

CAPÍTULO 10 – DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO ÍNDICE DE TRABALHO (WI)

Carla Napoli Barbato

Engenheira Química - Universidade Federal Fluminense, Mestre
em Engenharia de Materiais e Metalúrgica/COPPE-UFRJ
Doutoranda em Engenharia Química/EQ-UFRJ

João Alves Sampaio

Engenheiro de Minas/UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem o objetivo de descrever os procedimentos para se determinar o índice de trabalho (WI) para minérios ou materiais sujeitos a processos de moagem em moinhos de bolas, segundo a terceira lei da cominuição, formulada por Bond.

O índice de trabalho (WI) corresponde, numericamente, à energia total, expressa em kWh por tonelada curta (907 kg), necessária para reduzir o minério, desde um tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 106 μm (Figueira *et al.*, 2004). O WI corresponde à resistência do minério à moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível calcular a energia (kWh/t) necessária para moer o minério a uma determinada granulometria, além de ser um parâmetro importante para o dimensionamento de moinhos de bolas (Herbst *et al.*, 2003).

A lei de Bond estabelece que a energia necessária para fragmentar uma massa unitária de um minério homogêneo é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas (Barrat e Sherman, 2002). A Equação 1 é a expressão matemática da lei de Bond.

$$W = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad [1]$$

onde:

W energia em kWh para moer uma tonelada curta do minério;

WI índice de trabalho (*work index*);

P abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passam 80% da massa do produto;

F abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

Os ensaios para determinar o WI, em laboratório, são conduzidos em um moinho padrão, usado para essa finalidade, cujo desenho esquemático, bem como o diagrama do circuito fechado encontra-se na Figura 1 (ABNT – NBR 11376). O moinho possui diâmetro e comprimento iguais a 12 polegadas e opera com 70 rpm. A sua carga moedora consiste de 285 bolas de aço, pesando 20,125 kg e massa específica de 7,83 g/cm³, conforme distribuição da Tabela 1. A moagem é conduzida, a seco, em circuito fechado, com a carga circulante de 250%, quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio.

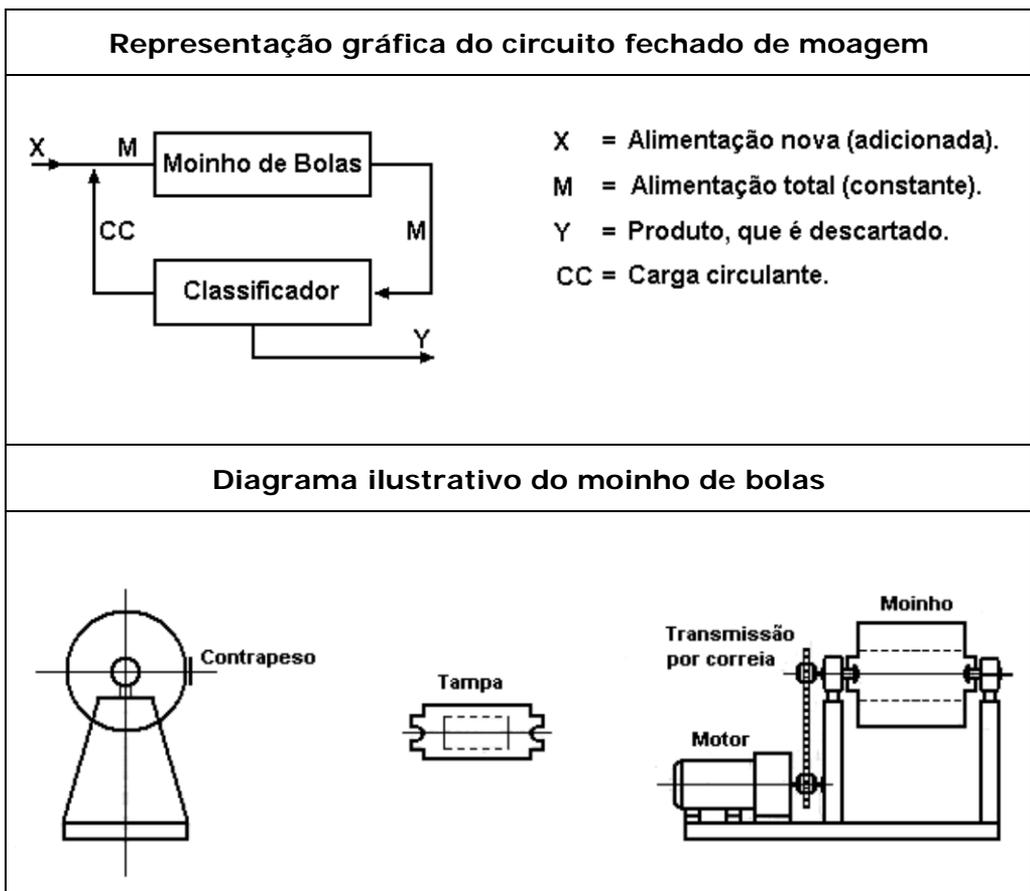


Figura 1 – Representação gráfica do moinho de bolas usado nos testes e diagrama esquemático do circuito fechado de moagem.

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

Quando o circuito atinge o estado de equilíbrio, isto é, a carga circulante torna-se constante e igual a 250%, pode-se escrever as relações abaixo, com base no diagrama esquemático da Figura 1.

$$M = X + CC \quad [2]$$

$$M = Y + CC \quad [3]$$

No regime, tem-se: $X = Y$

Como a carga circulante é de 250%, tem-se: $CC/X = 2,5 \rightarrow CC = 2,5X$

Substituindo o valor de CC em (3):

$$M = Y + 2,5X, \text{ como: } X = Y, \text{ quando o circuito entra em regime} \quad [4]$$

$$\text{Vem: } M = 2,5Y + Y \text{ ou } Y = M/3,5 \quad [5]$$

O valor de Y é a massa que deve ser adicionada ao sistema (AAR), a cada ciclo, durante a realização do teste.

A determinação do WI pode ser feita pelo método direto ou comparativo. O método direto é utilizado para minério *in natura* e com a granulometria entre 3,327 mm e a malha teste, seguindo as normas estabelecidas por Bond. O método comparativo é utilizado para determinar o

WI de minérios ou pré-concentrados que devem ser remoídos. Esse método se baseia no WI de um minério conhecido, denominado material de referência (Mosher e Bigg, 2002). Neste capítulo, será descrito apenas o procedimento experimental para o método direto.

2. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

Para realização do teste de moabilidade, sempre feito em duplicata, precisa-se de 15 a 30 kg do minério a ser estudado. No caso de minérios com elevada percentagem de finos, isto é, a fração granulométrica abaixo da malha do teste, há necessidade de uma amostra entre 25 a 30 kg ou mais. Em resumo, os minérios friáveis e compactos exigem maior e menor quantidade de amostra, respectivamente.

No CETEM os ensaios são realizados segundo o procedimento descrito neste capítulo de acordo com a norma (ABNT-NBR 11376).

Para uma melhor compreensão do procedimento do ensaio é necessário o uso da Tabela 2, cujo preenchimento é feito ao longo de todo ensaio, de acordo com os passos a seguir.

Passo 1

Britar, aproximadamente, de 15 a 30 kg de minério, em circuito fechado, com peneira de 3,327 mm, para minimizar a produção de finos. Homogeneizar a amostra global em pilha prismática, da qual serão retiradas alíquotas para serem realizados os ensaios.

Passo 2

Retirar da pilha de homogeneização uma quantidade suficiente de minério e colocar na proveta graduada de 1 L. Compactar levemente o material, batendo o fundo da proveta em uma superfície revestida de borracha, repetindo a operação com adição de minério até completar o volume de 700 mL e, em seguida, pesar esse volume do minério. Repetir a operação por três vezes. Considerar o peso médio das amostras como o peso da alimentação (M).

Passo 3

Proceder à análise granulométrica da alimentação segundo a série Tyler $\sqrt{2}$, com o material britado abaixo de 3,327 mm, até a malha teste, 104 μm (0,104 mm). Na Tabela 3 constam os resultados da análise granulométrica relativa à alimentação do ensaio de moabilidade para a amostra original do pegmatito da região Borborema-Seridó. Plotar, em gráfico log-log, a porcentagem passante no eixo das ordenadas e as aberturas (μm) das peneiras no eixo das abscissas. Determinar, nesse gráfico, a abertura da peneira (μm) pela qual passa 80% da massa da alimentação, Figura 2.

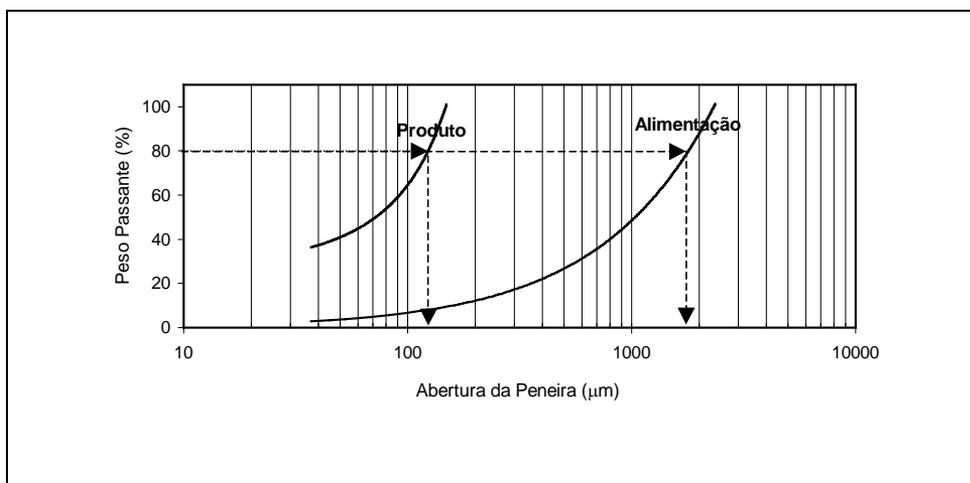


Figura 2 – Curva de distribuição granulométrica da alimentação e do produto final resultante da moagem em moinho Bond, para determinação do WI, utilizando os resultados da Tabela 3.

Passo 4

Determinar, por peneiramento, a massa passante em A_m , ou seja, abertura da malha de classificação que, no presente exemplo, é 74 μm . Este é o passante do primeiro ciclo, denominado de MA_1 (coluna 3), que corresponde à fração com granulometria abaixo da malha teste, contida na alimentação.

Passo 5

Carregar o moinho com a carga de bolas descrita na Tabela 1 e com a quantidade de minério calculado no **Passo 2**. No primeiro ciclo, moer por um número definido de rotações, por exemplo, 100 ou 200, dependendo das características do minério quanto à moagem.

Passo 6

Descarregar o moinho (minério e bolas) no recipiente apropriado. Em seguida procede-se ao peneiramento do minério moído para determinar a massa retida na malha do teste $(MAP)_i$ (coluna 4), a massa passante $(MAP)_i$ (coluna 5), bem como, a massa líquida de passante $(MAL)_i$ (coluna 6). Para tanto, recomenda-se o uso de peneiras de alívio e a leitura do Capítulo 3 deste livro sobre peneiramento. A massa de minério passante $(MAP)_i$ pode ser calculada por diferença entre a alimentação e o retido ou pesando-a diretamente. A massa líquida passante $(MAL)_i$ é obtida pela diferença entre os valores contidos nas colunas 4 e 5. A alimentação nova corresponde, em peso, à fração passante (Am) , porém é retirada da pilha de homogeneização e adicionada ao moinho com a fração retida na peneira do teste, $(MAR)_i$ para o próximo ciclo da moagem (coluna 5). Cabe lembrar que a fração passante na malha do teste é descartada do circuito e, quando ela for igual a alimentação nova, o sistema está em equilíbrio.

Passo 7

Para obter o passante líquido gerado no ciclo i (coluna 6) subtraia MA_i (coluna 3) de $(MAP)_i$ (coluna 5), ou seja, $(MAL)_i = (MA)_i - (MAP)_i$.

Passo 8

Recompôr a alimentação para o ciclo seguinte adicionando à massa retida uma massa igual a $(MAP)_i$ (coluna 5).

Passo 9

Calcular a massa passante em Am , contida na alimentação nova, com base na análise granulométrica, determinada no terceiro passo. Este é o valor de $(MA)_{i+1}$ (coluna 3).

Passo 10

Calcular o valor de AAR, usando a expressão da Equação 6, isto é, $Y = M/3$. No presente caso:

$$\text{AAR} = \frac{\text{Alimentação Inicial}}{1 + \text{Carga Circulante}} = \frac{\text{Alimentação Inicial}}{3,5} \quad [6]$$

Passo 11

Para obter o valor do desvio (coluna 7) correspondente ao ciclo i , deve ser calculada a diferença entre o valor de $(\text{MAP})_i$ (coluna 5) e valor de AAR.

Passo 12

A moabilidade (coluna 8) é obtida pela divisão do valor do passante líquido, gerado no ciclo correspondente (coluna 6), pelo respectivo número de rotações em cada ciclo (coluna 2), ou seja, $\text{Mob} = (\text{MAL})_i \div (\text{NR})$.

Passo 13

Carregar novamente o moinho e calcular o número de rotações (NR) para o ciclo seguinte (coluna 2), com base na Equação 7, e realizar a moagem com este número de rotações calculado.

$$N_R = \frac{\text{AAR} - (\text{MA})_{i+1}}{\text{Mob}} \quad [7]$$

Passo 14

Repetir as operações descritas nos passos 6 a 13 até que os valores de moabilidade (coluna 8) atinjam o equilíbrio ou invertam a tendência de crescimento ou decréscimo, em três ciclos. A verificação do equilíbrio é realizada por meio do cálculo da média aritmética dos três últimos valores do Mob. A diferença entre o maior e o menor valor do Mob não poderá superar 5% em relação ao valor médio (ABNT – NBR 11376).

Passo 15

Realizar a análise granulométrica da fração passante em Am do último ciclo, quando o equilíbrio for alcançado.

Na Tabela 3 constam os resultados da análise granulométrica relativa ao produto do ensaio de moabilidade para a amostra original do pegmatito da região Borborema-Seridó.

Plotar, num gráfico log-log, conforme Figura 3, os valores das porcentagens passantes no eixo das ordenadas e a abertura (μm) das peneiras no eixo das abscissas. Determinar a abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto.

Passo 16

Calcular o valor de WI com base na Equação 8

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} \times Mob^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \times 1,1 \quad [8]$$

onde:

- Am abertura da malha de classificação do ensaio (μm);
- WI índice de trabalho para moagem (kWh/t);
- P abertura da peneira pela qual passam 80% da massa dos produtos em μm ;
- F abertura da peneira pela qual passam 80% da massa da alimentação em μm ;
- Mob média dos três últimos valores do índice de moabilidade no estado de equilíbrio, 2,17 no presente caso;
- 1,1 fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica.

No caso da amostra original do pegmatito da região Borborema-Seridó foi obtido o seguinte valor de WI, segundo os cálculos a seguir:

$$WI = \frac{44,5}{147^{0,23} \times 2,17^{0,82} \times 10 \times [125^{-0,5} \times 1875^{-0,5}]} \times 1,1$$

$$WI = 12,41 \text{ kWh / t}$$

Tabela 2 – Ensaio de moabilidade de uma amostra de feldspato pegmatítico da região Borborema-Seridó (RN).

MA _i = 1156,58 g							
AAR = 330,45 g							
1	2	3	4	5	6	7	8
Ciclos	NR	MA _i (g)	Produtos			Desvio (g)	Mob (g/rot)
			MAR _i (g)	MAP _i (g)	MAL _i (g)		
1	200	101,16	742,75	413,83	312,67	83,38	1,56
2	188	36,20	750,13	406,45	370,25	76,00	1,97
3	150	35,55	802,64	353,94	318,39	23,49	2,12
4	141	30,96	819,23	337,35	306,39	6,90	2,17
5	139	29,51	827,05	329,53	300,02	-0,92	2,17
6	139	28,82	826,19	330,39	301,57	-0,06	2,17
M = massa da alimentação inicial. (MA) _i = massa da alimentação passante no início do ciclo i. (MAP) _i = massa do produto passante em Am. NR = número de rotações.				AAR = massa a ser adicionada no sistema. (MAR) _i = massa do produto retida em Am. (MAL) _i = massa líquido do produto passante gerado em cada ciclo i. Mob = moabilidade.			
O valor de M é obtido por meio da média de três medidas da massa de minério contido no volume de 700 mL (passo 2). (MA) _i é calculada com base na análise granulométrica da alimentação do moinho de bolas (passo 3). (MAR) _i e (MP) _i são determinados por meio da análise granulométrica do minério do após o processo de moagem em moinho de bolas (passo 6). (MAL) _i é obtida pela diferença entre os valores contidos na colunas 3 e 5 (passo 6). AAR é calculada com base na Equação 5 (passo 10). O desvio é calculado com base na diferença entre os valores contidos na coluna 5 e AAR (passo 11). Moabilidade é calculado com base na razão entre os valores contidos nas colunas 6 e 2 (passo 12). NR é calculado com base na Equação 6 (passo 13).							

Tabela 3 – Resultados da análise granulométrica da alimentação e do produto final resultante da moagem em moinho Bond para determinação do WI.

Alimentação			
Fração (μm)	(%)		
	Retido	Acumulado	Passante
2362	2,91	2,91	97,09
1651	22,05	24,96	75,04
1168	20,63	45,59	54,41
833	12,94	58,53	41,47
589	11,88	70,41	29,59
417	7,13	77,54	22,46
295	4,86	82,40	17,60
208	4,58	86,98	13,02
147	1,99	88,97	11,03
104	3,83	92,80	7,20
74	1,77	94,56	5,44
53	1,95	96,51	3,49
43	0,20	96,71	3,29
+37	0,64	97,36	2,64
-37	2,64	100	0
	100	-	-
Produto Final			
Fração (μm)	(%)		
	Retido	Acumulado	Passante
105	35,44	35,44	66,56
74	16,39	41,97	58,03
53	17,45	59,42	40,58
44	1,38	60,80	39,20
37	4,59	65,39	34,61

Recomenda-se, no mínimo, duas determinações do WI, ou seja, os testes devem ser feitos em duplicatas.

Passo 17

Calcular a energia necessária para moer 1 t de material, aplicando-se a expressão da Equação 9.

$$E = 10 \text{ WI} \left[(P)^{-0,5} - (F)^{-0,5} \right] \quad [9]$$

A Equação 8 é válida para moagem a úmido, em circuito fechado, com diâmetro interno de 2,44 m, com descarga por transbordo. Em outras condições, devem ser aplicados os fatores de correção específicos.

No caso da amostra original do pegmatito da região Borborema-Seridó a energia necessária para moer 1 t do minério na granulometria 80% abaixo de 104 µm, foi realizado o seguinte cálculo:

$$E = 10 \times 12,41 \times \left[(125)^{-0,5} - (1875)^{-0,5} \right]$$

$$E = 8.24 \text{ kWh/t}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Moinho de bolas, determinação do índice de trabalho: NBR 11376. Rio de Janeiro, 1990.
- Barrat, D. e Sherman, M. Factors which influence the selection of comminution circuit. In: Mular, A. L.; Halbe, D. N. e Barratt, D. J. (Ed.). Mineral processing plant design, practice and control. vol.1. SME, 2002, p.539-565.
- Figueira, H. V. O.; Almeida, S. L. M. e Luz, A. B. Cominuição. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.113-182.
- Herbst, J. A.; Lo, Y. C. e Flintoff, B. Size liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). Principles of mineral processing. SME, 2003, p.61-118.
- Mosher, J. e Bigg, T. Bench-scale and pilot plant tests for comminution circuit design. In: Mular, A. L.; Halbe, D. N. e Barratt, D. J. (Ed.). Mineral processing plant design, practice and control. vol.1. SME, 2002, p.123-135.