

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DA ETAPA DE MOAGEM PRIMÁRIA DE UM MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO DA REGIÃO DE MORRO DO PILAR*

Kelly Cristina Ferreira¹
Roberto Galery²
Antônio Eduardo Clark Peres³

Resumo

A determinação do consumo energético e o dimensionamento da etapa de moagem tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores desde o século XIX, iniciando-se com Rittinger e Kick. Mais recentemente, outras técnicas, envolvendo modelagem matemática do processo têm sido aplicadas com sucesso. O material em estudo é um minério de ferro itabirítico da região de Morro do Pilar. Foram estudadas as etapas de moagem primária e remoagem. Diferentes metodologias foram utilizadas para determinação do consumo específico de energia na moagem primária, além da determinação dos parâmetros de quebra e seleção para diferentes colares de corpos moedores e otimização do circuito pré-dimensionado. Os resultados indicaram um consumo específico de energia pequeno para o minério em questão. Além disso, o teste de *WI* de Bond, com escalpe inicial na malha de controle, apresentou valores mais próximos do valor simulado.

Palavras-chave: Moagem; Modelos energéticos; Modelo do balanço populacional.

ENERGY CONSUMPTION OF PRIMARY GRINDING OF A ITABIRITE IRON ORE FROM MORRO DO PILAR REGION

Abstract

Determining energy consumption and the mill scale-up has been target of the scientists since the XIX century, starting with Rittinger and Kick. Recently, techniques involving mathematical modeling have been successfully applied to both processes. The material for our study is an itabirite iron ore from Morro do Pilar region. The primary grinding and the regrinding stages were the focus of our study. Several methodologies have been used in order to determine the primary grinding energy consumption, as well as determining the selection and breakage parameters for different grinding media and the optimization of the pre-designed circuit. The results indicated small specific energy consumption for the iron ore used in our study. Besides, the Bond Work Index in the absence of the initial fines presented values closer to those achieved in the simulation.

Keywords: Grinding; Energetic models; Population balance model.

- ¹ Engenheira Metalurgista, Doutoranda em Tecnologia Mineral, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ² Engenheiro de Minas, PhD, Professor da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte
- ³ Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

1 INTRODUÇÃO

A metodologia de Bond (1952) tem sido largamente aplicada para o dimensionamento de moinhos revolventes. Quando não aplicada com critério, ela pode induzir a erros, principalmente quando as características granulométricas dos minérios fogem às usuais. Bond e posteriormente Rowland procuraram corrigir algumas dessas discrepâncias introduzindo fatores de correção específicos para as baixas relações de redução e, também, para moagens de minérios nas faixas granulométricas mais grosseiras ou mais finas. Alguns minérios itabiríticos brasileiros situam-se nestas faixas críticas apresentando redução menor do que 6 e W_i inferior a 7 kWh/st. Para esses minérios, a determinação do W_i torna-se mais crítica que para os minérios que apresentam alta relação de redução e valores de W_i superiores a 10 kWh/st.

Como uma alternativa à condução do teste de Bond, Bergstrom (1985) recomendou que, quando a % passante de material na malha controle, A_m , da amostra “natural” britada a 3,35 mm for superior a 28%, o ciclo do ensaio padrão de Bond deve ser conduzido sem moagem, descartando o material passante e incorporando a alimentação nova correspondente até que o material composto para o ciclo possua % passante maior que 28%. Essa metodologia alternativa deveria conduzir a resultados idênticos para moabilidade das amostras, o que não foi identificado por Tavares et. al (2012).

TAVARES et al. (2012) ainda apresentam uma comparação entre os valores de work index obtidos pelos diferentes métodos, com e sem remoção parcial de finos, e o W_i operacional calculado através de simulação. Os resultados apontaram que o W_i operacional apresentou valores mais próximos daqueles obtidos com o procedimento com remoção parcial dos finos.

SILVA (2011) apresentou um estudo sobre a aplicação de uma equação alternativa proposta por Bond para o cálculo onde o minério possui excesso de finos naturais, na qual apresenta F80 muito pequeno e a razão de redução é menor que 6:1. A equação alternativa é apresentada abaixo:

$$W_{i_{mob}} = \frac{16}{M_{ob}^{0,82}} \times \sqrt{\frac{A_m}{100}} \quad (1)$$

Este estudo determinou que a utilização da equação alternativa proposta por Bond (1960) resulta em valores suficientemente próximos daqueles calculados pela equação convencional, porém mais próximos dos esperados e encontrados na literatura, determinando que em amostras onde a geração de finos na preparação do material é inevitável e proveniente das características físicas do mesmo, a utilização da equação alternativa é adequada para o cálculo do W_i de Bond.

Como uma alternativa aos métodos empíricos, tem-se desenvolvido métodos baseados na cinética de fraturamento das partículas. O modelo do balanço populacional tem sido utilizado não somente para dimensionamento de moinhos como também verificar a influência da distribuição granulométrica, a variação da distribuição granulométrica do produto com os parâmetros operacionais, a influência da eficiência de classificação, etc (Austin, 1983).

Neste trabalho realizou-se as metodologias citadas, com intuito de verificar qual seria a energia consumida no processo de moagem primária. Foram utilizadas condições previamente determinadas de um projeto de engenharia para o minério específico. Foram então consideradas: moagem a úmido, circuito fechado, alimentação de 9200 t/h e consideram-se um $P_{80} = 90 \mu\text{m}$ e $F_{80} = 8000 \mu\text{m}$.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma amostra de minério de ferro itabirítico foi homogeneizada e quarteada para os diferentes testes descritos a seguir. Os experimentos foram realizados no laboratório de Tratamento de Minérios da UFMG.

2.1 Método de Bond

O moinho utilizado nos testes deve ter um diâmetro interno de 305 mm e 305 mm de comprimento sem aletas, liso e com bordas arredondadas. Também é recomendável, a utilização de moinhos fabricados com aço ASTM-A36, conforme indicado por Alves (2007).

A carga de bolas consiste em um número específico de bolas, pesando aproximadamente 20,125 kg, massa específica de 7,83 g/cm³, com diâmetros variando entre 15,9 a 36,5 mm. A velocidade de rotação do moinho é igual a 70 rpm. A moagem é conduzida, a seco, em circuito fechado, com a carga circulante de 250%, quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio.

Tabela 1. Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora, utilizadas no teste de moabilidade.

Número de Bolas	Diâmetro (mm)
43	36,5
67	30,2
10	25,4
71	19,1
94	15,9

A amostra é britada em 3,35 mm. Para diminuir a produção de finos, é recomendável que a britagem seja realizada em etapas cuidadosas, estagiadas, incluindo a utilização de britador de rolos. A preparação da alimentação para o teste deve-se realizar em circuito fechado com peneira de 3,35 mm para minimizar a produção de finos (Sampaio *et al.*, 2007).

A metodologia do teste completo de Bond utilizada neste trabalho é descrita na norma ABNT MB-3253, registrada no INMETRO como NBR 11376.

Além da metodologia padrão citada acima, também foi realizado teste com a amostra escalpada na malha de 0,15 mm.

2.3 Método baseado a partir do modelo do balanço populacional

Foram realizados ensaios em batelada com diferentes tempos, executando-se análises granulométricas completas dos produtos.

A energia consumida no moinho, é medida através de um aparato para medição do torque e da velocidade de rotação.



Figura 1. Moinho de laboratório com sensor de torque - Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas - UFMG.

Na tabela 2 são apresentadas as condições e parâmetros do moinho de torque do DEMIN-UFMG.

Tabela 2. Condições do Moinho de Torque

Diâmetro Interno (m)	0,456
Comprimento Interno (m)	0,36
% Velocidade Crítica	73
Dens. Aparente das bolas (t/m ³)	4,56
Velocidade (rpm)	47,6
Volume do moinho (m ³)	0,0598
Massa de Minério (kg)	18,18
Massa de Bolas (kg)	88,76

A partir dos resultados obtidos em laboratório de energia e granulometria, pode-se estimar os parâmetros das funções quebra e seleção para a simulação através do aplicativo Moly-Cop Tools.

A metodologia é descrita em Mazzinghy (2009) e mais detalhada em Austin(1983) e Herbst&Fuerstenau (1980).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Método de Bond

O valor encontrado para a amostra de itabirito do Work Index de Bond a partir do teste padrão foi de 10,1 kWh/t.

A partir do resultado do teste de laboratório, realiza-se o *scale-up* para a escala industrial em função dos valores de F_{80} e P_{80} industrial, citados anteriormente.

O *scale-up* serve apenas para o moinho industrial de referência utilizado por Bond no desenvolvimento das suas equações (2,4 m de diâmetro interno, e 2,4 de

comprimento, 250% carga circulante, etc.). Para sistemas diferentes de geometria e operação do moinho projetado existem fatores de eficiência (ou de ineficiência) que ajustam o consumo específico de energia conforme Rowland (1980).

O consumo específico de energia de moagem é então, calculado pela equação:

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \times EF_i \quad (2)$$

Os fatores de eficiência considerados para o projeto são apresentados na tabela 3:

Tabela 3. Fatores de eficiência de Rowland (1980).

EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8	EF _i
1,000	1,000	0,914	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	0,912

Aplicando-se todos os fatores de eficiência conforme descrito em Beraldo (1985), considerando moagem a úmido, circuito fechado, alimentação de 9200 t/h e considerando-se um P80= 90 µm e F80=8000 µm, obtém-se uma energia requerida para a moagem de 8,68 kWh/t.

Também foi realizado o teste de WI de Bond com a amostra escalpada em 0,15 mm. O procedimento é citado por Bergstrom (1989) como uma alternativa para os minérios mais friáveis. Conforme o autor, para minérios com porcentagens iniciais de finos maiores que 28% adota-se o procedimento de escalpe.

Para o procedimento com escalpe dos finos naturais o valor encontrado do WI de Bond é de 5,2 kWh/t. Sendo assim, o consumo específico de energia para este caso seria de 4,47 kWh/t.

Na tabela 3 é apresentado o resumo para WI realizado com procedimento padrão e com a alimentação com escalpe, além disso, foi calculado o WI para ambas as amostras utilizando a equação 1, que não requer o uso de valores relacionados a granulometria.

Tabela 4. Resumo resultados WI padrão e WI com escalpe

	% Passante Inicial (0,150 mm)	Mob (g/rot)	F80	P80	WI (kWh/t)	WI _{mob} (kWh/t) Eq. 1
WI Padrão	55,31	5,03	417	125	10,1	5,21
WI com Escalpe	0	5,64	2673	122	5,2	4,74

Os valores de WI de Bond utilizando a equação 1 apresentaram valores mais próximos ao valor encontrado na amostra escalpada.

3.2 Método baseado a partir do modelo de balanço populacional

Com a informação obtida em cada ensaio se realiza um ajuste ao modelo cinético de moagem. A tabela 4 apresenta os parâmetros cinéticos da amostra estudada.

O aplicativo Moly-Cop Tools utiliza diferentes letras para nomear os parâmetros das funções seleção e quebra. As letras normalmente utilizadas para descrever estes parâmetros estão entre parênteses.

Tabela 4: Parâmetros da função seleção e quebra.

Função Seleção				Função Quebra		
α_0 (a)	α_1 (α)	α_2 (Λ)	$D_{\text{crítico}}$ (μ)	β_0 (Φ)	β_1 (γ)	β_2 (β)
0,00043	1,299	2,47	9957	0,04309	0,488	3,914

Para a realização da simulação foram utilizados os valores padrões para os parâmetros de classificação.

Foram utilizados dados dos equipamentos com um pré-dimensionamento através do método de Bond, como normalmente realizado por empresas de engenharia. A partir deste cenário base, pôde-se simular e otimizar o circuito de moagem de bolas.

A figura abaixo apresenta os resultados do circuito otimizado.

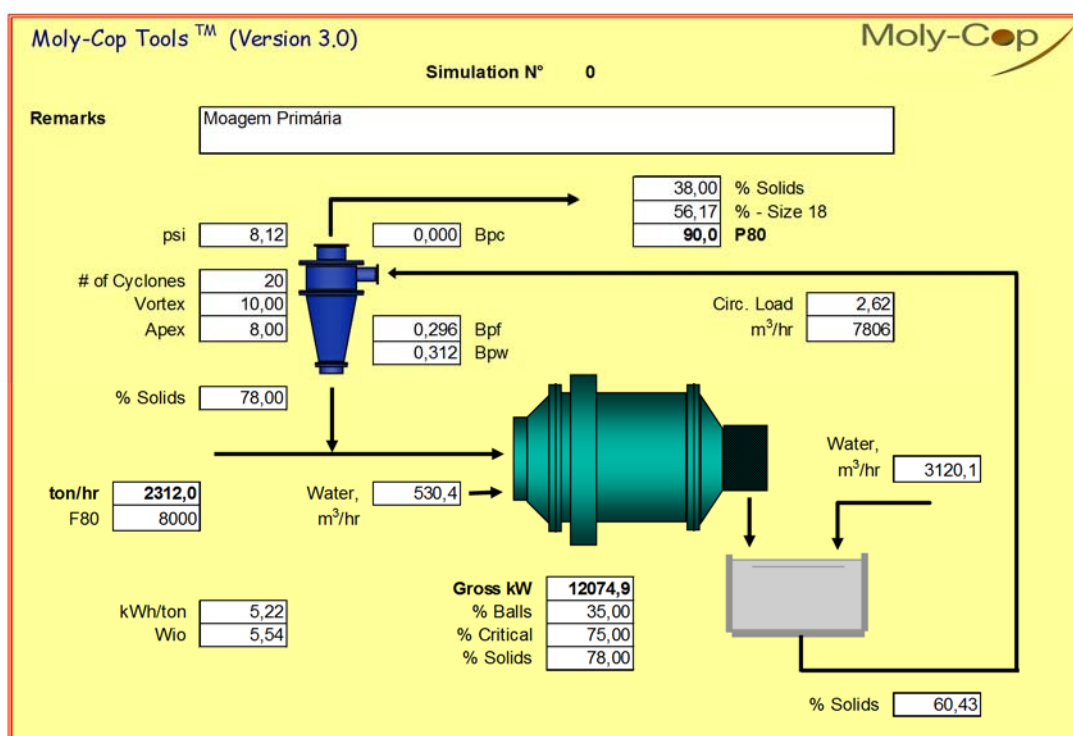


Figura 3. Simulação do circuito de moagem.

A simulação que atingiu um P80=90,0 μm apresentou um consumo específico de energia muito baixo, apenas 5,22 kWh/t, com carga circulante de 262 e by-pass de finos de aproximadamente 30%.

4 CONCLUSÃO

- ✓ Considerando o escalpe dos finos no método de Bond o valor de consumo específico de energia cai de 8,67 para 4,47 kWh/t para esta amostra.
- ✓ A metodologia de Herbst e Fuerstenau apresentou consumo específico de energia 67% menor que o determinado pelo método de Bond padrão
- ✓ O W_I de Bond com alimentação escalpada em 0,15 mm e o $W_{I_{\text{mob}}}$ foram os que apresentaram valores mais próximos ao obtido na simulação

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa de pós graduação em engenharia metalúrgica, materiais e de minas e à CAPES/CNPQ/FAPEMIG pelo apoio ao PPGEM.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Moinho de bolas, determinação do índice de trabalho: NBR 11376. Rio de Janeiro, 1990.
- 2 Alves, V.K. Estudo de Avaliação dos parâmetros que influenciam de maneira significativa nos resultados de ensaio de Wi de Bond. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, organização. Proceedings do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios; 2007 Nov 20– 24; Ouro Preto, Brasil. Vol 1, p. 151–156.
- 3 BERGSTROM, B. H. Crushability and Grindability. In SME Minerals Processing Handbook, edited by N.L. Weiss. SME Inc., Littleton, 1985, pp. 30-65-68.
- 4 SILVA, Diogo Souza Figueiredo. Uma revisão do método de cálculo do Work Index de Bond para minérios com excesso de finos naturais. Belo Horizonte, Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- 5 TAVARES, L. M. M.; CARVALHO, R. M.; ALVES, V. K.; LIMA, N. On the Design of Ball Mills for Grinding Itabirite Ores. In: 13o Seminário Brasileiro de Minério de Ferro. 2012, Rio de Janeiro, Brasil, p.742-752.
- 6 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.
- 7 Mazzinghy, D. B. Modelagem e Simulação de Circuito de Moagem Através da Determinação dos Parâmetros de Quebra e da Energia Específica de Fragmentação, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, CPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- 8 Rowland, C.A., Kjos, D.M., Rod and Ball Mills. Mineral Processing Plant Design, 2nd edition. (A.L. Mular and R.B. Bhappu, eds), SME Littleton, CO, p.239. (1980)