

Determinação do Work Index pelo método direto, comparativo e comparativo de remoagem de acordo com a 3.^a teoria da cominuição

Marco Aurélio Soares Martins *

1. INTRODUÇÃO
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS
3. MÉTODO DIRETO PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE BOND
4. MÉTODO COMPARATIVO PARA OBTENÇÃO DO "WORK INDEX"
5. UTILIZAÇÃO DO WORK INDEX
6. BIBLIOGRAFIA

Resumo

O trabalho tem como objetivo, além de dar uma idéia de como determinar em laboratório o "Work Index" ou Índice de Bond, discutir algumas variáveis que irão determinar a maneira correta de se determinar o "Work Index".

A equação básica de acordo com a teoria de Bond é a seguinte: $E = 10WI (1/\sqrt{P} - 1/\sqrt{F})$ sendo:

E = energia consumida

WI = "Work Index" característico de cada minério ou mineral dado em Kilowatt/tonelada curta.

F e P = aberturas em malha quadrada, que deixam passar 80% da alimentação e do Produto, respectivamente dados em microns.

O WI é determinado pelo método direto utilizando-se de moagens sucessivas num moinho padronizado e

classificação numa peneira de malha quadrada, simulando um circuito fechado.

No método comparativo determina-se o "Work Index" de um minério a partir da comparação com o "Work Index" conhecido de outro minério. No método comparativo de remoagem o minério teste já se encontra fino sendo necessário um ajuste na distribuição granulométrica do material a ser comparado para que fiquem dentro da mesma faixa granulométrica e serem aí comparados para se determinar o WI desconhecido.

Foram feitos testes para vários minérios como: Itabirito, quartzo, Wolfronita, "veio" e "refeito de garimpo", calcário calcítico, minério de ouro, Minério de cobre, escória de alto forno e para carvão vegetal. Os três métodos foram utilizados e discutidos suas variáveis como constituintes mineralógicas, presença de clivagem nos minerais, influência da abertura da malha teste, etc.

1. Introdução

A britagem e moagem de minérios, rochas e minerais são itens de grande importância em processos industriais constituindo os mais caros numa instalação de tratamento de minérios.

O nível de informações sobre os fundamentos de britagem e moagem é insatisfatório. Existem consideráveis dados empíricos dispersos que são úteis para prognosticar desempenho mecânico oferecendo precisão satisfatória quando instalações e materiais muito semelhantes são comparados. Entretanto, não se conseguiu chegar ainda a uma certa teoria ou mesmo um procedimento prático, que permita calcular com exatidão a quantidade de energia gasta nos processos de fragmentação ou que possa ampliar a série de comparações empíricas.

Neste trabalho é apresentado os fundamentos da terceira Teoria da Cominuição ou Teoria de Bond que é a mais aceita atualmente. São mostrados também, os métodos de determinação do índice de trabalho (Work Index) em laboratório que é utilizado pela maioria dos fabricantes de equipamentos. Porém, este índice é usado como uma indicação inicial da energia requerida (HP) e tamanho dos equipamentos numa instalação de britagem e moagem. A partir dos resultados iniciais é necessário testar os materiais a serem trabalhados em usinas pilotos para se determinar os seus reais comportamentos ao serem cominuídos.

Os testes foram realizados no laboratório da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) em um período de nove meses. Foram feitas determinações do Work Index pelo método direto, comparativo e comparativo de remoagem.

Foram testados vários minérios com características bem diversas. Os resultados são analisados e discutidos, fazendo-se referência aos fundamentos do método e à 3a. Teoria da Cominuição.

2. Considerações gerais

O fraturamento de uma rocha ou mineral se dá pela quebra de suas forças de coesão, implicando na aplicação de uma certa quantidade de energia. Entretanto, não há um princípio ou teoria amplamente aceita que possa esclarecer satisfatoriamente a real energia requerida para redução de minérios.

São três as teorias mais amplamente aceitas para quantificar esta energia requerida. Duas delas, a de Rittinger e a de Kick, são derivadas de pontos de vista diferentes levando a resultados diferentes.

A Teoria Rittinger é a mais antiga, tendo ainda vários adeptos. Ela postula, conforme estabelecido por P. R. Rittinger, que o trabalho útil realizado em britagem e moagem é diretamente proporcional à nova área superficial produzida e, portanto, inversamente proporcional ao diâmetro do produto.

No entanto, medidas da energia superficial da nova área produzida é da ordem de 1/100 da energia requerida, ou seja, apenas uma fração muito pequena da energia aplicada em britagem e moagem é usada para a quebra.

A Teoria Kick é relacionada com cubos sob pressão. Ela postula que o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas. O trabalho necessário, segundo Kick, para redução a tamanhos diferentes é proporcional a $\log Rr / \log 2$, onde Rr é a razão de redução. A Teoria Kick é matematicamente mais sustentável do que a de Rittinger quando são considerados cubos sob compressão, mas ela obviamente falha ao designar uma proporção suficiente do trabalho total em redução para a produção de partículas finas.

Parece que nem a Teoria Rittinger, que trata apenas de superfície, nem a Teoria Kick, que diz respeito somente a volume, podem ser completamente corretas. Britagem e moagem são ambas relacionados com superfície e volume; a absorção de pressão uniformemente aplicadas é proporcional ao volume envolvido, mas a quebra inicia com um "Crack Tip", geralmente sobre a superfície, e a concentração de pressão na superfície motiva a formação dos "Crack Tips".

De acordo com Rittinger a energia necessária para quebrar um cubo de diâmetro D varia em D^2 , ao passo que, de acordo com Kick ela varia em D^3 . A energia de pressão absorvida por um cubo sob compressão varia conforme seu volume, ou conforme D^3 . Entretanto, com a formação do primeiro "Crack Tip" a energia de pressão segue para a superfície, que varia em D^2 . Quando pedaços de rocha irregulares são quebrados a energia de pressão não é distribuída uniformemente por toda a pedra, e o primeiro "Crack Tip" se forma e inicia o fluxo de energia, que desenvolve um modelo de quebra, quando a energia absorvida é intermediária entre D^2 e D^3 , sendo o valor médio $D^{5/2}$.

O número de partículas de formato similar em uma unidade de volume varia em $1/D^3$, de modo que a energia necessária para quebrar uma unidade de volume em uma unidade de peso deve ser proporcional a $D^{5/2} / D^3$, ou $1/D$. Estas são as bases para a Terceira Teoria ou Teoria de Bond.

A Terceira Teoria da Cominuição ou Teoria de Bond pode ser resumida na equação básica:

$$E = \frac{10 W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10 W_i}{\sqrt{F}} \quad (A) \text{ onde,}$$

E = energia gasta no processo;
 F e P = aberturas em malha quadrada que deixam passar 80% da alimentação e do produto, respectivamente, dados em microns;
 W_i = Work Index.

O Work Index é o parâmetro de cominuição que expressa a resistência que um material oferece ao ser britado ou moído. Numericamente o Work Index (W_i) é o trabalho necessário para reduzir o material desde um tamanho infinito até 80% passante em 100 microns, equivalente a cerca de 67% passante em 200 mesh.

A Teoria de Bond é baseada em experimentações de laboratório e em resultados em plantas reais, além da consideração teórica. Ela considera os efeitos de diferentes condições de aplicação de esforços em diferentes máquinas, contrastando com as duas teorias anteriores.

3. Método direto para obtenção do índice de Bond

O teste de índice de moagem tem por objetivo determinar, simulando em circuito fechado de moagem com uma determinada carga circulante, a quantidade de produto menor que uma certa malha, produzida por um certo número de revoluções do moinho.

Com este dado se pode determinar o Work Index que estabelece a relativa resistência à redução que oferece o material na faixa granulométrica testada e a relativa eficiência das diferentes máquinas e processos utilizados.

O Work Index pode ser determinado a partir do teste em laboratório ou de operações industriais. Neste último caso devem ser conhecidas a energia consumida na cominuição do material numa faixa granulométrica determinada e a distribuição granulométrica da alimentação e do produto.

O Work Index, deduzido empiricamente para um moinho padronizado, é dado pela fórmula:

$$W_i = \frac{44,5}{(P_i)^{0,23} \times (G_b P)^{0,82} \times (10/\sqrt{F} - 10/\sqrt{P})} \quad (B)$$

onde:

W_i = Work Index (índice de trabalho);

P_i = abertura da peneira teste em micrômetro;

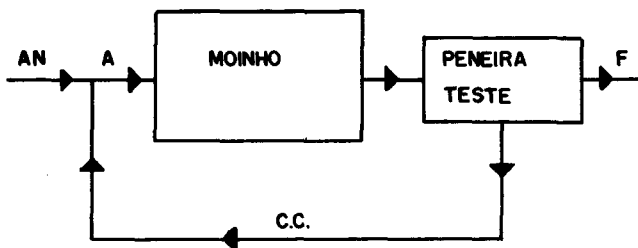
F e P = aberturas em malha quadrada que deixam passar 80% da alimentação e do produto respectivamente, dados em micrometros;

$G_b P$ = moabilidade dada pelo peso em gramas de material passante pela malha teste produzido por rotação do moinho.

3.1. Circuito de moagem

O circuito de moagem pode ser representado como na figura 1.

Figura 1 - Circuito fechado de moagem.



A alimentação A do moinho consiste na soma da alimentação nova AN e da carga CC . O produto P consiste na soma dos materiais retido e passante na peneira teste.

$P = CC + F$ (1)
A porcentagem da carga circulante C se define como a razão:

$$C = \frac{B}{AN} \times 100 \quad (2)$$

Obviamente quando o circuito está em regime tem-se:

$$P = A \quad (3)$$

$$AN = F \quad (4)$$

e portanto:

$$C = \frac{B}{AN} = \frac{B}{F} \quad \therefore B = CF \quad (5)$$

Levando (3) e (5) na equação (1), tem-se:

$$A = F + CF$$

$$A = F(1 + C) \quad (6)$$

$$F = \frac{A}{1+C} \quad (7)$$

No presente caso a carga circulante é 250% (C=2,5), portanto no caso do circuito em regime, a quantidade de finos produzidos será igual a:

$$F = A/3,5 \quad (8)$$

onde:

A constitui a carga total do moinho.

3.2. Procedimento

Os testes para determinação do índice de trabalho (WI) foram realizados em um moinho de bolas padrão com 12" X 12" com velocidade de 70 rpm, totalmente balanceado, acionamento por corrente, com carga de bolas assim distribuídas:

Tabela I - Meio de moagem

Ø das bolas	Nº de bolas	Peso (g)
Pol. mm		
1,57 40	43	12.100
1,18 30	67	7.250
0,98 25	10	576
0,79 20	71	2.125
0,59 15	94	1.214
Total		23.265

3.2.1. Preparação do Material

- Deve-se preparar cerca de 10 Kg de amostra abaixo de 6 mesh.
- A amostra deve ser reduzida por quarteamento para amostras de aproximadamente 200 g.
- Deve-se fazer uma análise granulométrica com uma das amostras para se determinar o tamanho de malha quadrada que deixa passar 80% do material ou tamanho F, dado em micrômetros.

3.2.2. Procedimento do Teste

- Do restante da amostra do item 3.2.1. e a partir

Tabela II - Tabela para cálculo do WI - método direto

WOLFRAMITA - (VEIO)

1 Ciclo	2 Nº de Revoluções	3 Tempo de Moagem	4 ANA	5 -100 # na ALV.	6 % -100 # ANA	7 Produto de Moagem		9 -100 # Líquido Produzido	10 ANA do Próximo Ciclo	11 Desvio	12 Carga Circulante %	13 Gbp g/rot
						+100 #	-100 #					
0	100	1'25"	1.106,00	165,40	14,95	792,45	313,55	148,15	313,55	2,45	252	1,481
1	102	1'28"	313,55	45,50	14,51	900,00	206,00	160,50	206,00	110,00	436	1,573
2	172	2'28"	206,00	30,17	14,65	821,81	284,19	254,02	284,19	31,81	289	1,477
3	194	2'46"	284,19	30,65	10,78	782,20	323,00	293,15	323,80	-7,80	242	1,511
4	184	2'42"	323,80	48,10	14,85	768,84	337,16	289,06	337,16	-21,16	228	1,530
* 5	175	2'30"	337,16	52,38	15,54	801,00	305,00	252,62	305,00	11,00	263	1,443
* 6	183	2'37"	305,00	48,65	15,95	792,20	313,80	265,15	313,80	2,20	252	1,449
* 7	185	2'39"	313,80	46,17	14,71	795,90	310,10	263,93	310,10	5,90	256	1,427
8	189	2'42"	310,10	48,05	15,50	744,67	361,33	313,28	361,33	-45,33	206	1,658
9												
10												

Amostra inicial: frasco cm³

AAR = AI Alimentação a acrescentar
3,5 quando em regime

NR = $\frac{AAR - Col\ 5}{Gbp}$ Nº de Revoluções do Próximo ciclo

AI = 1.106,0 g
AAR = 316,0 g

Col 11 = AAR - Col 10
Col 12 = Col 7 / Col 8
Col 13 = Col 9 / Col 2
Col 10 = Col 8
Col 9 = Col 8 - Col 5
Col 3 = Col 2 X Col 5
70

WI = $\frac{44,5}{(P_1)^{0,23} \times (Gbp)^{0,82} \times (10/\sqrt{F-10})/\sqrt{F}}$

F = 230
P = 122
Pi = 149

Gbp = 1,440 g/rot.

WI = 14,98 wh/t
curta

de alíquotas tomadas por incremento, colocar o minério em proveta de 1 litro, tomando o cuidado para não compactar o material. O peso correspondente ao volume de 700 ml será a alimentação do moinho.

b. A moagem é intermitente e para a primeira moagem deve ser escolhida por exemplo, 100 rotações do moinho.

c. Após estas revoluções iniciais, o material é descarregado e peneirado na malha P₁. O material undersize é descartado e deve-se, então adicionar um peso equivalente de nova alimentação.

d. Conhecendo-se o peso de undersize de P₁ e o nº de revoluções, determina-se o Gbp, que é definido como a massa de undersize de P₁ pelo número de voltas do ciclo.

e. De posse do Gbp (g / rot) deve-se estimar o nº de revoluções necessário para alcançar a carga circulante de 250% no próximo teste de acordo com a fórmula:

$$NR = \frac{AAR - undersize}{Gbp}$$

onde:

AAR - "alimentação a acrescentar quando em regime e é igual a:

$$AAR = \frac{AI}{3,5}$$

onde:

AI = é a alimentação inicial do moinho.

f. Faz-se a nova moagem de acordo com o número de revoluções calculado e repete-se todo o procedimento até que seja alcançado o regime, o que acontece quando a carga circulante atinge 250%.

g. Após alcançado o regime deve-se certificar que o circuito ficará equilibrado fazendo-se mais dois ciclos de moagem.

O valor de Gbp será a média dos 3 últimos ciclos. O produto (undersize do último ciclo) é analisado granulometricamente e determinado o tamanho P (80% passante numa malha quadrada dada em micrômetros).

h. De posse do valor de F, P e Gbp deve-se calcular o WI de acordo com a equação (B).

A rotina de testes pode ser melhor controlada com o uso de uma tabela de resultados como a mostrada pela tabela II.

3.3. Discussão dos resultados

A título de exemplificação foi escolhido, dentre os vários minérios testados, o minério de Wolframita.

A composição mineralógica semi-quantitativa por difração de raios-X da amostra é:

Constituintes:	%
Quartzo	76
Wolframita	5
Biotita	Li
Topázio	10
Goethita	5
Hematita	1
Plagioclásio	traços
Sericita	1
Caulinita	1
Magnetita	Li

De posse dos valores de F e P, Pi e o GbP podemos calcular o Work Index:

F = 2300 μ m
 P = 122 μ m
 Pi = 149 μ m (100 \neq)
 GbP = 1,440 g/rotação
 Pela equação (B) vem:

$$Wi = \frac{44,5}{(149)^{0,23} \times (1,440)^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{122}} - \frac{10}{\sqrt{2300}} \right)}$$

Wi = 14,48 Kwh/t curta.

O valor foi bem próximo ao valor do WI para o quartzo (pois continha 76% de quartzo).

Os valores de Work Index dos minérios testados estão resumidos na tabela III, os quais foram calculados utilizando-se uma malha teste (Pi) de 100 mesh. Dentre os minérios testados convém destacar a variação dos valores obtidos para o minério de cobre de Carajás. Os testes para este minério eram feitos para controle de eficiência de usina piloto e para se determinar as variações relativas à sua localização no corpo de minério como um todo.

De acordo com esta localização o minério continha uma variável proporção dos componentes mineralógicos, mas o fator maior responsável pela variação do Work Index é a presença de maior ou menor quantidade de mica. Quanto maior o teor de mica maior o valor obtido para o Work Index.

Se o material é homogêneo para redução de tamanho, seu valor de WI será uma constante contínua para todos os estágios de redução de tamanho. No entanto, estruturas heterogêneas em rochas são comuns e o Work Index poderá ser variável com a faixa de tamanho testado. Certos materiais têm um tamanho natural de grãos e, variando o tamanho testado, o valor de WI variará. Após liberados os grãos naturais do minério, o comportamento em relação à redução de tamanho será diferente em relação à situação anterior a este limite.

A eficiência da máquina de redução pode influenciar no valor de Work Index. Por exemplo, um moinho de bolas moendo um minério desde um tamanho 80% passante em 14 mesh para 80% passante em 100 mesh terá um valor de WI mais baixo operando com uma carga de bolas de 1,5 polegadas do que uma carga de bolas de 3 polegadas.

Neste trabalho são mostradas algumas variações nos valores obtidos para o WI em função da malha teste. Os resultados são apresentados na figura IV, e os valores de F e P são mostrados na figura 2. Como pode ser observado, o valor de WI aumenta à

Tabela III - Resultado de WI de acordo com a malha teste de 100 mesh

material	GbP (g / rot.)	Wi Pi = 100 \neq (Kwh / t curta
itabirito	2,72	8,80
quartzo	1,43	15,40
cobre (Carajás)	1,48	13,89
	1,25	18,57
	1,56	13,84
	1,41	14,96
fosfato (Patos de Minas)	1,49	14,77
	1,47	14,89
minério de ouro (Serra Pelada)	2,13	9,73
	2,12	10,34
calcário calcítico Itapemirim	2,99	9,57
Wolframita "veio"	1,44	14,98
Wolframita "rej de garimpo"	1,74	12,43
carvão vegetal	0,99	20,29

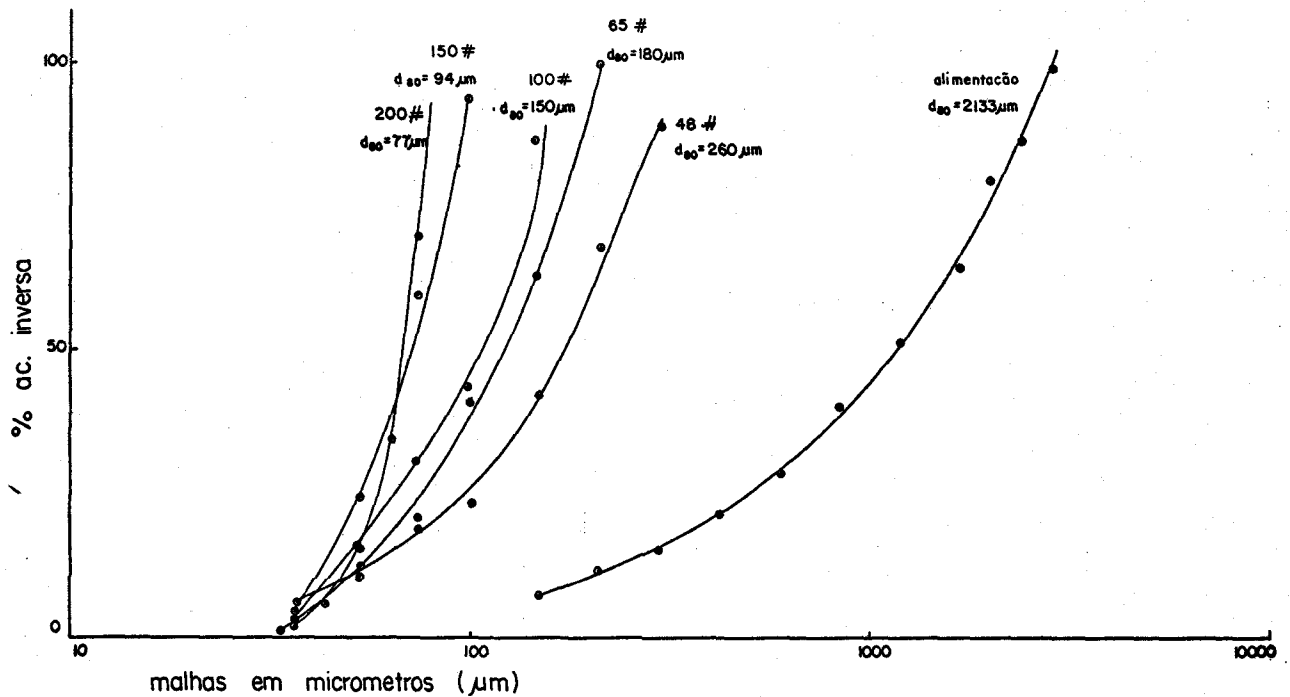
medida que a abertura da malha teste diminui, sendo o valor obtido para 100 mesh bem próximo da média. Logo, para determinações onde não sabemos a malha de corte na instalação industrial, deve-se testar o minério com a malha teste de 100 mesh. Caso contrário, deve-se determinar o WI com a malha teste de abertura próxima à situação requerida industrialmente.

Tabela IV - Variação do WI em função da malha testada

material	Pi malha teste (mesh)	GbP g/rot.	Wi Kwh/ton. curta
calcário calcítico	48	5,52	7,34
	65	4,10	7,74
	100	2,99	9,57
	150	2,11	10,26
	200	1,83	10,93
* quartzo	48	2,58	13,20
	65	2,05	13,40
	100	1,43	15,40
	150	1,12	16,40
	200	0,75	20,50
*espodumênio	48	1,91	16,50
	65	1,43	17,40
	100	1,05	19,20
	150	0,79	20,50
	200	0,54	23,30

* Dados de acordo com R. W. Smith e K. H. Lee

Figura 2 - Distribuição dos produtos - Wolframita "veio"



No caso da presença de micas e outros materiais lamilares, é recomendável usar o método comparativo para determinação do WI. Isto porque haveria uma tendência à concentração de mica dentro do moinho, já que a eficiência de peneiramento para materiais lamilares é bem pequena.

4. Método comparativo para obtenção do "Work Index"

Muitos minérios ao serem submetidos ao teste de Bond pelo método direto apresentam problemas causando variações significativas para o resultado de Work Index. Estes problemas são geralmente causados pela própria natureza do minério ou mesmo amostras de minérios com granulometria muito fina, mas que serão na prática submetidos a um estágio de remoagem.

Minérios heterogêneos que contêm minerais lamilares como a mica poderão levar a resultados errôneos pois estes minerais lamilares, por serem de difícil moagem e por causarem baixa eficiência de peneiramento, se concentrarão no moinho. Esta concentração será maior ou menor conforme a malha testada.

O Método Comparativo (de "Berry e Bruce") poderá ser uma opção para estes casos críticos. As bases para este método são simples. Uma vez igualadas todas as condições de moagem para dois materiais semelhantes, a energia total consumida em ambos processos será a mesma.

Para se conseguir esta igualdade será necessário que ambas as moagens sejam feitas no mesmo moinho com a mesma carga de bolas e que o tempo, a velocidade, a porcentagem de sólidos, etc., sejam igualadas nas duas moagens.

Os dois materiais a serem comparados deverão ter distribuição granulométrica aproximadamente igual e mesmo peso específico.

De acordo com a equação da terceira teoria da Cominuição vem:

$$E = \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{P}} - \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{F}} \quad (1)$$

Tem-se para os dois minérios:

$$E_1 = \frac{10 \text{ WI}_1}{\sqrt{P_1}} - \frac{10 \text{ WI}_1}{\sqrt{F_1}} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{10 \text{ WI}_2}{\sqrt{P_2}} - \frac{10 \text{ WI}_2}{\sqrt{F_2}} \quad (3)$$

A energia total consumida será a mesma para os dois processos, ou seja: $E_1 = E_2$

Se conhecemos o Work Index de um desses minérios e os tamanhos 80% passante da alimentação e produto das moagens, poderemos determinar o Work Index para o outro minério.

4.1. Determinação do "Work Index" pelo método comparativo simples

Para este método de obtenção do Work Index de um minério teste a partir de um minério referência de Work Index já conhecido deve ser seguido o procedimento:

- A preparação tanto do material teste quanto do material referência deve ser idêntica, afim de que ambos apresentem distribuições granulométricas as mais próximas possíveis.
- Os materiais preparados são quarteados de forma a se obter amostras para as moagens e análises granulométricas da alimentação.
- Os tempos de moagem são iguais para todas as moagens e com os produtos são feitas análises granulométricas.
- Obtidos os valores de P e F para a amostra referência e amostra teste é calculado o Work Index para o material teste.

4.2. Determinação do "Work Index" pelo método comparativo em produtos a serem remoídos

A remoagem de minérios em instalações industriais constitui-se numa realidade:

São feitas remoagens com o intuito de se obter uma segunda liberação de minerais úteis que seriam desperdiçados em processos mais grosseiros. Daí a necessidade de se quantificar a energia gasta nestes processos.

Os materiais a serem remoídos já se encontram numa granulometria muito fina (por exemplo abaixo de 100 mesh) e serão remoídos para dimensões bem inferiores. Para esses materiais não se aplica o método direto devido à granulometria em que se encontram e o método comparativo simples não se aplicaria, pois seria necessário um outro material tão fino quanto o material a ser remoído e com distribuição granulométrica aproximada.

Para estes casos pode-se determinar o Work Index para produtos a serem remoídos pelo método comparativo de remoagem. Estes serão comparados com o próprio minério de origem, sendo necessário um ajuste de granulometria para que possam ser comparados.

Para melhor compreensão do método, é descrito a seguir o procedimento usado para a determinação do WI para o minério de cobre proveniente de Carajás. O undersize da micro peneira da planta piloto de

concentração de cobre foi o minério a ser testado e o minério referência foi o próprio minério da alimentação do circuito.

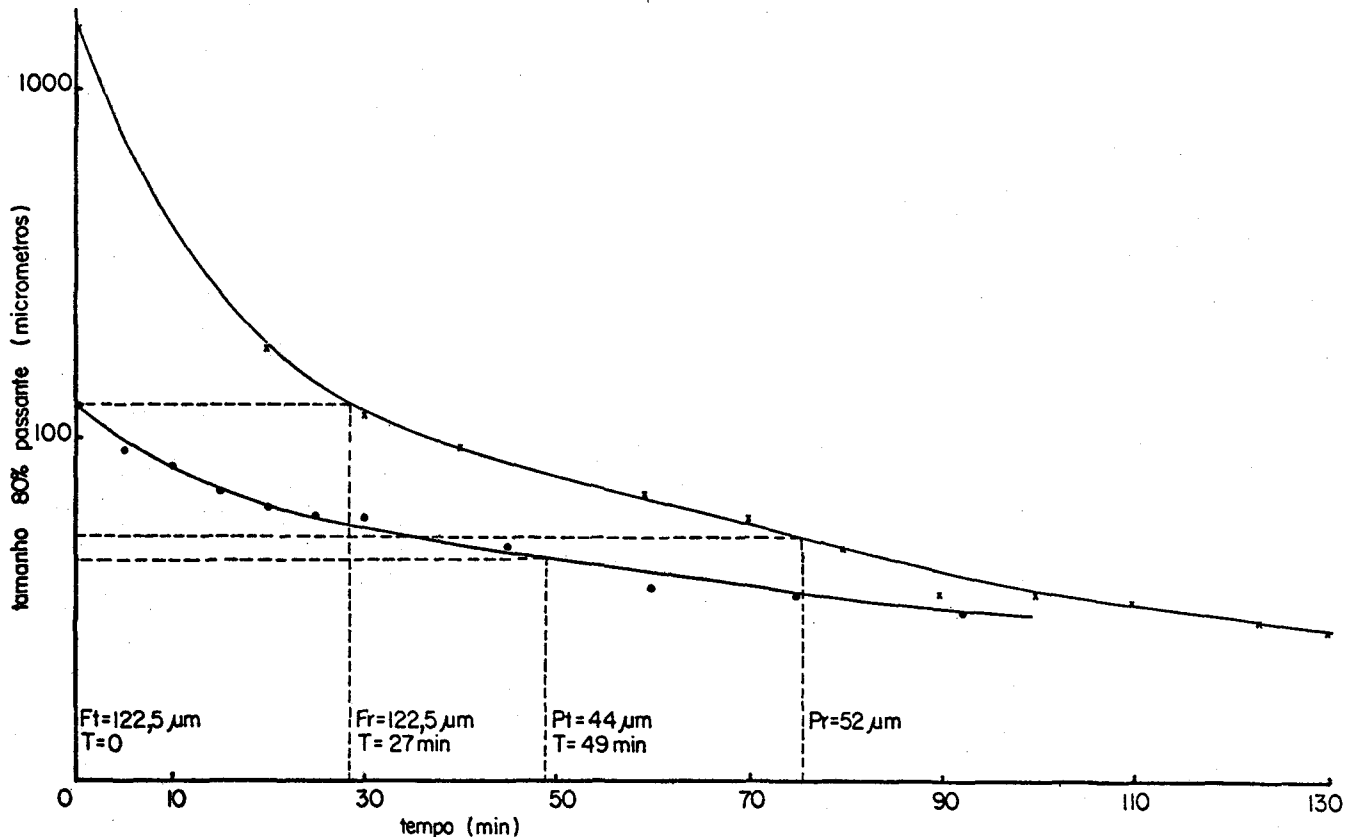
Foi utilizado um moinho de bolas de 8"X8" (20,32cm por 20,32 cm) com velocidade de 68 rpm e como carga moedora 13 bolas de aço de 38 mm de diâmetro, 33 com 28 mm, 35 com 24 mm e 67 com 19 mm, totalizando 9.920 g.

O procedimento operacional foi o seguinte:

- Inicialmente, o minério referência foi todo britado a 9 mesh e quarteado em várias alíquotas de 1500 g cada.
- O material teste já se encontrava 86,80% abaixo de 100 mesh. Deste foram compostas várias alíquotas de 1500 g cada.
- Foram feitas as moagens com percentagem de sólidos de 60% em peso.
- Para os dois materiais foram feitas moagens variando-se o tempo sendo, para o minério teste, a variação de 5 em 5 minutos e, para o minério referência, de 10 em 10 minutos.
- Para cada produto das moagens foi feita análise granulométrica a úmido de onde retirou-se o valor da malha que deixa passar 80% do material (d80) dado em micrômetros.
- Todos os valores obtidos de d80 foram plotados em um mesmo gráfico (tamanho 80% passante versus tempo de moagem), tanto para o material teste quanto para o material referência.

O gráfico d80 X tempo de moagem é mostrado na figura 3.

Figura 3 - Ajuste de granulometria para comparação de materiais



De acordo com o método comparativo $E_r = E_t$ e o WI para o minério teste será:

$$WI_t = WI_r \cdot \frac{\sqrt{P_r} - \sqrt{F_r}}{\sqrt{P_t} - \sqrt{F_t}} \quad (1)$$

onde:

"r" e "t" indicam respectivamente, o material referência e o material teste.

O valor de F_t será o tamanho d80 inicial da amostra teste. O valor de P_t será o tamanho pretendido que, no caso específico, é o tamanho de liberação.

O valor de F_r será o mesmo de F_t , pois os minérios são comparados na região de granulometria aproximadamente igual. O valor de P_r será determinado graficamente (figura 3). Este valor é obtido contando-se o mesmo tempo de moagem que o minério teste gasta para atingir o tamanho P_t . O minério teste deverá ser moído por 49 minutos para atingir a liberação e o minério referência gastará 27 minutos para igualar a granulometria e, a partir daí, gastará mais 49 minutos de moagem, de acordo com as bases do teste comparativo. O ponto correspondente à soma dos tempos (27 + 49 minutos) será o tamanho P_r .

Os valores foram:

$$F_t = F_r = 122,5 \mu\text{m}$$

$$P_t = 44 \mu\text{m} \text{ (tamanho de liberação)}$$

$$P_r = 52 \mu\text{m}$$

WI do minério de referência é igual a 14,40 Kwh/t curta (obtido pelo método direto)

Pela fórmula (1) determinamos o valor de WI para o minério teste de 13,68 Kwh/t curta.

O método comparativo de remoagem é, na maioria das vezes, a única opção para se determinar o WI de amostras a serem remoidas, mas convém lembrar que estas amostras, tendo granulometria muito fina, ficam sujeitas a baixas eficiências de moagem. Além disso, esses materiais geralmente passaram por algum processo de concentração ou escalpe, indo contra a própria 3a. teoria da Cominuição que define a energia de um minério em uma determinada granulometria por níveis.

5. Utilização do "Work Index"

A fórmula de Bond para determinação do Work Index pelo método direto foi deduzida empiricamente e baseada na moagem a umido em moinhos industriais de bolas com diâmetro interno de 2440 mm, com descarga por overflow e trabalhando em circuito fechado combinando energia consumida com eficiência média de pulverização.

Para moagem via seca deve-se multiplicar o valor obtido para o WI por 4/3.

Para diâmetros internos diferentes de 2440 mm multiplica-se o valor de WI por $(\frac{2440}{D})^{0,20}$ onde D é o novo diâmetro.

Para moagens para tamanho de partículas menor que 70 μm multiplica-se o WI por $\frac{P' + 10,3}{1.145 P'}$

onde:

P' é o tamanho de partículas menor que 70 μm .

- (4) CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. Curso interno elaborado para os técnicos de nível médio da DITRAN/DITCAR - Determinação do "Work Index" (WI) em laboratório 08-81.
- (5) JIS, Norma M4002 - 1976. Testing method of grinding work index 1979.
- (6) SMITH, R. W. & LUK K. H. A comparison of data from Bond type simulated closed-circuit and Batch type grindability tests. Transactions, March 1968. p. 91-101.

6. Bibliografia

- (1) BOND, Fred C. The third theory of comminution - Transactions Aime - Mining Engineering, May 1952. p. 484-494.
- (2) BOND, Fred C. Confirmation of the third theory. Aime Trans, 217: 139-153, 1960.
- (3) BOND, Fred C. Crushing and grinding calculations. s.l., Allis Chalmers, Jan. 1961. p. 1-16.