

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	15
2.1	OBJETIVO.....	15
2.2	RELEVÂNCIA.....	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	COMINUIÇÃO.....	17
3.2	CONSUMO DE POTÊNCIA NA MOAGEM – LEIS DE KICK, RITTINGER E BOND.....	19
3.2.1	Fatores de Correção	25
3.3	MOINHOS REVOLVENTES.....	28
3.4	VARIÁVEIS OPERACIONAIS DO MOINHO DE BOLAS.....	29
4	METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TRABALHO DE BOND	32
4.1	MÉTODO DE BOND PARA A DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TRABALHO ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DA TERCEIRA LEI DA COMINUIÇÃO.....	34
4.2	DETERMINAÇÃO DE WI DO MINÉRIO ATRAVÉS DO MOINHO DE TORQUE.....	34
5	MATERIAIS E MÉTODOS	35
5.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	36
5.2	MOAGEM E ANÁLISE DO PRODUTO E ANÁLISE DO PRODUTO DA MOAGEM.....	38
5.3	DETERMINAÇÃO DA MOABILIDADE E CÁLCULO DO DESVIO.....	40
5.4	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TRABALHO (WI).....	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BOND.....	43
6.1.1	Primeiro Ensaio de Bond	44
6.1.2	Segundo Ensaio de Bond	47
6.1.3	Terceiro Ensaio de Bond	49
7	VERIFICAÇÃO DA CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS VALORES DE WI	53
8	CONCLUSÕES	57
9	RECOMENDAÇÕES	58
10	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERENCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A cominuição ou fragmentação é uma etapa muito importante no processamento da maioria dos minerais. Os processos de cominuição são divididos em duas classes distintas: britagem, que é a cominuição inicial, e moagem, que é o último estágio do processo de fragmentação, do centímetro ao micrômetro.

A moagem se desenvolve em estágios subseqüentes e, considerando as relações de redução adequadas, envolve os mecanismos de impacto, compressão e cisalhamento. Os equipamentos mais usados são os moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, de rolos e de impacto.

A moagem é realizada com objetivo de liberar as espécies minerais, visando às operações de concentração subseqüentes, adequando-as à utilização posterior. Além disso, 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. 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.

De acordo com a definição da ABNT, o Índice de Trabalho para moinho de bolas corresponde numericamente ao trabalho necessário para reduzir uma tonelada de minério, desde um tamanho teoricamente infinito, até 80% da massa passante em 106 μ m. Além disso, representa a resistência do minério à moagem e possibilita o cálculo da energia necessária para se moer o minério.

Assim, a determinação do *Work Index* é um método muito utilizado e um dos primeiros passos, em escala laboratorial, para avaliação dos requisitos de energia para moinhos de bolas e para escolha do equipamento de cominuição em escala industrial.

2 OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO

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.

2.2. RELEVÂNCIA

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.

A relevância do trabalho esta associada a dois aspectos: (i) Econômicos, uma vez que o circuito de moagem é a etapa mais cara do beneficiamento de minérios e determinando-se valores de WI de forma antecipada e rápida o engenheiro tratamentista recebe informações que possibilitarão um ajuste da moagem que proporcione ganhos em termos de dosagem de bolas, consumo de energia, eficiência em grau de redução e adequação do produto para a etapa de flotação; e (ii) Tecnológicos, já que procura correlacionar os valores de WI de Bond com os valores de WI operacional e WI de procedimentos laboratoriais mais simples, gerando métodos mais simplificados e diretos de determinação do índice de trabalho.

É importante ressaltar que a moagem em moinho de bolas faz parte da realidade operacional da maioria das usinas de beneficiamento de minério.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 COMINUIÇÃO

A cominuição é a fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a forças mecânicas. As deformações provocam a geração de tensões internas. O processo elementar para redução de tamanho de partículas é a quebra, que tem como resultado a formação de fragmentos de diferentes tamanhos e de forma irregular. A quebra é provocada por elevações de tensões em falhas da estrutura cristalina. A partícula quebra quando as elevações de tensões nas extremidades das falhas atingem um nível crítico, iniciando-se a sua propagação não-estável (WELLENKAMP, 1999).

Um material ideal se rompe quando o limite de ruptura é ultrapassado. Isto é, quando se rompem todas as ligações atômicas de certo plano. Isso não ocorre facilmente com rochas e minerais, pois eles são materiais heterogêneos, anisotrópicos e contém falhas, fraturas, tanto em escala micro quanto macroscópica (WILLS, 2007).

A cominuição ou redução de tamanho é uma etapa importante no processamento da maioria dos minerais, visando à produção de partículas com tamanho e formato pré-requeridos, liberação dos minerais úteis passíveis de concentração e o aumento da superfície específica, habilitando para processos químicos subseqüentes (DUTRA, 2008).

O primeiro passo na liberação é a recuperação das espécies valiosas, ou seja, a fragmentação das rochas mineralizadas a tamanhos pequenos, tipicamente menores que 0,2 mm, de maneira que as espécies valiosas resultem “liberadas” e assim, superficialmente expostas para etapas posteriores de processamento, tais como flotação e lixiviação (MOLY-COP TOOLS, 2008).

A Cominuição ocorre através da aplicação de compressão, criação de impacto e atrito. As partículas são submetidas a esforços conforme a Figura 01.

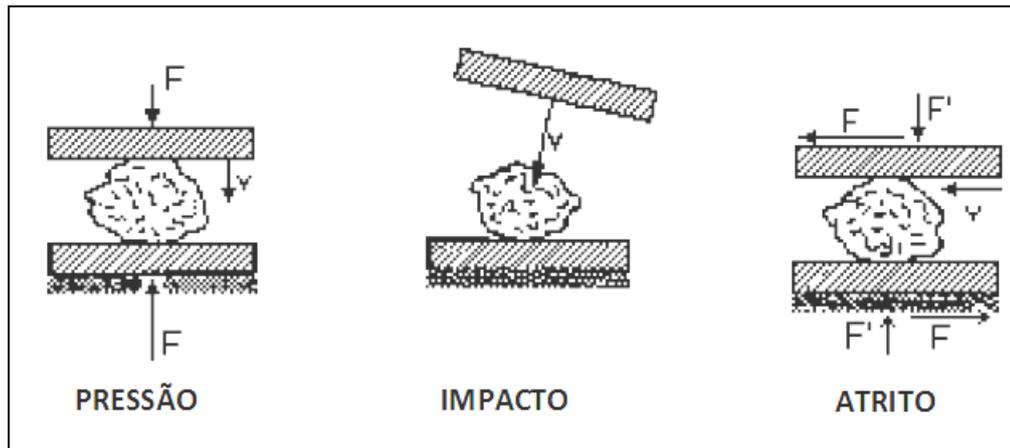


FIGURA 01- Detalhes de esforços nas partículas entre dois planos, quando estas são submetidas aos processos de cominuição.

Fonte: WELLENKAMP (1999).

O Impacto é o mecanismo mais eficiente em termos de utilização da energia. Ocorre quando as forças de fragmentação são aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas (BERALDO, 1987). É um mecanismo observado nos britadores de impacto e nas áreas de impacto dos corpos moedores no interior dos moinhos revolventes.

Quando partículas irregulares são sujeitas à quebra por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho: partículas grossas resultante da quebra induzida pela tensão, e partículas finas da quebra por compressão no local onde a carga é aplicada (LUZ et al., 2004). A compressão é observada nos britadores de mandíbulas, britadores giratórios e cônicos. Nos moinhos revolventes, está associada à compressão das partículas entre corpos moedores ou à compressão entre as partículas.

De acordo com BERALDO (1987), a abrasão é o resultado do atrito entre as partículas do minério e entre corpos moedores e partículas. Esse mecanismo provoca o aparecimento de pequenas fraturas e o surgimento de partículas de distribuição granulométrica fina ao redor da partícula original.

As regiões do moinho onde ocorrem os diferentes processos de quebra são demonstradas na Figura 02.

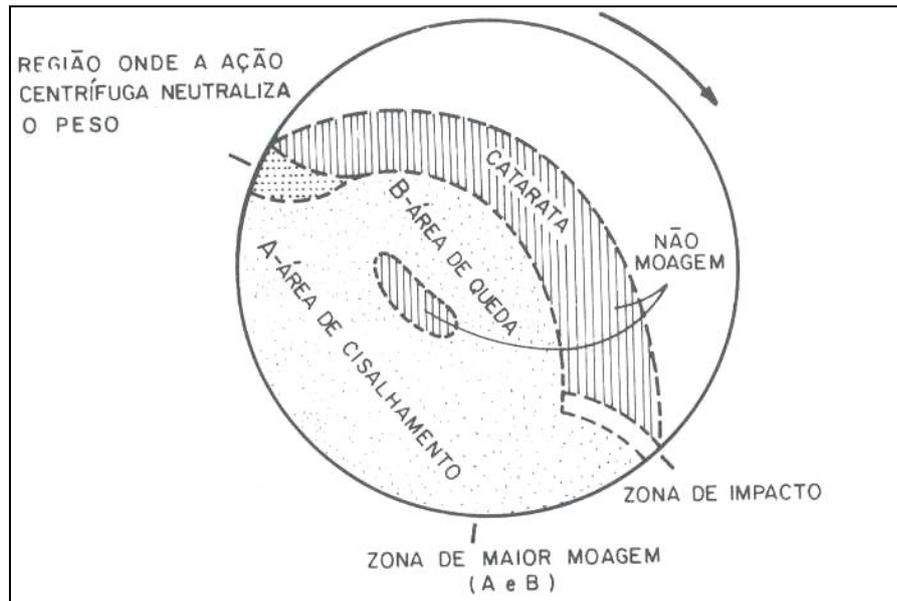


FIGURA 02 – Regiões do moinho onde ocorrem os diferentes processos de quebra.
Fonte: Beraldo (1987).

Os processos de redução de tamanho são baseados em probabilidades estatísticas. O desafio para desenvolver um circuito de cominuição é selecionar condições para aumentar a probabilidade de quebra de partículas de determinado tamanho para gerar produtos no tamanho desejado, com o menor consumo energético possível (PEREIRA, 2004).

3.2 CONSUMO DE POTÊNCIA NA MOAGEM – LEIS DE KICK, RITTINGER E BOND

A moagem é a área da fragmentação que requer maiores investimentos, pois apresenta os maiores gastos de energia, e é considerada uma operação importante para o bom desempenho de uma instalação de tratamento. A fragmentação de blocos ou maciços rochosos é um processo que é realizado em estágios. O desmonte de rochas com o auxílio de explosivos constitui a primeira etapa de fragmentação (LUZ et al., 2004).

Na fragmentação de partículas maiores, é necessária uma grande quantidade de energia para a fragmentação. Por outro lado, a quantidade de energia necessária

por unidade de massa (kWh/t) é pequena. Ao reduzir o tamanho das partículas, reduz-se também a energia necessária para a sua quebra, entretanto, a energia aplicada por unidade de massa aumenta.

Os processos industriais de fragmentação de partículas são bastante complexos e apresentam baixa eficiência com relação à energia aplicada. A quantidade de energia elétrica consumida na operação dos equipamentos é muito maior que aquela de fato necessária para fragmentar as partículas (CHAVES e PERES, 2006).

O estudo da fragmentação pode gerar muitos ganhos para uma usina de beneficiamento, pois qualquer melhoramento na operação poderá acarretar uma importante economia no processo. Além disso, busca modelos matemáticos, assim como a relação entre os parâmetros desses modelos e as variáveis operacionais. Esse modelamento pode ser utilizado em trabalhos de otimização, controle do processo e ainda ser de grande utilidade no dimensionamento de unidades industriais (PEREIRA, 2004)

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.

A relação estabelecida por *Peter Ritter Von Rittinger* afirma que a área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido. Esta lei aplica-se principalmente na moagem fina, mostrada na Equação 01.

$$E = K(S_1 - S_0) \quad (01)$$

Sendo:

E = energia específica;

K = fator de proporcionalidade;

S₁ = área do produto;

S_0 = área inicial.

A Lei de *Friedrich Kick* ou *Segunda Lei da Cominuição* é adequada para reduções de partículas de grande tamanho, como ocorre na britagem, e expressa o seguinte: “o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas”, de acordo com a Equação 02.

$$E = C \log \frac{D_0}{D_1} \quad (02)$$

Sendo:

C = constante;

D_0 = diâmetro inicial;

D_1 = diâmetro final.

Como os postulados de Rittinger e Kick não satisfaziam a todos os casos encontrados na prática e como se necessitava na indústria de algumas regras para classificar os materiais segundo as respostas à fragmentação, 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 03:

$$E = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{A_{80}}} \right) \quad (03)$$

Em que:

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

WI: Índice de Trabalho (Work index);

P_{80} : abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80% da massa do produto;

A_{80} : abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80% da massa da alimentação.

A lei de Bond conduz a estimativas mais realistas e é a única lei capaz de prever o consumo de equipamentos que ainda não foram instalados. Além disso, Bond padronizou uma série de procedimentos para a determinação da energia de

fragmentação, convencionou que os tamanhos deveriam ser dados em micrômetros (μm) e referidos como sendo os tamanhos das aberturas de peneira que deixam passar 80% dos respectivos produtos. Além disso, propôs que o coeficiente de proporcionalidade, ou coeficiente de trabalho, fosse chamado de “*Work Index*” (GALLERY, 2006).

Assim, baseado em dados em Escala de Planta, é possível obter o mesmo índice equivalente, através da Equação 04:

$$(WI)_{Op} = \frac{E}{10\left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{A_{80}}\right)} \quad (04)$$

Onde:

$(WI)_{Op}$: Work índice operacional;

E: Consumo médio de energia em kWh;

WI: Índice de Trabalho (Work índice);

P_{80} : abertura da peneira, em micrometros (μm), através da qual passam 80% da massa do produto;

A_{80} : abertura da peneira, em micrometros (μm), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

O Índice de Bond pode ser erroneamente associado com a dureza intrínseca do mineral, melhor caracterizada pela Escala de dureza de Mohs. O WI permite estimar apenas a energia específica requerida para uma determinada tarefa de moagem. A Dureza guarda relação com as taxas de desgaste dos elementos de desgaste (bolas e revestimentos) ao contrário do Índice de Bond. De fato, Bond desenvolveu um ensaio totalmente diferente para caracterizar a Abrasividade dos minerais e estabeleceu que não existe relação alguma entre o WI e as taxas de consumo de aço observadas (MOLY-COP TOOLS, 2008).

Valores típicos de WI e uma medida relativa de seu significado podem ser observados na Tabela 01.

TABELA 01: Valores típicos de WI e seus significados.

Propriedade	Macio (Friável)	Médio	Duro	Muito Duro
WI de Bond (KWh/t)	7 - 9	9 - 14	14 - 20	> 20

Além do método de Bond, adequado para reduções de tamanho como ocorrem na prática industrial de moagem, atualmente tem-se procurado estudar o processo de cominuição sob o enfoque da cinética de fragmentação das partículas, buscando-se o desenvolvimento de modelos de processos, bem como o estudo da relação entre os parâmetros desses modelos e as variáveis operacionais. Esses modelos podem ser utilizados em trabalhos de otimização e de controle de processos, e também ser útil no dimensionamento de instalações (NEVES, 2005).

A Lei Geral da Fragmentação, proposta por Charles (1957), estabelece que a relação entre a variação do diâmetro das partículas e da energia é inversamente proporcional a uma fração exponencial do diâmetro, demonstrando que as três leis da fragmentação podem ser expressas em uma só, de acordo com a Equação 05.

$$dE = -K \frac{dx}{x^n} \quad (05)$$

Onde:

E = energia aplicada a uma massa unitária de minério;

x = diâmetro das partículas;

k e n = constantes (função do minério).

Integrando-se a Equação (05), para $x \neq 1$, tem-se a Equação 06:

$$E = K \left(\frac{1}{x_2^{n-1}} - \frac{1}{x_1^{n-1}} \right) \quad (06)$$

Em que:

n = 1: Lei de Kick (granulometria grossa);

n = 2: Lei de Rittinger (granulometria fina);

n = 1,5: Lei de Bond (granulometria intermediária).

O gráfico da Figura 03 mostra a forma geral apresentada pelas relações envolvendo energia e redução de tamanho. Observa-se que o expoente “n” varia significativamente dentro da ampla faixa de tamanhos apresentada.

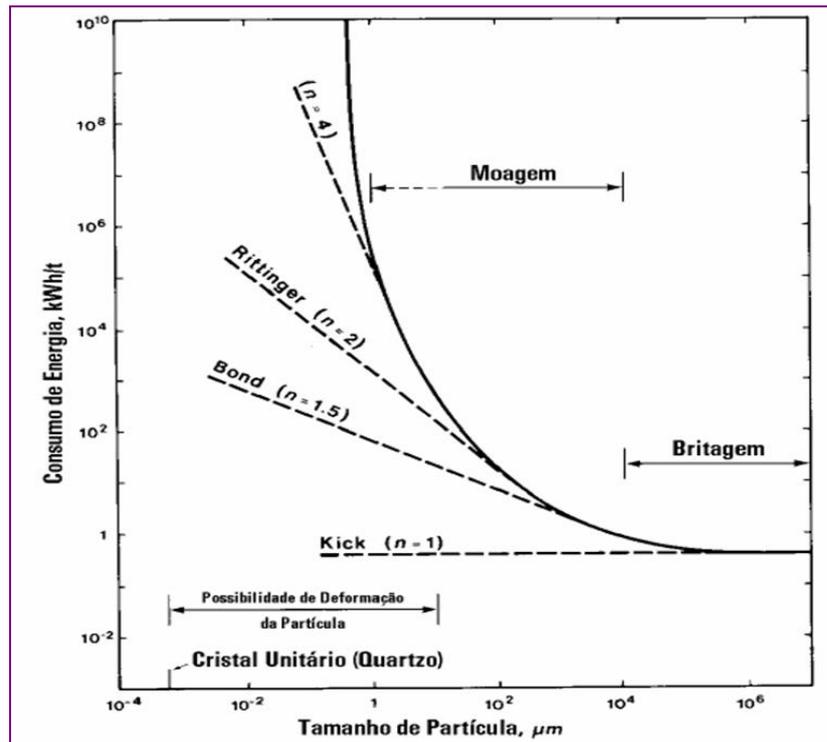


FIGURA 03– Regiões de validade das três Leis da Cominuição.

Fonte: GALERY (2006)

Charles constatou que K não é constante, mas sim variável com a faixa de trabalho de cominuição. Traçando-se a curva da sua função $E = f(x)$, passa-se sucessivamente pela fórmula de Kick, de Bond, e finalmente pela fórmula de Rittinger (CHAVES e PERES, 2006).

Ainda hoje, as leis de Kick, Rittinger e Bond fornecem boas estimativas preliminares para cálculo de energia necessária às etapas de britagem, moagem e moagem fina, respectivamente. Individualmente, as contribuições de Bond resultaram num método de cálculo de potência consumida por moinhos, ensaios de caracterização de minérios quanto à abrasão e britagem, além de cálculo de tamanhos máximos de corpos moedores (DELBONI, 2004).

3.2.1. Fatores de Correção

De acordo com 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. Estes fatores são:

- **Ef₁** - Moagem a Seco: Para a moagem a seco utiliza-se o fator **Ef₁ = 1,3** e se a moagem é a úmido o fator é de 1,0.
- **Ef₂** - Circuito aberto em moinhos de bolas: A moagem em circuito aberto requer uma energia extra. Na Tabela 02 encontra-se o fator de ineficiência determinado relacionando-se a percentagem retida na malha de controle.

TABELA 02– Fator de Ineficiência em Circuito Aberto.

%Passante na malha de controle	50	60	70	80	90	92	95	98
Fator	1,035	1,05	1,10	1,20	1,40	1,46	1,57	1,70

- **Ef₃** - Fator de diâmetro: Até um diâmetro de 3,81 m, a eficiência do moinho cresce e acima de 3,81 m esta eficiência se mantém constante. Consideram-se as Equações 07 e 08 para valores inferiores e superiores a 3,81 m, respectivamente.

$$Ef_3 = \left(\frac{2,44}{D}\right)^{0,2}, \text{ para } D < 3,81 \text{ m} \quad (07)$$

e,

$$Ef_3 = 0,914, \text{ para } D > 3,81 \text{ m} \quad (08)$$

- **Ef₄** - Fator de *Oversize*: Quando a alimentação contém partículas muito grandes. Dessa forma se aplica um fator relativo à ineficiência para moagem dessas partículas. O tamanho ótimo para alimentação (FO) é definido de acordo com as Equações 09 e 10:

a) Moinho de barras:

$$FO = 16000 \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad (09)$$

b) Moinho de bolas:

$$FO = 4000 \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad (10)$$

A relação de redução (Rr) é definida pela Equação 11, sendo F (granulometria da alimentação) e P (granulometria do produto).

$$Rr = \frac{F}{P} \quad (11)$$

De posse dos valores Rr e FO calcula-se o Ef₄ de acordo com a Equação 12:

$$Ef_4 = \frac{Rr + (WI - 7) + \left(\frac{F - FO}{FO} \right)}{Rr} \quad (12)$$

O WI a ser utilizado para os cálculos do Ef₄ é aquele determinado para moinho de barras mesmo que o cálculo do dimensionamento esteja sendo feito para moinho de bolas.

- **Ef₅** - Material fino: Fator utilizado para produtos com 80 % passante em 74 μm e é calculado pela Equação 13.

$$Ef_5 = \frac{P + 10,3}{1,145P} \quad (13)$$

- **Ef₆** - Relação de redução em moinho de barras: Deve ser aplicado a moinho de barras, em circuito aberto, sempre que a relação de redução estiver fora do intervalo $R_{r0} - 2 \leq Rr \leq R_{r0} + 2$, sendo R_{r0} a relação ótima de redução definida conforme a Equação 14.

$$R_{r0} = 8 + \frac{5L}{D} \quad (14)$$

L = comprimento das barras;

D = diâmetro do moinho interno ao revestimento.

Deste modo, calcula-se o Ef₆ através da Equação 15:

$$Ef_6 = 1 + \frac{(R-R_{ro})^2}{150} \quad (15)$$

Se a relação de redução for alta, não é necessária a utilização do fator Ef_6 . No entanto, seu uso é recomendado sempre que o WI do minério for superior a 7 kWh/t.

▪ **Ef_7** - Baixa relação de redução em moinhos de bolas: O uso deste fator só acontece quando a relação de redução no moinho de bolas é inferior a 6. Entretanto, normalmente, nesse tipo de moinho a relação de redução é muito maior que este valor. Ef_7 é definido conforme a Equação 16.

$$Ef_7 = \frac{2(Rr-1,35)+0,26}{(Rr-1,35)} \quad (16)$$

Este fator é mais aplicado no caso de remoagem.

▪ **Ef_8** - Moagem em moinho de barras: varia de acordo com a forma de preparação da alimentação do moinho, como mostra a Tabela 03 – Fator de Correção (Ef_8) em função da alimentação da moagem.

TABELA 03 - Fator de Correção (Ef_8) em função da alimentação da moagem.

Moinho de barras em circuito único, aberto		Moinho de barras em circuito barra/bolas	
Alimentação do moinho	Ef_8	Alimentação do moinho	Ef_8
Proveniente de circuito aberto de britagem	1,4	Proveniente de circuito aberto de britagem	1,2
Proveniente de circuito fechado de britagem	1,2	Proveniente de circuito fechado de britagem	1,0

3.3 MOINHOS REVOLVENTES

A função principal de um moinho é a aplicação de forças mecânicas ao material, provocando a quebra das partículas. Para isso, as partículas são submetidas a um dos esforços ou a uma combinação destes (WELLENKAMP, 1999). Os equipamentos de moagem mais usados são os moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, de rolos e de impacto.

Moinhos Revolventes Tubulares (Figura 04) são cilindros rotativos onde é realizada a fragmentação em seu interior pela ação de corpos moedores. Os corpos moedores podem ser barras cilíndricas, bolas, *cylpebs* (tronco de cone) ou fragmentos do minério. A ação de queda dos corpos moedores é chamada cascata ou catarata, conforme a rotação do moinho seja mais lenta ou mais rápida.

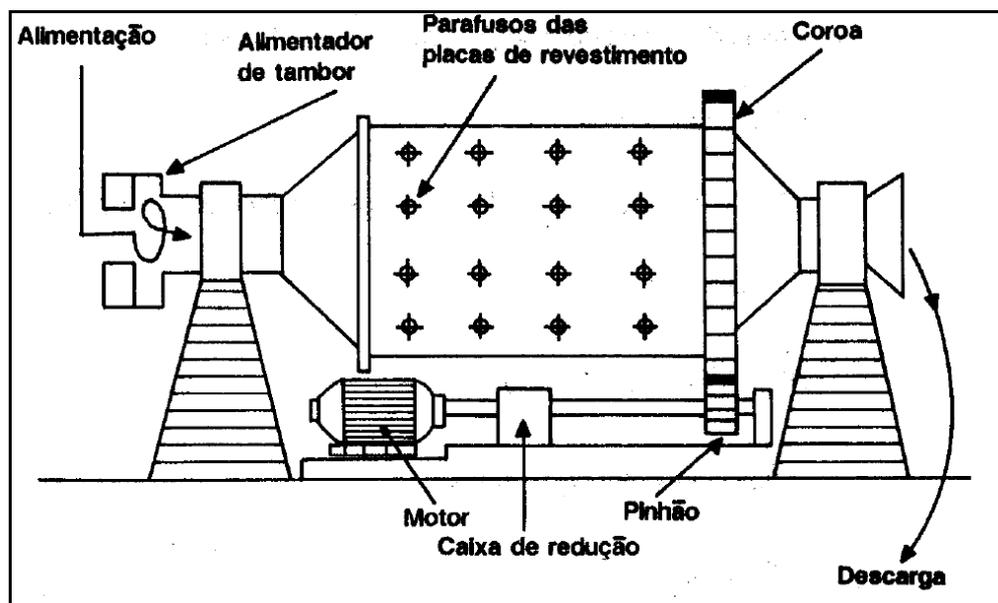


FIGURA 04 – Moinho revolvente.

Fonte: LUZ et. al.(2004)

O moinho de bolas é usado em um único estágio, quando a granulometria da alimentação deve estar entre 10 e 15 mm. Pode ser usado no segundo estágio de moagem precedidos de moinhos de barras ou autógeno/semi-autógeno ou até mesmo como moinho primário, o que não é muito comum na prática. Podem ainda

ser utilizados na remoagem. Geralmente tem um grau de enchimento em torno de 30 a 40% de bolas. As bolas podem ser de aço, fundidas ou forjadas, com dureza variável, dependendo da fabricação e uso. Em geral as bolas que geram menor custo operacional e melhor performance são selecionados, mostrando um equilíbrio entre taxa de desgaste e custos (PEREIRA, 2004).

O moinho de barras, um moinho horizontal rotativo caracterizado pelo uso das barras para moagem, é utilizado para moagem de minérios, carvão, coque e outros materiais tanto para aplicações a úmido quanto a seco.

Os moinhos de seixos são moinhos que utilizam seixos competentes em lugar de bolas. São freqüentemente utilizados para moagem de materiais que não podem ser contaminados por corpos moedores metálicos, neste caso utilizando corpos moedores de ágata, sílex, coríndon ou cerâmica. Devido à menor densidade dos seixos, estes moinhos possuem menor capacidade de moagem do que os moinhos de bolas.

A Moagem Autógena/Semi-autógena usa fragmentos grandes do próprio minério ou mistura de fragmentos e bolas como corpos moedores. Possibilitam redução de custo de corpos moedores e eventual eliminação de estágios de britagem.

O Moinho de Bolas - Tipo Bond, em função da sua finalidade (ensaios de WI), trabalha em circuito fechado, em moagem a seco, sob velocidade de rotação de até 70 rpm. No equilíbrio produz uma carga circulante equivalente a 250%. O Moinho possui características e dimensões padronizadas pré-definidas de acordo com a norma da ABNT - NBR 11376. Este moinho possui diâmetro e comprimento iguais a 12 polegadas (30,48 cm). O tambor é de aço inoxidável, com superfície interna lisa e sem revestimento, possui abertura tipo porta para carga e descarga.

3.4 VARIÁVEIS OPERACIONAIS DO MOINHO DE BOLAS

As variáveis operacionais são os parâmetros que exercem a maior influência no processo e, conseqüentemente, nos resultados obtidos. De acordo com Chaves

(2006), na moagem em moinhos de carga cadente, as variáveis operacionais são a quantidade de corpos moedores carregada ao moinho, tamanho dos corpos moedores, a velocidade de rotação, que é função do tipo de moinho e é afetada pela porcentagem volumétrica da carga, e a porcentagem de sólidos da polpa, quando se trata de moagem a úmido.

De acordo com a velocidade de operação do moinho, as bolas apresentam diferentes comportamentos, à medida que se varia a velocidade de rotação. A baixa velocidade, as bolas têm o movimento de rolamento ou cascadeamento, mostrados na Figura 05.

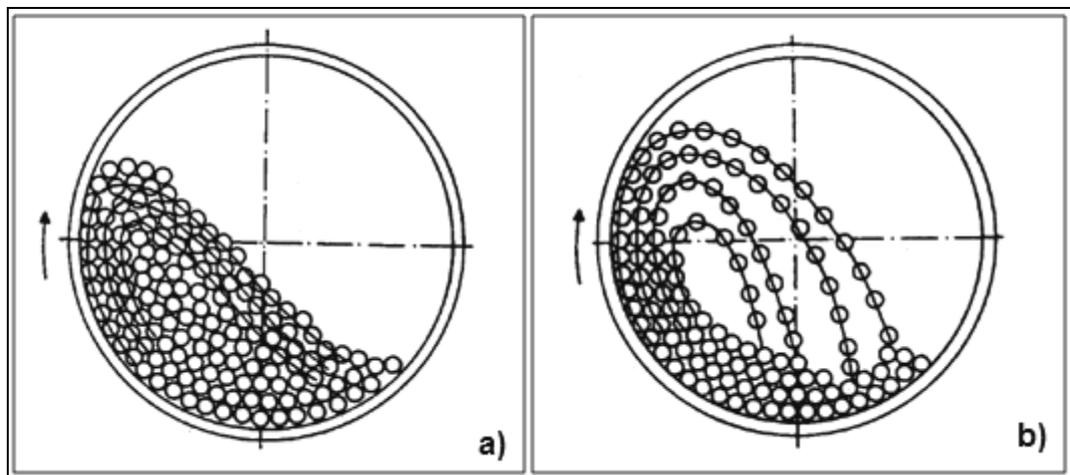


FIGURA 05 - Em a), Moagem em regime de cascata, e em b), moagem em regime de catarata.

Fonte: LUZ et. al.(2004)

Conforme aumenta a velocidade de rotação do moinho, as bolas passam a ser lançadas para cima e a percorrer uma trajetória parabólica, caindo sobre as outras bolas (movimento de catarata). Aumentando ainda mais a rotação, as bolas ultrapassam o leito de bolas e começam a cair sobre o revestimento do lado oposto, e se a velocidade continuar aumentando, pode atingir uma situação em que a carga é centrifugada contra a carcaça do moinho e fica estacionária em relação a esta (*Velocidade crítica*). A quantidade de carga dentro do moinho e o perfil do revestimento interno também afetam a trajetória das bolas (CHAVES, 2006).

A moagem pode ser realizada a seco ou a úmido, dependendo do processo subsequente e da natureza do material a ser moído. A quantidade de água adicionada afeta a viscosidade e a densidade da polpa e, deste modo, a ação

mecânica das bolas. A porcentagem de sólidos é uma variável que depende da granulometria da alimentação. A utilização de polpa muito diluída leva a uma moagem pouco eficiente, pois as partículas sólidas se encontram muito dispersas na polpa sendo poucos os choques efetivos entre elas e as bolas. Elevando-se a porcentagem de sólidos há um aumento da eficiência da moagem, até certo ponto, com redução considerável do consumo de bolas. A ausência de finos diminui a viscosidade da polpa e piora o desempenho da moagem. O tamanho dos corpos moedores afeta a eficiência da cominuição e a capacidade do moinho. O tamanho máximo dos corpos moedores possui uma relação com as dimensões (relação L/D) do moinho, e com o tamanho da alimentação.

No Moinho de Bolas Tipo Bond, as variáveis operacionais são expressas em termos de velocidade de rotação, número de rotações e da carga moedora dentro do moinho, a qual é pré-definida para o equipamento.

4 METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TRABALHO DE BOND

4.1 MÉTODO DE BOND PARA DETERMINAÇÃO DO WI ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DA TERCEIRA LEI DA COMINUIÇÃO

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 por um conjunto de 285 bolas de aço com faixa de tamanho padrão pré-determinado (43 bolas/36,5mm; 67 bolas/30,2 mm; 10 bolas/25,4mm; 71 bolas/19,1mm; 94 bolas/15,9mm). De acordo com a Norma da ABNT, NBR 11376, as etapas da metodologia de Bond para a determinação do WI são:

1. Britar 20 kg de minério, todo abaixo de 3,4 mm, minimizando a produção de finos. Secar e homogeneizar.
2. Colocar o minério em proveta graduada de 1litro completar o volume até 700 mililitros e pesar este minério. Repetir esta operação três vezes e tomar o valor médio. Este valor é a massa da alimentação do ensaio (M) e é dado em gramas.
3. Proceder à análise granulométrica da alimentação. Determinar A_{80} , ou seja, a abertura das peneiras onde 80% da massa da alimentação do moinho é passante.
4. Calcular a massa de alimentação a ser acrescentada quando em regime, que é igual a $M/3,5$, com o objetivo de se atingir uma carga circulante de 250%.
5. Escolher a abertura da malha de classificação do ensaio, que será aquela que fechará o circuito de moagem industrialmente ou usar a peneira ABNT 150 μ m.
6. Determinar por peneiramento a massa passante na malha teste. Este é o passante inicial de primeiro ciclo.

7. Carregar o moinho com a carga de bolas e a alimentação inicial (M). Para o primeiro ciclo, moer por um número definido de rotações (100 ou 200, dependendo das características do minério).
8. Descarregar o moinho e peneirar o minério na malha teste. Determinar a massa retida. A massa do minério passante (M_p) é calculada por diferença, evitando-se a introdução de erros por perda de ultrafinos. Esta é a alimentação nova a acrescentar para o próximo ciclo. Descartar o minério passante.
9. Calcular o passante líquido gerado no ciclo. ($PL = M_p - M_a$)
10. Recompôr a alimentação para o ciclo seguinte, adicionando-se à massa retida massa correspondente ao passante na malha teste do ciclo anterior. Utiliza-se para isto de incremento tirado da amostra inicial.
11. Calcular a massa passante em A_m contida na alimentação nova a partir de análises granulométricas ou de peneiramento de controle. Este é o valor da massa passante na malha teste.
12. Calcular o desvio (diferença entre o valor da alimentação nova a acrescentar, M_p , e a massa de alimentação a ser acrescentada quando em regime, M_{ar}).
13. Dividir a “quantidade líquida passante”, pelo respectivo número de rotações. Este valor é denominado moabilidade e corresponde à massa em gramas passante na malha teste, gerada em cada rotação do moinho.
14. Carregar novamente o moinho. Calcular o número de rotações para o ciclo seguinte. Proceder à moagem com o número de rotações calculado.
15. Prosseguir o número de ciclos até que os valores de Moabilidade atinjam equilíbrio ou invertam a tendência de crescimento ou decrescimento, em três ciclos. A verificação deste equilíbrio é feita, extraíndo-se a média aritmética dos três últimos valores de M_{ob_i} , não devendo a diferença entre o maior e o menor valor ser superior a 3% em relação ao valor médio.
16. Uma vez alcançado o equilíbrio, proceder à análise granulométrica do minério passante em A_m do último ciclo. Calcular o P_{80} . O valor do índice de trabalho é calculado.
17. Conhecendo-se o índice de trabalho, pode-se calcular a energia necessária para moer uma tonelada de material.

4.2 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE WI ATRAVÉS DO MOINHO DE TORQUE

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). As etapas para a determinação do WI no Moinho de Torque são as seguintes:

1. Britar a amostra abaixo de 2 milímetros e homogeneizar.
2. Realizar análise granulométrica da alimentação (2000 gramas) e calcular o A_{80} .
3. Colocar a amostra mais 857 mililitros de água para perfazer 70% de sólidos dentro do moinho, colocar as bolas fechar a tampa do cilindro do moinho;
4. Ligar o computador, abrir o software do moinho de torque, inserir o nome da amostra e definir o tempo de teste em 12,5 minutos.
5. Iniciar teste.
6. Descarregar a polpa no recipiente de coleta.
7. Analisar a granulometria do produto, calculando-se o P_{80} e verificar a percentagem de sólidos.
8. Calcular o WI no Software do Moinho de Torque.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para o teste completo de Bond adotada é descrita na norma NBR 11376 (MB 3253) que prescreve o método de determinação do Índice de Trabalho (WI) de moinho de bolas através da Terceira Lei da Cominuição.

Os ensaios para determinar o WI, em laboratório, são conduzidos no moinho de Bond, usado para essa finalidade. A moagem é conduzida a seco, em circuito fechado, com a carga circulante de 250%, quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio.

O minério de cobre utilizado para os testes serão 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.

A Figura 06 mostra um esquema dos ensaios de Bond.

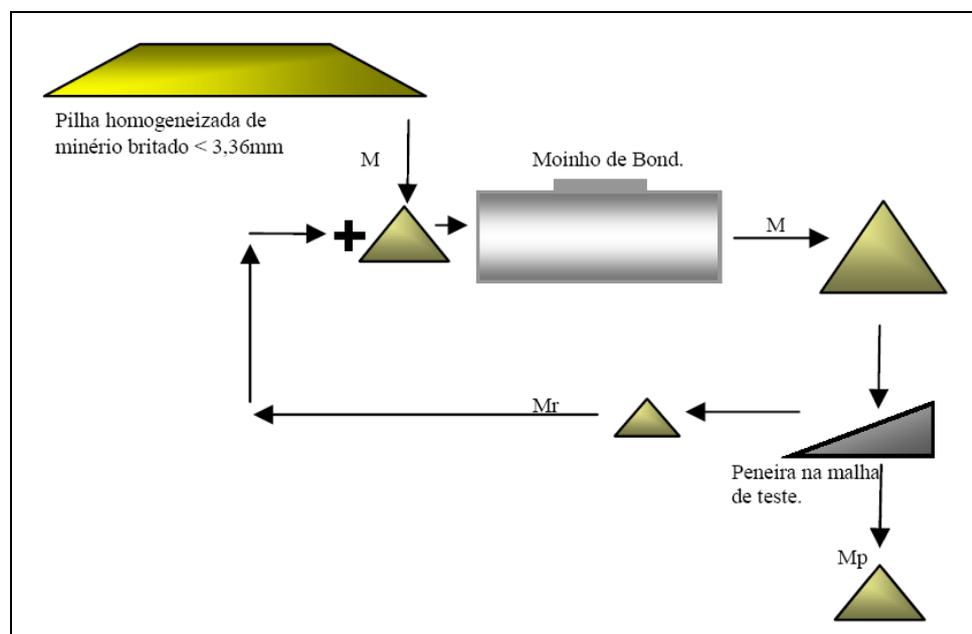


FIGURA 06- Representação esquemática de ensaios de Bond.
Fonte: ALVES E SCHNEIDER (2007).

5.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Cerca de 20 kg de minério foi britado abaixo de 3,4 mm, minimizando a produção de finos, passando por secagem em estufa. Em seguida, a amostra global foi homogeneizada em pilha prismática de 160 cm. A densidade aparente do minério foi medida em triplicata, e a massa correspondente a 700 ml determinada. Essa foi a massa de alimentação inicial do teste (M). A medida da alimentação inicial foi determinada com o auxílio de uma proveta graduada de 1 litro. A Figura 07 mostra os procedimentos de homogeneização em pilha prismática e a determinação da alimentação inicial dos testes, respectivamente.

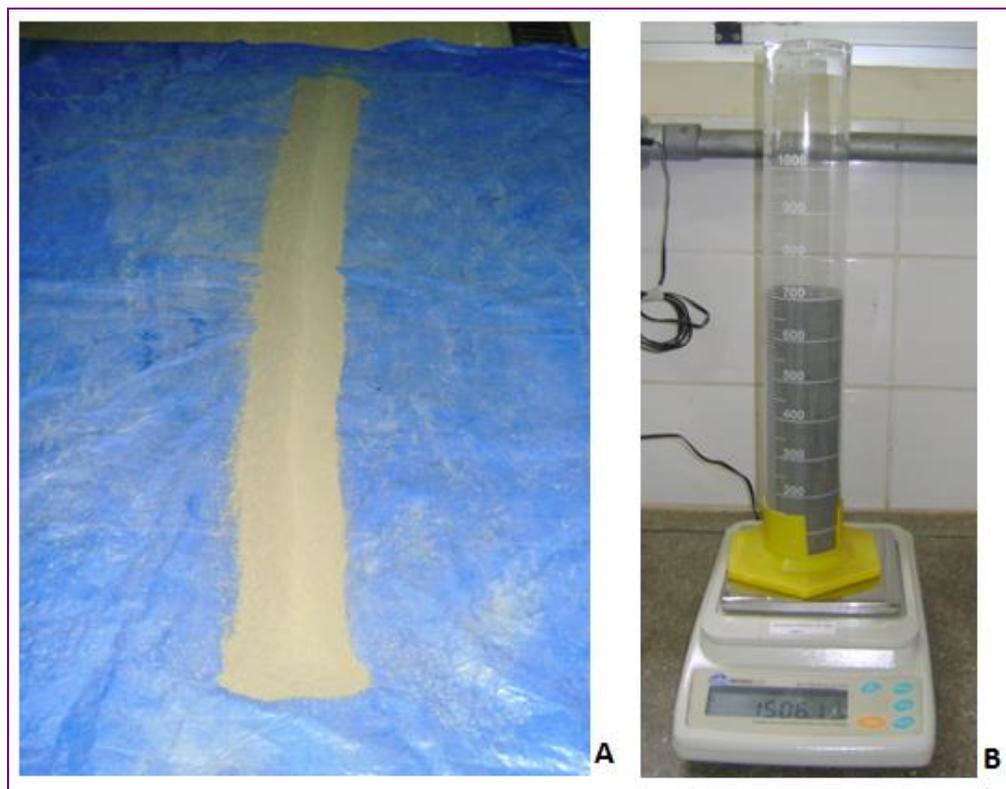


FIGURA 07- Em (A), pilha de homogeneização da amostra de minério de cobre e, em (B), determinação da alimentação inicial dos testes.

Depois, a distribuição granulométrica da alimentação foi definida em peneiras da série Tyler (relação de $\sqrt{2}$), no intervalo de 1420 a 150 μm (12 a 100 Mesh). O valor do A_{80} foi determinado, e o valor de M_{ar} , 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 μm , valor padrão determinado pela Norma, conforme EB-22.

Foi determinada, por peneiramento, a massa passante na abertura da malha-teste. Este é o passante do primeiro ciclo, denominado de Ma^1 , que corresponde à fração com granulometria abaixo da malha teste, contida na alimentação.

5.2 MOAGEM E ANÁLISE DO PRODUTO DA MOAGEM

Primeiramente, o moinho de Bond foi carregado com a carga de bolas padrão, mostrada na Tabela 04, e com a massa de minério (M).

TABELA 04 – Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora.

Número de bolas	Diâmetro (mm)	Diâmetro (pol.)
43	36,5	1,45
67	30,2	1,17
10	25,4	1,00
71	19,1	0,75
94	15,9	0,61

Fonte: ABNT (2010)

A moagem foi iniciada com 150 rotações. O moinho operou com velocidade de 70 rpm. Sua carga moedora consistiu das 285 bolas de aço, distribuída em conformidade com os dados da Tabela 04, e pesando aproximadamente 21 kg. A moagem foi conduzida a seco e em circuito fechado, buscando-se atingir a carga circulante de 250%.

O moinho foi descarregado e a Massa retida na malha teste foi determinada por peneiramento. Este valor foi chamado de Mr^i , com índice sobrescrito indicando o número do ciclo. A Figura 08 mostra o moinho de Bond (Fabricante Engendrar) utilizado para testes de WI, bem como os procedimentos de alimentação e descarga do moinho.



FIGURA 08- Em (A) moinho de bolas tipo Bond, em (B), alimentação inicial no moinho e, em (C), descarga após a moagem do minério.

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. Esta nova alimentação foi chamada de Incremento.

A fração da alimentação que já se encontrava com granulometria abaixo da abertura da malha teste (Ma^i), determinada através de peneiramento, foi descontada do passante na malha teste, presente no produto de moagem (Mp). Assim foi determinado o “Passante Líquido do produto”. Foi feito o peneiramento de controle do incremento na malha-teste ($150 \mu m$) para garantir a distribuição granulométrica constante dos incrementos. A Figura 09 mostra a etapa de peneiramento para análise granulométrica do produto da moagem.



FIGURA 9- Peneiramento para análise granulométrica do produto de moagem para se calcular o passante na malha-teste e o passante líquido.

5.3. DETERMINAÇÃO DA MOABILIDADE E CÁLCULO DO DESVIO

Retido, Passante e Passante Líquido são valores utilizados para o cálculo da Moabilidade do material e para recomposição da alimentação inicial no ciclo seguinte. A Moabilidade é um índice que representa a “massa de material gerado” por número de revoluções do moinho. A massa de material gerado é o *Passante Líquido* do produto da moagem.

O equilíbrio fica evidenciado quando a variação do valor da Moabilidade começa a ser desprezível em relação aos ciclos anteriores. Isso demonstra que a moagem entrou em estado de regime. A verificação do equilíbrio do sistema é uma decisão que determina o término ou a continuidade do ensaio.

Foram realizados vários ciclos 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 17:

$$Nr_{i+1} = Aar - \left(\frac{Ma_{i+1}}{Mob_i} \right) \quad (17)$$

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 feito a recomposição da alimentação, adicionando ao *Retido* do produto da moagem uma massa equivalente ao Passante do último ciclo, chamada de Incremento. 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 (Malha pela qual passam 80% do *Passante* do produto da moagem), realizando-se a análise granulométrica do produto da moagem.

5.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TRABALHO (WI)

O valor do WI é calculado, utilizando-se a Equação 18:

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} \times Mob^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{A_{80}}} \right)} \times 1,1 \quad (18)$$

Em que:

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

Am – abertura da malha de classificação do ensaio (μm);

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

P_{80} – abertura da peneira pela qual passa 80% da massa dos produtos (μm);

A_{80} - abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação, (μm);

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 19:

$$E = 10WI \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{A_{80}}} \right] \quad (19)$$

Onde:

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

WI: índice de trabalho para a moagem em kWh/t;

P_{80} : abertura da peneira por onde passa 80% da massa do produto, (μm);

A_{80} : abertura da peneira por onde passa 80% da massa de alimentação, (μm).

Segundo a ABNT, a Equação 19 é válida para moagem a úmido, em circuito fechado, com diâmetro interno do moinho de 2.440 mm, com descarga por transbordo. Para condições diferentes, fatores de correção devem ser aplicados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BOND

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 da constituição geológica 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), uma vez que cada teste demorou em média uma semana para ficar pronto.

Os ensaios de Bond, realizados de acordo com a Norma (NBR 11376), produziu os resultados mostrados nos gráficos e tabelas a seguir.

6.1.1 Primeiro Ensaio de Bond

O primeiro ensaio utilizou a amostra correspondente ao mês de Outubro, de 2009. As curvas granulométricas das Figuras 10 e 11 representam as análises granulométricas referentes ao primeiro ensaio de WI de Bond.

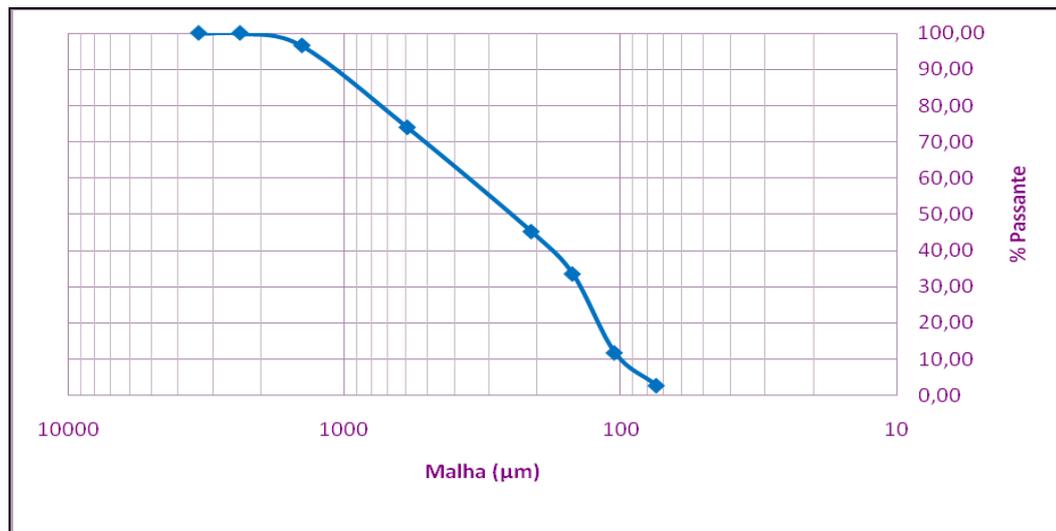


FIGURA 10 - Curva granulométrica de Alimentação do primeiro ensaio.

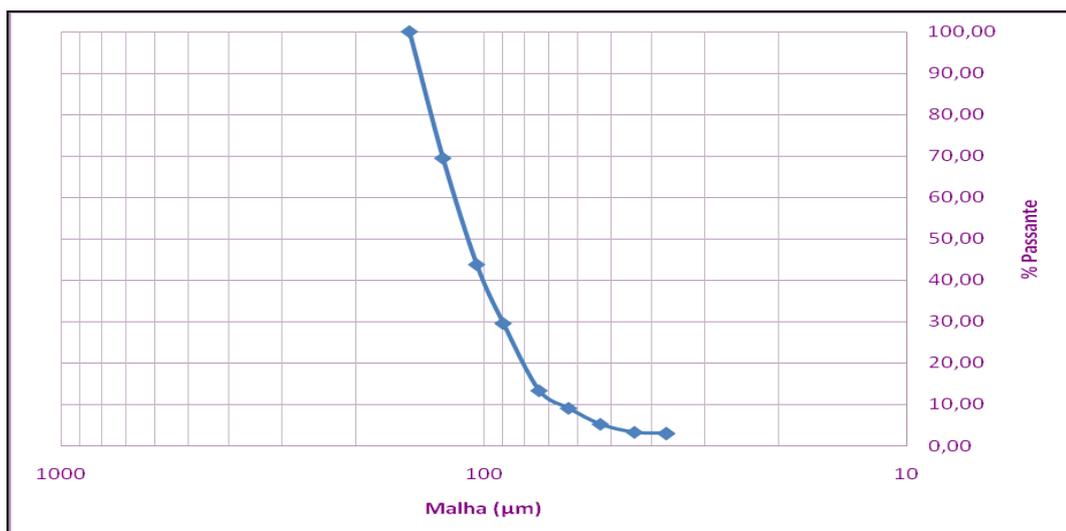


FIGURA 11 - Curva granulométrica do Produto da moagem do primeiro ensaio (amostra do mês de outubro).

A partir das análises granulométricas, foi possível calcular os valores de A_{80} (812,35 μm) e P_{80} (133,23 μm). As Tabelas 05 e 06 representam o acompanhamento do primeiro ensaio e do ensaio de duplicata.

TABELA 05- Acompanhamento do primeiro ensaio de determinação do índice de trabalho.

Identificação: Amostra de Cobre, alimentação do Moinho SAG, de Outubro/2009.

Malha de ensaio (AA) = 150 μm ; Massa inicial (M) =1400 g; Aa=400 g

Ciclo	Rotação	Passante inicial (g)	Retido (g)	Passante (g)	Passante gerado (g)	Desvio (g)	Mobi (g/rot)
1	150	468,41	904	496	27,59	96,00	0,184
2	502	199,40	854	546	346,05	146,00	0,757
3	156	182,68	791	609	426,32	209,00	2,733
4	325	203,77	825	575	371,13	174,90	1,142
5	231	192,36	845	555	362,64	155,00	1,570
6	282	185,53	791	609	423,47	209,00	1,502
7	264	203,76	780	620	416,24	220,00	1,577
8	268	207,44	778	622	414,56	222,00	1,547
9	265	208,11	780	620	411,89	220,00	1,554
10	266	207,44	785	615	407,56	215,00	1,532
						Média:	1,544

TABELA 06- Acompanhamento do primeiro ensaio (Duplicata).

Massa inicial (M) =1360 Gramas; Aa=388,57 Gramas

Ciclo	Rotação	Passante inicial (g)	Retido (g)	Passante (g)	Passante gerado (g)	Desvio (g)	Mobi (g/rot)
1	150	370,00	920	480	110,00	80,00	0,733
2	170	160,60	940	460	299,40	60,00	1,761
3	301	153,91	960	440	286,09	40,00	0,950
4	234	147,21	860	540	392,79	140,00	1,679
5	281	180,67	780	620	439,33	220,00	1,563
6	256	207,44	860	540	332,56	140,00	1,299
7	249	180,67	780	620	439,33	220,00	1,764
8	271	207,44	795	605	397,56	205,00	1,467
9	251	202,42	819	581	378,58	181,00	1,508
10	260	194,39	820	580	385,61	180,00	1,483
						Média:	1,486

Assim, tem-se o resumo dos resultados obtidos no primeiro ensaio (Tabela 07):

TABELA 07- Apresentação dos resultados do primeiro ensaio.

Resultados	Mob.(g/rot)	A ₈₀ (µm)	P ₈₀ (µm)	WI (kWh/t)	E (kWh)
Teste 1	1,54	812,35	131,82	20,85	
Duplicata	1,49	812,35	134,64	21,90	13,92
MÉDIA	1,52	812,35	133,23	21,37	

6.1.2 Resultados do Segundo Ensaio de Bond

O segundo ensaio utilizou a amostra correspondente ao mês de Novembro, de 2009. As Figuras 12 e 13 representam as análises granulométricas da alimentação e do produto do moinho de Bond, respectivamente.



FIGURA 12 - Curva granulométrica da alimentação do segundo ensaio.



FIGURA 13 - Curva granulométrica do Produto da moagem do segundo ensaio (mês de Novembro).

Os valores de A_{80} e P_{80} foram encontrados através das análises granulométricas. A alimentação mostrou um A_{80} igual a 991,69 μm e o produto, um P_{80} igual a 120,51 μm . Os acompanhamentos do segundo ensaio e da duplicata deste estão apresentados nas Tabelas 08 e 09, respectivamente.

TABELA 08 - Acompanhamento do Segundo Ensaio para a determinação de índice de trabalho.

Identificação da amostra: Amostra de Cobre, alimentação do moinho SAG do mês de Novembro.

Malha de ensaio (AA) = 150 μm ; Massa inicial (M) =1500 g; Aa=428,57 g

Ciclo	Rotação	Passante inicial (g)	Massa retida (g)	Massa passante (g)	Passante gerado (g)	Desvio (g)	Mobi (g/rot)
1	150	326,4	1034	466	139,6	37,43	0,931
2	319	101,40	839,4	660,6	559,20	232,03	1,753
3	347	142,82	924	576	433,18	147,43	1,248
4	329	125,34	902,6	597,4	472,06	168,83	1,435
5	338	129,99	871	629	499,01	200,43	1,476
6	337	135,90	936,8	563,2	427,30	134,63	1,268
7	332	122,55	859,5	640,5	517,95	211,93	1,560
8	340	138,50	829,5	670,5	532,00	241,93	1,565
9	336	145,90	819	681	535,10	252,43	1,593
Média:							1,572

TABELA 09 - Acompanhamento do segundo ensaio (Duplicata).

Identificação da amostra: Amostra de Cobre, alimentação do moinho SAG do mês de Novembro.

Malha de ensaio (AA) = 150 μm ; Massa inicial (M) =1500 g; Aa=428,57 g

Ciclo	Rotação	Passante inicial (g)	Massa retida (g)	Massa passante (g)	Passante gerado (g)	Desvio (g)	Mobi (g/rot)
1	150	326,70	1026,1	473,9	147,2	45,33	0,981
2	324	103,12	1010,7	489,3	386,18	60,73	1,192
3	340	106,47	1021,7	478,3	371,83	49,73	1,094
4	334	104,08	953,4	546,6	442,52	118,03	1,325
5	340	118,94	903,3	596,7	477,76	168,13	1,405
6	337	129,84	885,9	614,1	484,26	185,53	1,437
7	336	133,63	833,6	666,4	532,77	237,83	1,586
8	338	145,01	830	670	524,99	241,43	1,553
9	336	145,79	834,2	665,8	520,01	237,23	1,548
Média:							1,562

Deste modo, foi possível obter os seguintes resultados (Tabela 10):

TABELA 10 - Apresentação dos resultados do segundo ensaio.

Resultados	Mob.(g/rot)	A ₈₀ (μm)	P ₈₀ (μm)	WI (kWh/t)	E (kWh)
Teste 2	1,57	991,69	119,65	17,91	
Duplicata	1,56	991,69	121,37	18,20	10,71
MÉDIA	1,57	991,69	120,51	18,05	

6.1.3 Terceiro Ensaio de Bond

O terceiro ensaio utilizou a amostra correspondente ao mês de Janeiro, de 2010. As Figuras 16 e 17 representam as análises granulométricas da alimentação e do produto do moinho de Bond, respectivamente.



FIGURA 14 - Curva granulométrica da alimentação do Terceiro ensaio.



FIGURA 15- Curva granulométrica do produto da moagem do terceiro ensaio (mês de janeiro).

A alimentação mostrou um A_{80} igual a 970,09 μm e o produto, um P_{80} igual a 104,19 μm . Os acompanhamentos dos ensaios referentes ao mês de Janeiro estão apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

TABELA 11 - Acompanhamento do terceiro ensaio para a determinação de índice de trabalho.

Identificação da amostra: Amostra de Cobre, alimentação do moinho SAG do mês de Janeiro (2010).

Malha de ensaio (AA) = 150 μm ; Massa inicial (M) = 1453,77 g; Aar: 415,36g

Ciclo	Rotação	Passante inicial (g)	Massa retida (g)	Massa passante (g)	Passante gerado (g)	Desvio (g)	Mobi (g/rot)
1	150	320,67	1016,1	437,67	117	22,31	0,780
2	292	96,54	998,3	455,47	358,93	40,11	1,229
3	334	100,47	911,8	541,97	441,50	126,61	1,322
4	325	119,55	999,6	454,17	334,62	38,81	1,030
5	318	100,18	982,2	471,57	371,39	56,21	1,168
6	326	104,02	940,6	513,17	409,15	97,81	1,255
7	325	113,19	871,9	581,87	468,68	166,51	1,442
8	326	128,35	878,5	575,27	446,92	159,91	1,371
9	323	126,89	866,5	587,27	460,38	171,91	1,425
10	324	129,54	870	583,77	454,23	168,41	1,402
Média:							1,399

TABELA 12- Acompanhamento do terceiro ensaio (Duplicata).

Ensaio para determinação de índice de trabalho

Identificação da amostra: Amostra de Cobre, alimentação do moinho SAG do mês de janeiro (2010).

Malha de ensaio (AA) = 150 μm ; Massa inicial (M) = 1430,1; Aa=408,6 g

Ciclo	Rotação	Passante inicial (g)	Massa retida (g)	Massa passante (g)	Passante gerado (g)	Desvio (g)	Mobi (g/rot)
1	150	284,8	1047,9	382,2	97,4	-33,16	0,649
2	291	76,11	1022,5	407,6	331,49	-7,76	1,139
3	337	81,17	980	450,1	368,93	34,74	1,095
4	327	89,64	973,3	456,8	367,16	41,44	1,123
5	328	90,97	908,7	521,4	430,43	106,04	1,312
6	329	103,84	888,6	541,5	437,66	126,14	1,330
7	328	107,84	894,2	535,9	428,06	120,54	1,305
Média:							1,316

Assim, obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 13):

TABELA 13 - Apresentação dos resultados do terceiro ensaio.

Resultados	Mob.(g/rot)	A ₈₀ (μm)	P ₈₀ (μm)	WI (kWh/t)	E (kWh)
Teste 3	1,40	970,09	111,20	18,74	
Duplicata	1,32	970,09	97,19	17,83	13,98
MÉDIA	1,36	970,09	104,19	18,29	

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.

É importante ressaltar que não houve amostragem no mês de Dezembro de 2009, por isso não houve análise referente a este mês.

A amostra representante do mês de outubro (2009) apresentou um A₈₀ igual a 812,35 μm , enquanto que a amostra do mês de Novembro A₈₀ de 991,69 μm . A amostra de Janeiro (2010), por sua vez, apresentou A₈₀ de 970,09 μm .

A Figura 16 mostra uma comparação entre as três curvas granulométricas da alimentação dos testes de Bond.

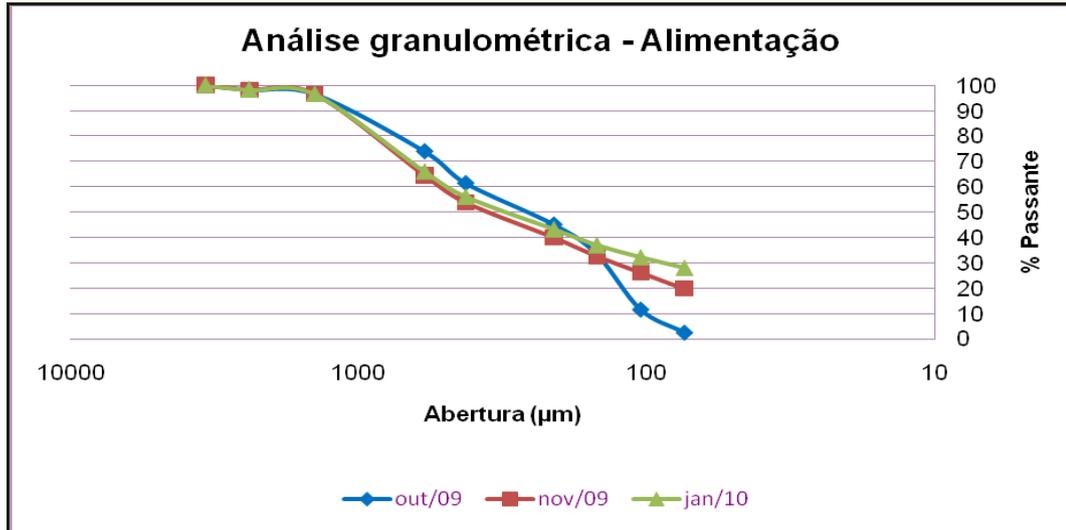


FIGURA 16 - Comparação das três curvas granulométricas da alimentação, representantes dos meses outubro, novembro e janeiro.

7 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 14.

TABELA 14 - Correlação entre os valores de WI.

Data	Correlação entre valores de WI		CORRELAÇÃO LINEAR	INTERPRETAÇÃO
	WI _{OP}	WI _{BOND}		
Outubro/09	15,31	21,37	0,95	Correlação forte
Novembro/09	11,63	18,05		
Janeiro/2010	13,05	18,28		
	WI _{TORQUE}	WI _{BOND}	-0,29	Correlação moderada
Outubro/09	13,78	21,37		
Novembro/09	13,09	18,05		
Janeiro/2010	17,2	18,28	0,03	Correlação fraca
	WI _{OP}	WI _{TORQUE}		
Outubro/09	15,31	13,78		
Novembro/09	11,63	13,09		
Janeiro/2010	13,05	17,2		

As Figuras 17, 18, 19 e 20 mostram os gráficos que comparam os três valores de WI: de Bond, de Torque e Operacional da usina do Sossego.

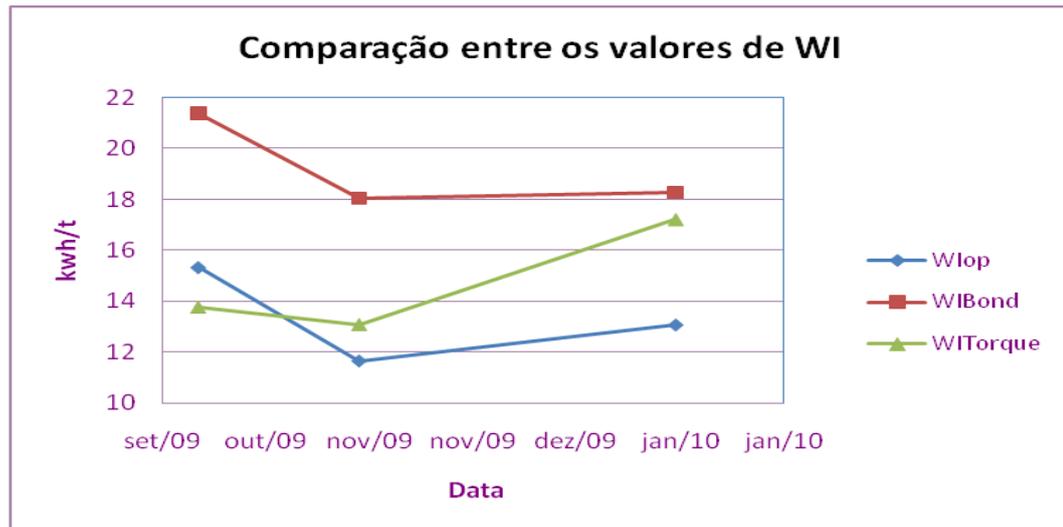


FIGURA 17 - Comparação dos valores de WI de Bond, de Torque e Operacional da Usina do Sossego.

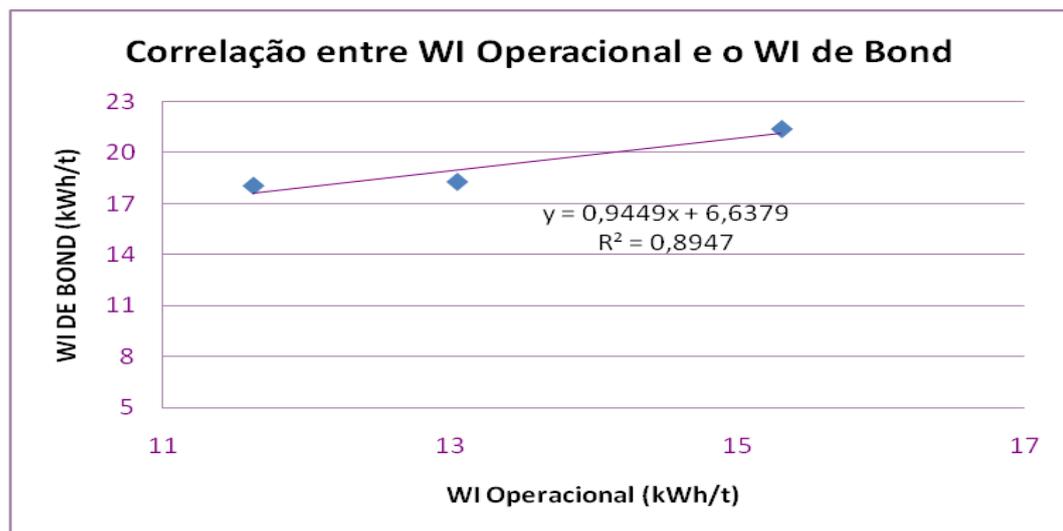


FIGURA 18 - Correlação dos valores de WI operacional da Usina com o WI de Bond.

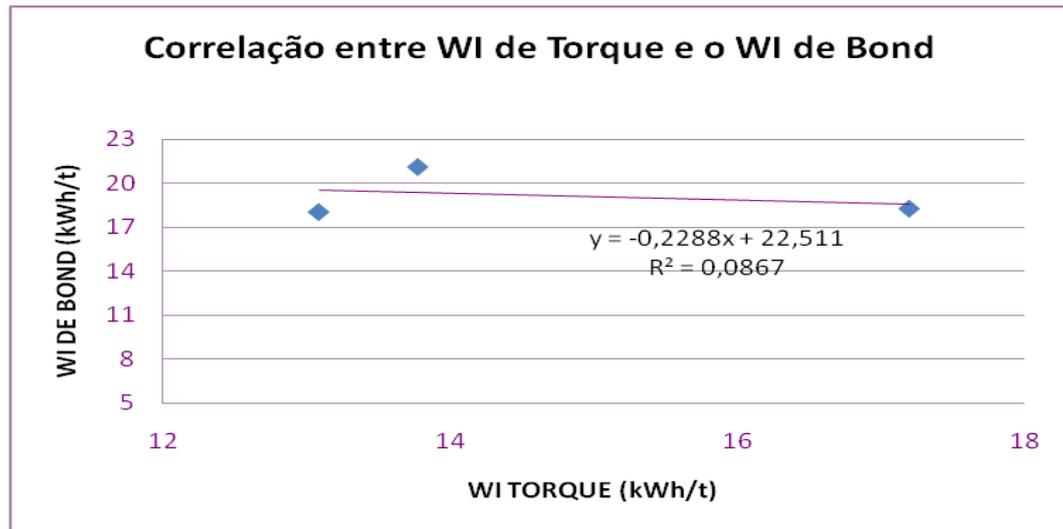


FIGURA 19 - Correlação dos valores de WI de Bond com o WI de Torque.

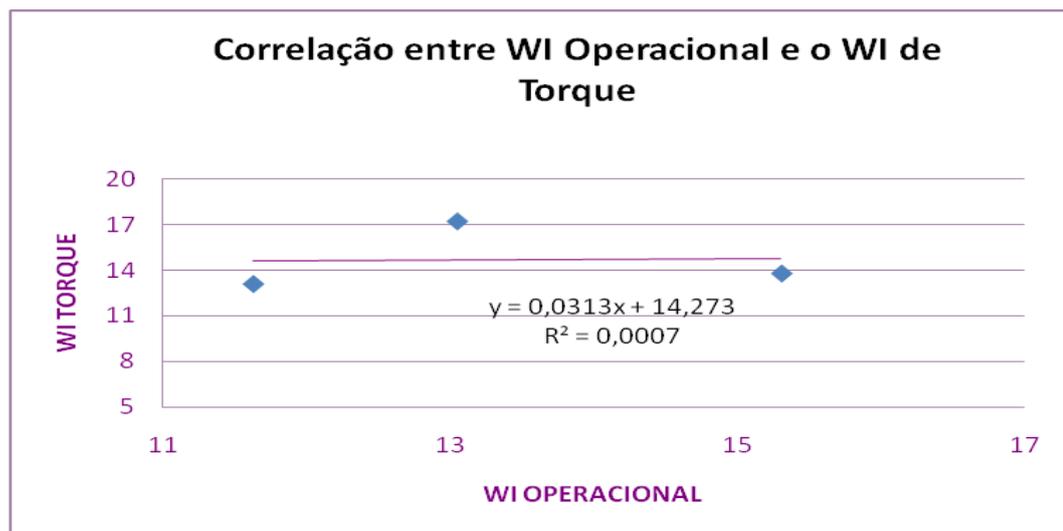


FIGURA 20 - Correlação dos valores de WI operacional da Usina com o WI de Torque.

Os gráficos mostraram 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 15.

TABELA 15 - Coeficientes de variação entre os testes de WI e suas duplicatas.

MÊS	WI_{BOND}	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
OUTUBRO	$\frac{20,85}{21,90}$	21,38	0,74	3,47
NOVEMBRO	$\frac{17,91}{18,20}$	18,05	0,21	1,18
JANEIRO	$\frac{18,74}{17,83}$	18,29	0,64	3,52

8 CONCLUSÕES

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.

As metodologias estudadas possuem diferenças nos seus procedimentos. Esses fatores podem justificar a diferença entre os valores para o WI. A metodologia de Bond é bem mais complexa e demorada. Já 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. Um maior número de testes, todavia, forneceria conclusões ainda mais consistentes.

9 RECOMENDAÇÕES

O presente estudo buscou correlacionar os valores de WI obtidos através de duas metodologias diferentes: Metodologia de Bond e de Torque. Para isso, foram feitos três ensaios de WI, com duplicata. No entanto, sugere-se que mais ensaios de Bond sejam feitos, para se ter maior número de dados, aumentando a sua representatividade. Deste modo, com maior quantidade de dados as conclusões serão mais consistentes e será possível verificar se existe uma tendência dos valores de WI (de cada metodologia) aumentarem ou diminuírem a correlação, de acordo com ajustes na metodologia de Torque.

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se o Modelamento matemático dos testes apresentados e análise da interferência dos finos na alimentação do moinho de Bond, nos resultados dos testes de Work Índex.

Sugere-se também a continuidade deste trabalho, visando o acompanhamento das possíveis mudanças dos procedimentos experimentais da Metodologia do WI de Torque.

REFERÊNCIAS

ALVES, V. K.; SCHNEIDER, C. L.; Previsão do resultado do ensaio completo de Bond a partir de parâmetros de Balanço populacional medidos em simples ensaios de batelada nas condições do Ensaio de Bond. CETEM. RJ, 2007.

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 e 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.

DELBONI JUNIOR, H. Cominuição. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas da USP – Universidade de São Paulo, 2004.

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.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 4ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

MOLY-COP TOOLS; SETTING NEW STANDARD METHODOLOGIES IN GRINDING PROCESS ANALYSIS: AS LEIS DA COMINUIÇÃO. Curso sobre Moagem, 2008

NEVES, P. B. Características de Fragmentação e Microestruturais de Rochas e Seu Comportamento na Britagem para a Produção de Agregado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

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.

WELLENKAMP, F.J; *Moagem Fina e Ultrafina de Minerais Industriais: Uma revisão*. Rio de Janeiro: CETEM, 1999.

WILLS, B. A., *Wills' Mineral Processing Technology: Na introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7 ed., The University of Queensland, Austrália, 2007.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. K. *Otimização de Carga Moedora Utilizando Ferramentas de Modelamento Matemático e Simulação de Moagem*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

BARBARATO, C.N.; SAMPAIO, J. A., *Determinação Experimental do índice de trabalho (WI)*. CETEM, Rio de Janeiro, 2007.

BORGES, F. C., *Levantamento de possíveis causas da variação do Work Index de moinhos de bolas em ensaios laboratoriais*. UFPA. Marabá, 2009.

MANUAL TÉCNICO: Moinho de Bolas 12"x12", tipo Bond. CDC: Equipamentos Industriais LTDA.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. *Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.