anais do 24º Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; Out 16-19; Salvador, Brasil. p. 448-455.
- 4 Nasset JE, Radziszewski P, Hardie C, Leroux DP. Assessing the performance and efficiency of fine grinding technologies. In: Proceedings of the 38th Annual Canadian Mineral Processors Conference; 2006 Jan 17-19; Ottawa, Canada. 2006, p. 283-309.
- 5 Jankovic A, Valery W, Clarke G. Design and implementation of an AVC grinding circuit at BHP billiton cannington. In: Proceedings of the SAG Conference 2006; Vancouver, Canada. 2006. p. 1-11.
- 6 Mazzinghy DB. Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical [tese de doutorado]. Belo Horizonte: Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas/Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- 7 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. In: Proceedings of the 28th International Mineral Processing Conference; 2012 Oct 20-24; Santiago, Chile. 2012, p. 412-420.
- 8 Mazzinghy DB, Schneider CL, Alves VK, Galéry R. Vertical agitated media mill scale-up and simulation. Minerals Engineering. 2015;73:69-76.
- 9 Bergerman MG. Dimensionamento e simulação de moinhos verticais [tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica/Universidade de São Paulo; 2013.
- 10 Zheng J, Harris CC, Somasundaran P. Power consumption of stirred media mills. In: Proceedings of SME Annual Meeting. Society for Mining, Metallurgy and Exploration; 1994 Feb 14-17; Albuquerque, New Mexico. 1994, p. 1-8.
- 11 Zheng J, Harris CC. Power and operating behavior in stirred media mills. In: Proceedings of the 19th International Mineral Processing Congress. Society for Mining, Metallurgy and Exploration; 1995 Oct 20-25; San Francisco, USA. 1995, v. 2, p. 47-51.

Esteves et al.

12 Nitta S, Furuyama T, Bissombolo A, Mori S. Estimation of the motor power of the tower mill through dimensional analysis. In: Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress; 2006 Sept 3-8; Istanbul, Turkey. 2006, p. 158-161.

Recebido em: 12 Nov. 2015

Aceito em: 29 Abr. 2016