

## WI: CORRELAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS. O CASO PRÁTICO DA USINA DO SOSSEGO

A. M. Imbelloni<sup>1</sup>, A. J. B. Macêdo<sup>1</sup>, L. C. R. Machado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente/Universidade Federal do Pará  
Folha 17, Quadra 04, Lote Especial. Nova Marabá. Marabá/PA. CEP 68.505-080  
Tel. 94 2101 5900, fax 94 2101 5901. e-mail: alaineimbeloni7@gmail.com

<sup>2</sup>VALE, Diretoria de Cobre, Garoy  
Mina do Sossego, Canaã dos Carajás, PA, 68537-000. e-mail: luis.machado@vale.com

O *Work Index* (WI) representa a resistência do minério à moagem e possibilita o cálculo da energia necessária para a moagem do minério. No entanto, a metodologia clássica de determinação é demorada e trabalhosa. Por isso, as usinas de beneficiamento têm utilizado ensaios simplificados para atender as suas necessidades. Nesse contexto, é importante que exista uma correlação entre o WI de Bond, através de ensaios que seguem normas de padronização, com o WI dos testes feitos numa Usina de beneficiamento. A idéia deste trabalho consistiu em comparar os valores de *Work Index* encontrados pela metodologia de Bond, a partir de ensaios feitos na Universidade Federal do Pará, com os valores de *Work index* obtidos no moinho de Torque, feitos pelo Laboratório de Processo da Usina do Sossego (VALE S/A, localizada em Canaã dos Carajás- PA). Ambas as metodologias trabalharam com amostras de minério de cobre correspondentes, coletadas na alimentação do moinho SAG, representando a alimentação da Usina nos meses de Outubro e Novembro, de 2009, e Janeiro, de 2010. De acordo com a metodologia de Bond, as amostras apresentaram valores de WI entre 18 e 21. Já com a metodologia de Torque, os valores de *Work Index* variaram entre 13 e 17. Verificou-se uma correlação linear fraca entre os valores de WI das metodologias utilizadas, apresentando correlação igual a -0,29. No entanto, os resultados de WI de Bond apresentaram forte correlação com o valor do WI operacional da Usina, correlação igual a 0,95. Deste modo, a metodologia no moinho de Torque não se mostrou acurada, no entanto é promissora, necessitando apenas ser revista alguma etapa do ensaio, por se tratar de uma metodologia em desenvolvimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Work index*, Moagem, Metodologia, Energia específica, Correlação linear.

## 1. INTRODUÇÃO

A cominuição ou fragmentação é uma etapa muito importante no processamento da maioria dos minerais e divide-se em duas classes distintas: britagem, que é a cominuição inicial, e moagem, que é o último estágio do processo de fragmentação, que visa a obtenção de produtos com granulometria inferior a 10 milímetros (Dutra, 2008).

Segundo Beraldo (1987), a cominuição envolve forças de compressão, impacto e atrito e é realizada no beneficiamento de minérios com objetivo de liberar as espécies minerais, visando às operações de concentração subseqüentes, com teores adequados e uma taxa de recuperação razoável do mineral. Os equipamentos mais usados são os moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, de rolos e de impacto.

A moagem é a área da fragmentação que requer maiores investimentos, maior gasto de energia e é considerada uma operação importante para o bom desempenho de uma instalação de tratamento (Pereira, 2004). Por isso, entre outros, a determinação do Índice de Trabalho (WI) é de extrema importância para o dimensionamento e otimização de circuitos de moagem de minério. O Índice de Trabalho para moinho de bolas representa a resistência do minério à moagem e possibilita o cálculo da energia necessária para se moer o minério.

Os Experimentos de Bond são longos e trabalhosos, por isso têm sido utilizados métodos mais rápidos que possam atender a dinâmica de uma usina, fornecendo resultados satisfatórios, garantindo uma estimativa de WI de forma mais rápida e reprodutiva, possibilitando ações de correção e ajuste do cenário de operação de uma planta de beneficiamento, que podem resultar em ganhos de qualidade e operacionalidade.

O objetivo deste trabalho foi realizar os ensaios de *Work Index* (WI) propostos por Bond, com amostra de minério de cobre, e comparar e correlacionar os resultados dos ensaios com os dos experimentos feitos em moinho de Torque e com os valores de WI operacional da Usina de Beneficiamento de minério de Cobre do Sossego.

## 2. CONSUMO DE POTENCIA NA MOAGEM: LEIS DA COMINUIÇÃO

A importância da operação de fragmentação é o fato de que a maior parte da energia gasta no processamento de minérios é absorvida pela fragmentação (Luz et al, 2004). Os processos industriais de fragmentação de partículas apresentam baixa eficiência com relação à energia aplicada.

As leis da cominuição são leis empíricas que relacionam o trabalho elementar necessário para fragmentar a unidade de massa do sólido com uma variação de tamanho ou diâmetro médio das partículas. A Lei de Rittinger ou primeira lei da cominuição, enunciada em 1867, se baseia nas hipóteses das superfícies das partículas, enquanto que a lei de Kick, de 1885, se baseia numa hipótese volumétrica. Já a Teoria de Bond, do ano de 1952, se baseia no tamanho das partículas.

Fred C. Bond postulou uma lei empírica, propondo que a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho. Bond definiu como tamanho, a abertura da peneira pela qual passa 80% do material. A terceira lei é uma expressão matemática da Lei de Bond, mostrada na Equação 01 (Wills, 2007):

$$E = 10WI \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{A_{80}}} \right) \quad (01)$$

Em que:

E: energia em kWh para moer uma tonelada curta de minério;

WI: Índice de Trabalho (Work index);

$A_{80}$  e  $P_{80}$ - aberturas da peneira pelas quais passam 80% da massa da alimentação e do produto, respectivamente, ( $\mu\text{m}$ );

Para Galery (2006), A lei de Bond conduz a estimativas mais realistas e é capaz de prever o consumo de equipamentos que ainda não foram instalados. Baseado em dados em Escala de Planta, é possível obter o mesmo índice equivalente, através da Equação 02:

$$WI_{Op} = \frac{E}{10 \left( \frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{A_{80}} \right)} \quad (02)$$

Onde:

$WI_{Op}$ : Work index operacional;

E: Consumo médio de energia em kWh;

Segundo Chaves e Peres (2006), a lei de Bond tem grande aplicação na moagem de minérios. No entanto, a equação de Bond deve considerar fatores de correção em seu cálculo de potência, os quais são calculados a partir dos desvios das condições específicas em que a equação foi desenvolvida.

### 3. METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO O ÍNDICE DE TRABALHO DE BOND

A metodologia para o teste completo de Bond adotada é descrita na norma NBR 11376. O minério de cobre utilizado para os testes foram amostras da alimentação da usina do Sossego (Vale S/A, Canaã dos Carajás, PA), que foi devidamente amostrado e teve o WI avaliado segundo procedimentos operacionais da Gerência de Processo do Sossego.

#### 3.1.Método de Bond

O moinho de Bond é um moinho de bolas padronizado que trabalha em circuito fechado, a seco, regulado para uma velocidade de rotação de 70 RPM. A carga moedora é constituída de 285 bolas de aço com faixa de tamanho padrão (43 bolas/36,5mm; 67 bolas/30,2 mm; 10 bolas/25,4mm; 71 bolas/19,1mm; 94 bolas/15,9mm), com aproximadamente 20, 13 Kg.

A amostra de 20 kg de minério foi britada abaixo de 3,36mm passando por secagem em estufa. Em seguida, a amostra global foi homogeneizada e a densidade aparente do minério foi medida em triplicata, e a massa correspondente a 700 mililitros determinada. Essa foi a massa de alimentação inicial do teste (M).

Depois, a distribuição granulométrica da alimentação foi definida em peneiras da série Tyler, no intervalo de 1420 a 150  $\mu\text{m}$ . O valor do  $A_{80}$  foi determinado, e o valor de  $Ma_r$ , definido como a massa de alimentação a ser acrescentada quando em regime, calculada por  $M/3,5$ . Este valor corresponde a uma carga circulante de 250%. A abertura da peneira-teste ( $A_m$ ) escolhida foi igual a 150  $\mu\text{m}$ . A massa passante na abertura da malha-teste foi determinada correspondendo ao passante do primeiro ciclo, denominado de  $Ma^1$ .

O moinho de Bond foi carregado com a carga de bolas padrão, e com a massa de minério ( $M$ ). O moinho foi descarregado e a massa retida na malha teste ( $Mr^i$ ) foi determinada por peneiramento. A massa passante na malha teste ( $Mp^i$ ) foi determinada por diferença:  $Mp^i = Mt^i - Mr^i$ . Esta é a alimentação nova a ser acrescentada ao retido do primeiro ciclo, em preparação para o ciclo seguinte. A fração da alimentação que já se encontrava com granulometria abaixo da abertura da malha teste ( $Ma^i$ ), foi descontada do passante na malha teste, presente no produto de moagem ( $Mp$ ). Assim foi determinado o “Passante líquido do produto”.

A Moabilidade é um índice que representa a “massa de material gerado” por número de revoluções do moinho. O equilíbrio fica evidenciado quando a variação do valor da Moabilidade começa a ser desprezível em relação aos ciclos anteriores. Foram realizados vários ciclos, cerca de 9 ciclos por teste, para se chegar ao equilíbrio do sistema. Durante o primeiro ciclo de moagem o número de rotações do moinho foi pré-definido em 150 rotações. No entanto, para os ciclos seguintes o número de rotações do moinho foi definido a partir da Equação 03:

$$Nr_{i+1} = \frac{Aar - Ma_{i+1}}{Mob_i} \quad (03)$$

Onde:

$Nr_{i+1}$  = Número de rotações para o próximo ciclo;

$Aar$  = Quantidade de incremento para se ter uma carga circulante de 250%;

$Ma_{i+1}$  = Quantidade de passante na malha teste do próximo ciclo (g);

$Mob_i$  = Moabilidade do ciclo anterior.

Para cada novo ciclo foi feita a recomposição da alimentação. Esse procedimento é feito para que a massa da alimentação do moinho seja sempre a mesma em todos os ciclos. Quando em regime, o  $P_{80}$  foi calculado realizando-se a análise granulométrica do produto da moagem. O valor do WI é calculado, utilizando-se a Equação 04:

$$WI = \frac{44,5}{A_m^{0,28} \times Mob^{0,28} \times \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{A_{80}}} \right)} \times 1,1 \quad (04)$$

Em que:

WI – índice de trabalho para moagem (kWh/t);

Am – abertura da malha de classificação do ensaio ( $\mu\text{m}$ );

Mob – média dos três últimos valores do índice de moabilidade no estado de equilíbrio;

A<sub>80</sub> e P<sub>80</sub>- aberturas da peneira pelas quais passam 80% da massa da alimentação e do produto, respectivamente, ( $\mu\text{m}$ );

1,1 – fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica.

Conhecendo-se o índice de trabalho, pode-se calcular a energia necessária para moer 1 tonelada de material, aplicando-se a Equação 05:

$$E = 10WI \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{A_{80}}} \right] \quad (05)$$

Onde:

E: energia necessária para a moagem, em kWh/t;

### 3.2.Método do Moinho de Torque

A metodologia de Torque foi desenvolvida pela equipe de Processo da Usina do Sossego, na busca de se desenvolver uma metodologia rápida para a determinação do Work Index.

O moinho de Torque trabalha em circuito aberto, via úmido. Sua carga moedora consiste de 185 bolas de diferentes diâmetros (42,7 mm = 14 bolas; 33,8 mm = 37 bolas; 25,5 mm = 47 bolas; 19,5 mm = 87 bolas).

A amostra global de minério foi britada abaixo de 2 mm e homogeneizada. A massa de alimentação inicial do teste (M) é igual a 2 kg. A análise granulométrica da alimentação foi determinada, calculando-se o A<sub>80</sub>.

A amostra foi diluída em 0,857 litros de água para perfazer 70% de sólidos. O moinho foi carregado com a polpa e as bolas. No software do moinho de torque, foi inserida a identificação da amostra e o tempo de teste definido em 12,5 minutos. O tempo de moagem foi definido experimentalmente.

Depois da moagem, a polpa foi descarregada no recipiente de coleta e procedeu-se a análise granulométrica do produto, calculando-se o P<sub>80</sub> e verificando-se a porcentagem de sólidos. Por fim, o WI foi calculado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras de minério de cobre utilizadas nos testes foram coletadas na alimentação do moinho SAG (Semi-autógeno) da usina do Sossego. Essas amostras representam a alimentação dos meses de Outubro e Novembro, de 2009, e Janeiro, de 2010.

A amostragem foi feita mensalmente pela equipe do laboratório de Processo da Usina. Cada amostra foi dividida em duas frações: uma para os ensaios no moinho de Bond, e a outra para os testes no moinho de Torque. A amostragem é feita para avaliar o WI de cada mês, uma vez que o tipo de minério que alimenta a usina varia de acordo com a variação geológica do corpo mineral. Essa variação do minério justifica também os diferentes valores de WI apresentados para cada amostra de minério.

Foram feitos três testes de WI, com duplicata. O total de teste foi definido levando-se em consideração o tempo para a execução dos experimentos (3 meses) e a disponibilidade de amostras no tempo disponível.

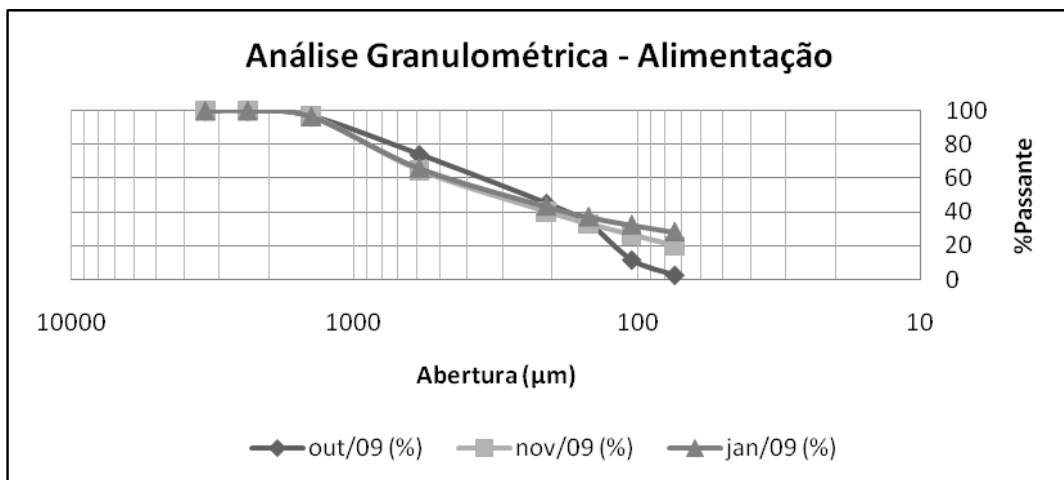
O primeiro e o segundo ensaio de Bond utilizaram amostras correspondentes aos meses de Outubro e Novembro, de 2009, respectivamente, enquanto que o terceiro ensaio utilizou a amostra correspondente ao mês de Janeiro, de 2010. A Tabela I mostra os resultados obtidos nos testes de WI.

**Tabela I-** Apresentação dos resultados dos ensaios de Bond.

Resultados	Mob.(g/rotação)	A <sub>80</sub> (µm)	P <sub>80</sub> (µm)	WI (kWh/t)	E (kWh)
Outubro/09	1,52	812,35	133,23	21,37	13,92
Novembro/09	1,57	991,69	120,51	18,05	10,71
Janeiro/10	1,36	970,09	104,19	18,29	13,98

As três amostras utilizadas nos testes de Bond e de Torque apresentaram diferentes faixas granulométricas e diferentes geologias, o que pode justificar os diferentes valores de WI para cada mês analisado. Não houve amostragem no mês de Dezembro de 2009, por isso não houve análise referente a este mês.

A Figura 01 mostra uma comparação entre as três curvas granulométricas da alimentação dos testes de Bond.



**Figura 01** - Comparação das três curvas granulométricas da alimentação, representantes dos meses outubro, novembro e janeiro.

Os Resultados obtidos utilizando-se a metodologia do Moinho de Torque serão mostrados no tópico de Verificação da correlação entre as duas metodologias consideradas.

## 5. VERIFICAÇÃO DA CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS VALORES DE WI

A correlação entre os valores de WI obtidos por diferentes metodologias e a correlação entre WI operacional da usina com cada metodologia é demonstrada na Tabela II.

**Tabela II** - Correlação entre os valores de WI.

Data	Correlação entre valores de WI		Correlação Linear	Interpretação
	WI <sub>OP</sub>	WI <sub>BOND</sub>		
Outubro/09	15,31	21,37	0,95	Correlação Forte
Novembro/09	11,63	18,05		
Janeiro/2010	13,05	18,28		
	WI <sub>TORQUE</sub>	WI <sub>BOND</sub>	-0,29	Correlação Moderada a Fraca.
Outubro/09	13,78	21,37		
Novembro/09	13,09	18,05		
Janeiro/2010	17,2	18,28	0,03	Correlação Fraca
	WI <sub>OP</sub>	WI <sub>TORQUE</sub>		
Outubro/09	15,31	13,78		
Novembro/09	11,63	13,09		
Janeiro/2010	13,05	17,2		

A Tabela II mostra que existe forte correlação linear entre os valores de WI de Bond e WI Operacional da usina. Os três testes de WI foram feitos com duplicata e foi calculado o coeficiente de variação entre os testes e suas respectivas duplicatas, como o mostrado na Tabela III.

**Tabela III** - Coeficientes de variação entre os testes de WI e suas duplicatas.

Mês	WI <sub>BOND</sub>	Média	Coeficiente de Variação
Outubro	20,85	21,38	3,47
	21,90		
Novembro	17,91	18,05	1,18
	18,20		
Janeiro	18,74	18,29	3,52
	17,83		

## 6. CONCLUSÃO

O ensaio para determinação do “*Work Index*” de Bond é um teste padronizado, laborioso e segue muitas etapas. No entanto, é o método mais utilizado para dimensionamento e otimização de processos de moagem.

A metodologia de Bond é bem mais complexa e demorada, enquanto que a metodologia do moinho de Torque é um método simplificado que busca alcançar valores de WI de maneira que se molde à rotina operacional de um laboratório de processo. As diferenças nos procedimentos de cada metodologia causam variações no valor do *Work Index*, como mostrado na análise de correlação entre os valores de WI das metodologias de Bond e de Torque.

Assim, os valores de WI de Bond apresentaram forte correlação linear com o WI operacional da Usina do Sossego, o que reforça a consistência do método de Bond e boa amostragem da Usina. Não existiu correlação linear entre os valores de WI para as metodologias de Bond e de Torque, como o observado neste estudo. Entretanto, a metodologia com o moinho de Torque pode ser promissora, bastando ajustes nos procedimentos experimentais para se obter uma melhor correlação entre os valores de WI de Bond e WI de Torque. Com uma maior quantidade de dados, todavia, as conclusões serão mais consistentes e tornará possível verificar se existe uma tendência dos valores de WI (de cada metodologia) aumentarem ou diminuir a correlação, de acordo com ajustes na metodologia de Torque.

## 7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Moinho de Bolas. Determinação do Índice de Trabalho: NBR 11376. Rio de Janeiro, 1990.
- BERALDO, J.L., Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1987, p. 1-47.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem. 3ª Ed. Volume 3. São Paulo: Signus Editora, 2006.
- DUTRA, R.; Beneficiamento de Minerais Industriais. II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2008.
- GALERY, R. Fragmentação de Minérios: Primeira Parte. Notas de Aula. Universidade Federal de Minas Gerais: DEMIN, 2006.
- LUZ, A. B.;; ALMEIDA, S. L. M. FIGUEIRA, H.V.O.; Tratamento de Minérios. 4ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.
- PEREIRA, P. E. C., *Comparação entre Diferentes Testes de Moagem SAG para Determinação da Energia Unitária para a Cominuição de Minérios Sulfetados de Cobre*. UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- WILLS, B. A., Mineral Processing Technology: Na introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7 ed., The University of Queensland, Austrália, 2007.