

DETERMINAÇÃO DE ÍNDICE DE TRABALHO PELO MÉTODO SIMPLIFICADO

Hedda Vargas Figueira*

Luiz Roberto Moura Valle**

Luiz Antonio Pretti**

* Eng. do CETEM

** Alunos da Escola de Engenharia da U.F.R.J.

1. INTRODUÇÃO

A determinação de uma relação que permitisse o cálculo da energia necessária à fragmentação de um material e tornasse possível o dimensionamento de sistemas de moagens industriais, há muito tempo interessa ao cientista e ao técnico.

Em todos os estudos feitos, estabeleciam-se relações matemáticas simples, a partir de observações experimentais, correlacionando o produto com a energia fornecida para a moagem.

De todas as teorias enunciadas, a mais utilizada para dimensionamento de equipamentos industriais é a postulada por Bond⁽¹⁾, que estabeleceu que a energia necessária para a fragmentação de uma massa de material homogêneo é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas moídas. A expressão por ele formulada é a seguinte:

$$W = 10 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

onde:

F: abertura da tela, em micrômetros, que permite a passagem de 80% da alimentação

P: abertura da tela, em micrômetros, que permite a passagem de 80% do produto

W: energia efetiva para moer 1 tonelada curta do material (kWh)

W_i: índice de trabalho, específico do material

O W_i é calculado, geralmente, a partir do índice de moabilidade, determinado em laboratório num moinho padrão e em condições padronizadas⁽²⁾. O índice de moabilidade (Mob) corresponde à massa em gramas de produto gerada em cada rotação do moinho (g/rot), simulando um circuito fechado.

O valor de W_i é calculado pela seguinte fórmula:

$$W_i = \frac{44,5}{(Am)^{0,23} Mob^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)}$$

Am: abertura da malha teste em μm

Mob: índice de moabilidade

O W_i, determinado em ensaios de laboratório, se aplica para a grande maioria dos circuitos de moagem. O uso de alguns fatores desenvolvidos por Rowland⁽³⁾ corrige o valor da potência calculada em função de condições específicas de cada caso.

2. OUTROS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE W_i

A determinação do W_i pelo método de Bond, além de exigir um moinho padrão, é uma determinação trabalhosa e demorada, e por isso mesmo sujeita a muitos erros.

Em alguns projetos, teve-se ocasião de verificar que os valores de W_i obtidos em vários laboratórios eram bastante discrepantes, apesar de todos seguirem as normas de Bond.

A dificuldade de se obter a carga de bolas exatamente igual à recomendada, a determinação da densidade aparente do minério, e a análise granulométrica com seus problemas inerentes (finos, umidade, etc.), parece ser a causa destas discrepâncias.

Está sendo estudada uma proposta de Norma Técnica numa tentativa de se estabelecerem regras bem claras para a determinação de W_i . As determinações realizadas neste trabalho já obedecem à metodologia descrita nessa proposta de Norma.

Vários autores⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ têm estudado métodos simplificados que sejam de mais fácil execução e que dispensem o moinho padrão.

O método desenvolvido por Berry e Bruce⁽⁴⁾ requer o uso de um minério referência, com Índice de Trabalho conhecido, e que possua uma distribuição granulométrica semelhante à do minério testado, mas não exige moinho especial.

Jauregui⁽⁶⁾, no seu trabalho, usou um moinho comum de laboratório para determinação do W_i , mas o seu método não necessita de minério referência para cada determinação; no seu procedimento, ele calibrou um moinho de laboratório, usando vários minérios com o W_i determinado pelo método de Bond. A base do método é o cálculo de um W_i operacional de bancada, que é suposto ser relacionado diretamente ao W_i determinado pelo procedimento padrão. Quando uma mesma distribuição granulométrica da alimentação é usada para diferentes minérios, e a mesma energia específica é alimentada, a dificuldade de quebra de cada mineral será refletida no afastamento das curvas de distribuição granulométrica do produto e da alimentação.

Desde que o teste de bancada seja feito sob condições bem controladas, obtém-se boa reprodutibilidade.

3. MÉTODO SIMPLIFICADO DE DETERMINAÇÃO DE W_i

Neste trabalho, estudou-se o comportamento de alguns minérios submetidos a moagem em moinho de bolas de laboratório. Através de curvas de moagem, determinaram-se os W_i operacionais que, comparados com os W_i de Bond, também determinados, permitiram o cálculo de um fator de correção que capacita esse moinho para determinações de W_i de qualquer outro minério.

3.1. - Aparelhagem Utilizada

Usou-se para estes estudos um moinho cilíndrico de 17,1cm de comprimento por 19,5 de diâmetro interno, com uma carga de 143 bolas de aço pesando 12,6kg e obedecendo à seguinte distribuição:

Nº DE BOLAS	TAMANHO EM POLEGADAS	PESO EM QUILOGRAMAS	% PESO
53	1 1/4	6,78	53,8
75	1	5,08	40,3
15	7/8	0,74	5,9

O moinho é apoiado nos cilindros de uma unidade motora, que é constituída de três cilindros paralelos, sendo que o central é o que têm movimento, ligado que está ao eixo de um motor de 1/4 de HP. A velocidade usada nos testes foi de 89rpm, o que representa 93% da velocidade crítica.

3.2. - Preparo das Amostras

As amostras para os testes eram cominuídas em britadores até passarem todas numa peneira de 10 malhas. O material menor que 100 malhas era retirado por peneiramento a úmido, já que a quantidade de de finos, que reste contaminando a amostra, prejudica enormemente a precisão do método.

3.3. - Testes de Moabilidade

O moinho é alimentado com 1 quilograma de material preparado como descrito anteriormente. A moagem é feita a úmido, com uma percentagem de sólidos de 50% e durante 10 minutos.

No produto moído, é realizada uma análise granulométrica cujos resultados devem ser colocados em gráfico, a fim de se determinar a abertura da malha na qual passam 80% do produto, o denominado P₈₀.

Este procedimento foi repetido para sete minérios, para os quais também se determinou o Wi de Bond.

3.4. - Determinação do Fator de Calibração

Se o Wi de Bond é suposto ser proporcional ao Wi operacional de bancada, teremos:

$$W_i = k \cdot W_{ip} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad (1)$$

k = constante de proporcionalidade

W_{ip} = Wi operacional de bancada

Por outro lado, o W_{ip} pode ser calculado através da energia E_p fornecida durante um teste, empregando-se a Lei de Bond:

$$W_{ip} = \frac{E}{10}$$

Substituindo em (1) o valor de W_{ip} , teremos:

$$W_i = \frac{kE}{10} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1}$$

$$\text{ou } W_i = K \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1}$$

O valor do K poderá ser determinado desde que se tenham alguns valores do W_i de Bond e algumas determinações de P_{80} da alimentação e do produto obtido no moinho que se deseja calibrar.

Calculado o K, o moinho poderá ser utilizado para determinações de W_i , rápidas e usando pouca amostra.

Para o moinho usado neste trabalho, calculou-se o K através de determinações do W_i , pelo método de Bond, de sete minérios referidos na Tabela 1, dos quais também foram feitas as curvas de moagem.

AMOSTRA	MINÉRIO	PROCEDÊNCIA
1	Oxidado de zinco (calamínico)	Mineração Areiense S.A.
2	Oxidado de zinco (wilemítico)	Mineração Areiense S.A.
3	Itabirito	C. V. R. D.
4	Polissulfetos auríferos	Vale do Ribeira
5	Sulfetado de cobre	C. V. R. D. (Carajás)
6	Sulfetos auríferos	Itapetim (PE)
7	Quartzo aurífero	MIBASA

Tabela 1 - Minérios usados para calibrar o moinho

Os dados obtidos, nas determinações experimentais, feitas para estes minérios, encontram-se na Tabela 2.

O valor de K foi calculado a partir da fórmula fornecida por Jauregui⁽⁶⁾, com os dados obtidos. A fórmula é a seguinte:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1}_j}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-2}_j}$$

O valor do W_i simplificado é facilmente calculado pela expressão $W_{is} = \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1}$

O valor de K determinado para o moinho usado, foi:

$$K = 0,4755 \text{ kWh/t}$$

AMOSTRA	P (μm)	F (μm)	Wi BOND (kWh/t)	Wi SIMPLIFICADO	ERRO (%)
1	210	1050	12,89	12,47	3,26
2	350	1175	19,42	19,58	-0,82
3	125	1200	7,82	7,85	-0,38
4	270	1075	15,71	15,66	0,32
5	315	1500	15,44	15,58	-0,9
6	260	1250	14,33	14,10	1,61
7	340	1150	19,02	19,22	-1,05

Tabela 2 - Resultados das determinações experimentais.

Testou-se o uso do moinho calibrado determinando-se o Wi de alguns minérios em estudo no CETEM, e os resultados foram os da Tabela 3. Um dos empregos vantajosos deste método é a possibilidade de determinar o Wi com um (1) quilograma de amostra permitindo determinações em testemunhos de sondagem de vários locais da jazida.

MINÉRIO	Wi _B kWh/t	Wi Bond
Sulfetado de níquel e cobre (testemunho de sondagem)	16,53	-
Sulfetado de níquel e cobre (trincheira)	20,1	20,2
Calcário	11,28	11,9

Tabela 3 - Minérios testados

4. DETERMINAÇÃO DO Wi DE REMOAGEM

A determinação do Índice de Trabalho com a finalidade de fornecer dados para o dimensionamento de moinhos para remoagem constitui um problema, já que não é possível calculá-lo com a metodologia de Bond, devido à granulometria fina da alimentação.

Alguns autores têm desenvolvido métodos que, usando a equação de Bond, permitam o cálculo do Wi na faixa de tamanho necessária para remoagem.

Destes métodos o mais empregado é o Berry e Bruce, que usa os valores de P₈₀ do minério como sendo do material a ser remoido. Esses valores são obtidos das curvas de moagem, determinando-se graficamente o tamanho do minério moído. Relacionando, os tamanhos da alimentação e do produto moído, e do material de remoagem e também o Wi do minério, obtém-se o valor do Wi de remoagem.

Neste trabalho procurou-se estudar uma metodologia que permitisse usar o moinho calibrado para determinar o Wi de remoagem.

4.1. - Metodologia Desenvolvida

O material de alimentação para os testes foi preparada fragmentando-se a amostra em tamanho menor que 65 malhas, e removendo-se, por peneiramento a úmido, o material menor que 200 malhas.

Utilizou-se o moinho calibrado, a mesma carga de bola, a mesma velocidade e a mesma percentagem de sólidos usados nos testes de W_i simplificado.

Foram feitos testes de moagem para os seguintes tempos: 15, 20, 30 e 40 minutos.

A análise granulométrica dos produtos, colocados em gráfico, permite as determinações dos tamanhos dos produtos (P_{80}). Utilizando-se, os valores de F e P, obtidos nos diversos períodos de moagem, e o valor K, obtido na calibração do moinho, pode-se calcular os valores de W_i para cada tempo de moagem.

Repetindo-se este procedimento para vários minérios, estabeleceu-se que o tempo de moagem para determinar o W_i , com malha teste de $105\mu\text{m}$ (150 malhas), era de 30 minutos.

4.2. - Resultados Obtidos

Compararam-se os valores obtidos neste estudo com os determinados pelo método de Berry e Bruce, e os resultados foram bastante semelhantes, como se pode ver na Tabela 4.

MINÉRIO	W_{ic} kWh/t	W_{is} kWh/t
Quartzo aurífero e sulfeto	15,2	14,8
Quartzo aurífero	19,3	17,3
Calcário	12,7	12,3

Tabela 4 - W_i de remoagem determinado pelo método de Berry e Bruce (W_{ic}) e pelo método estudado (W_{is}).

5. CONCLUSÕES

O método estudado neste trabalho apresenta algumas vantagens, que devem ser lembradas:

- Um moinho cilíndrico de laboratório pode ser calibrado com minérios de W_i conhecidos, e depois servir para determinações de W_i de outros minérios, sem necessitar de material de referência.
- A determinação feita neste moinho calibrado é mais rápida do que a determinação pelo método de Bond.
- O moinho calibrado necessita somente de dois quilogramas de amostra para a realização das determinações. Isto permite o uso de testemunhos de sondagem para determinação do W_i .

- O W_i de remoagem pode ser realizado neste moinho calibrado, desde que se use metodologia adequada.

6. BIBLIOGRAFIA

1. BOND, FRED C. The third theory of comminution. *Mining Engineering*, May, 1952, p. 484-494.
2. BOND, FRED C. *Crushing and grinding calculations*. Allis Chalmers Jan. 1961.
3. ROWLAND, A.C. & KJOS, D.M. rod and ball mill. In: Mular, Bhappu Ch.12 p. 239 2nd Edition. Mineral Processing Plants Design.
4. BERRY, T.F & BRUCE, R.W. A Simple Method of determining the grindability of ores. *Canadian Mining Journal*, v. 87 p. 63-65, 1966.
5. KAPRR, P.C. Analysis of the Bond grindability test. Trans. IMM, v. 79, p. 103-108, 1970.
6. JAUREGUI, R.O. In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, I, Anais. v. 1, p. 358, 1982.
7. MARTINS, M.A. Determinação de W_i pelo método direto, comparativo e comparativo de remoagem. In: ENCONTRO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, p. 145, 1984.

MINÉRIO	W _i (Método Direto)	W _i (Método Comparativo)
Quartzo	1,72	1,72
Quartzo	1,72	1,72