

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NO ÍNDICE DE TRABALHO (WI) DE AMOSTRAS DE QUARTZO

¹Régis Budke, ²Marinésio Pinheiro. de Lima, ¹Diego Souza Nunes & ²Lucinewton Silva de. Moura

¹Graduandos em Engenharia de Minas e Meio Ambiente - UFPA.

²Prof. da Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Campus de Marabá - Folha 17, Quadra 04, Lote Especial. Nova Marabá, CEP 68505-080 - Marabá - PA.

E-mail: regis.budke@hotmail.com; mplima@ufpa.br, diegonunes3@hotmail.com, lucinew@ufpa.br

RESUMO

O Índice de Trabalho (WI) 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 µm. Além disso, representa a resistência do minério à moagem e possibilita o cálculo da energia necessária para se moer o minério. A moagem é o maior consumidor de energia do processo de beneficiamento de minérios. Sendo assim, foram coletadas amostras de quartzo de veios pegmatíticos do município de São João do Araguaia – PA com o objetivo de realizar ensaios de índice de trabalho (WI). Estas amostras foram submetidas a um aquecimento de 750°C, depois de resfriadas, e novamente realizados ensaios de WI com o intuito de verificar o comportamento das amostras quanto ao índice de trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Índice de Trabalho, Quartzo, Minerais Industriais.

ABSTRACT

The Work Index (WI) for ball mills correspond numerically to the work required to reduce one ton of ore, from a theoretically infinite size to 80% of mass through in a sieve opening of 106 µm. Besides this, it represents the ore's strength to grind and allows the calculation of energy required to grind the ore. The grind is the biggest energy consumer in mineral processing. Thus, were collected samples of pegmatite quartz vein of São João do Araguaia-Pa, for the purpose of do WI tests. These samples were subjected to a heating of 750°C, after cooled were again subjected for WI test, in order to investigate the behavior of samples for the work index.

KEY-WORDS: Work Index, Quartz, Industrials Minerals.

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.

De acordo com Figueira *et al.* (2004) o Índice de Trabalho para moinho de bolas (Work Index) corresponde numericamente, ao trabalho necessário para reduzir uma tonelada de minério, desde um tamanho teoricamente infinito, até 80% da massa passante em 106 μm . Além disso, representa a resistência do minério à moagem e possibilita, através de sua determinação, o cálculo da energia necessária para a moagem do minério.

Desta forma, 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 (Herbst *et al.*, 2003).

Este trabalho utilizou amostras de quartzo proveniente de veios pegmatíticos da região de São João do Araguaia - PA para realização de ensaios de WI. Um teste foi realizado com a amostra em estado natural, sem aquecimento, e o outro ensaio foi conduzido com uma amostra submetida a um aquecimento de 750°C. O objetivo principal do estudo foi verificar a influência da temperatura na determinação do WI e compará-lo com os resultados obtidos sem tratamento térmico.

Fenner (1913) estudou as condições de estabilidade das diferentes formas de sílica. Nieuwenburg (1928) confirmou as faixas de temperaturas onde o quartzo, a tridimita e a cristobalita são estáveis. Fenner obteve resultados definitivos sobre as reações de estabilidade dos minerais a base de sílica, a tabela a seguir mostra a seqüência destas transformações de fase.

Tabela I - Relações de estabilidade dos minerais de sílica

Temperatura (°C)	Mudanças Cristalinas
117	α -tridimita \leftrightarrow β -tridimita
163	β -tridimita \leftrightarrow γ -tridimita
275	α -cristobalita \leftrightarrow β -cristobalita
572	β -quartzo \leftrightarrow α -quartzo
573	α -quartzo \leftrightarrow β -quartzo
870 \pm 10	quartzo \leftrightarrow tridimita
1470 \pm 10	tridimita \leftrightarrow cristobalita
1713 \pm 10	β -cristobalita \leftrightarrow sílica glass

Fonte: Brito (2005)

A transformação de fase do $\alpha \leftrightarrow \beta$ - quartzo é bastante conhecida. É um tipo de reação polimorfa reversível do sistema da sílica. Acontece com forte descontinuidade a 575°C. Phelps *et al apud* Brito (2005) observaram que durante o aquecimento, a temperatura de transformação para o quartzo é precisamente medida em 573,3°C, mas no resfriamento ocorre em 572,4°C.

A Figura 1 mostra a variação do volume molar durante a transformação de fase de quartzo $\alpha \leftrightarrow \beta$ devido ao aumento do ângulo Si-O-Si durante o aquecimento. Nota-se a forma α expandindo com o aumento da temperatura até a transformação de fase, quando passamos a ter a presença da fase β . Essa variação pode gerar trincas no mineral durante o processo de expansão-retração que enfraquecem a estrutura cristalina favorecendo assim o processo de moagem.

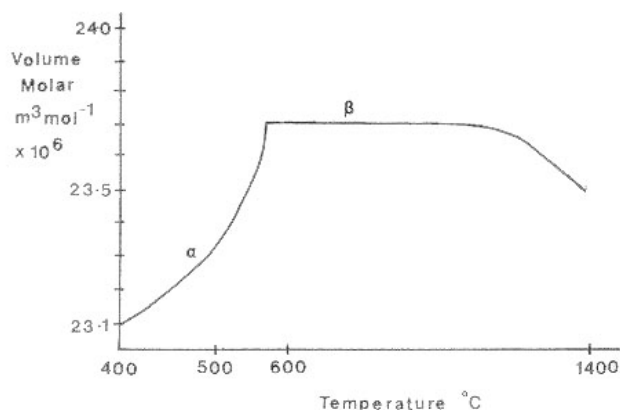


Figura 10 - Expansão volumétrica das estruturas α e β -quartzo. Fonte: Brito (2005)

2. REVISÃO DA LITERATURA

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.

Em 1867, Peter Ritter Von Rittinger estabeleceu uma relação que afirma que a área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido, posteriormente denominada *Primeira lei da Cominuição* ou *Lei de Rittinger*. A segunda lei da cominuição formulada por Friederick Kick enuncia que o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas.

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. A tabela II mostra as fórmulas das leis da cominuição.

Tabela II - Expressões matemáticas das leis da cominuição

Leis	Expressão matemática	Constantes
Lei de Rittinger	$E = K(S_1 - S_0)$	E = Energia específica; K= Fator de proporcionalidade; S ₁ = Área do produto; S ₀ = Área inicial.
Lei de Kick	$E = C \times \text{Log} \frac{D_0}{D_1}$	C = Constante; D ₀ = Diâmetro inicial; D ₁ = Diâmetro final.
Lei de Bond	$E = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{A80}} \right)$	E: energia em kWh para moer uma tonelada curta de minério; WI: Índice de Trabalho (Work index); P80: abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80% da massa do produto; A80: 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” (GALERY, 2006).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método de ensaio utilizado foi o registrado no Inmetro como NBR 11376. Esta norma prescreve o método de determinação do índice de trabalho de moinho de Bolas através da terceira lei da cominuição, formulada por Bond. Para estes ensaios foram coletados cerca de 60 kg de quartzo obtidos após britagem primária realizada na área de extração em São João do Araguaia - PA.

Posteriormente, esta amostra foi submetida à uma rebritagem, até que a amostra apresentasse granulometria adequada para o início do teste. Foram obtidos cerca de 10 kg de amostra com granulometria inferior a 3,36 mm (6# Tyler).

A amostra foi homogeneizada e quarteada pelo método da pilha cônica, para obtenção de duas alíquotas. Uma amostra foi submetida ao teste de WI sem aquecimento, denominada Amostra Natural, enquanto que outra foi submetida a aquecimento em um forno (F1350, Maitec) à uma temperatura de 750°C por 3 horas sendo em seguida resfriada a temperatura ambiente.

Os ensaios para determinar o WI, em laboratório, foram 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.

Foi determinada a massa inicial do teste. Procedeu-se à análise granulométrica da alimentação e a determinação do A_{80} . Foi utilizada a peneira de 150 μm como malha teste do ensaio. Procedeu-se a moagem com a amostra e a carga de bolas (21,125 kg) constituída por um conjunto de 285 bolas de aço com faixa de tamanho padrão pré-determinado (43 bolas de 36,5 mm; 67 bolas de 30,2 mm; 10 bolas de 25,4 mm; 71 bolas de 19,1 mm e 94 bolas de 15,9 mm de diâmetro) de acordo com a Norma da ABNT, NBR 11376.

O moinho possui diâmetro e comprimento iguais a 12 polegadas e opera com 70 rpm. A verificação de entrada em regime é feita pelos valores de Moabilidade. A moabilidade é um índice que representa a “massa de material gerado” por número de revoluções do moinho. Ela é feita, extraindo-se a média aritmética dos três últimos valores de moabilidade, não devendo a diferença entre o maior e o menor valor ser superior a 3% em relação ao valor médio.

Verificado a entrada em regime do teste, realizou-se a análise granulométrica do produto da moagem para determinação do P80, assim pode-se calcular o valor de WI das amostras segundo a Equação 1, a seguir:

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,22} \times Mob^{0,22} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \times 1,1 \quad (1)$$

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

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

P – abertura da peneira pela qual passam 80% da massa dos produtos em μm ;

F – abertura da peneira pela qual passam 80% da massa da alimentação em μm ;

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

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

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro teste foi utilizada a amostra natural, sem aquecimento, esta apresentou uma granulometria inicial grosseira, com pouca geração de finos, cerca de 14,83% passante na malha teste (150 μm), o que é recomendável para o teste de WI. Da mesma forma foi feito com a amostra aquecida, que apresentou 15,16% em massa passante na malha teste.

Em ambos os testes a entrada em regime se deu no sexto ciclo. Verificou-se então que a moabilidade das duas amostras apresentaram variações. A amostra natural obteve um valor de moabilidade menor do que a amostra aquecida, 1,56 e 1,79 g/rot respectivamente. Isto é um indicativo que a geração de finos aumentou na amostra aquecida.

Tendo verificado a entrada em regime, realizou-se a análise granulométrica do produto da moagem. O gráfico a seguir mostra a granulometria inicial e final da amostra de cada teste.

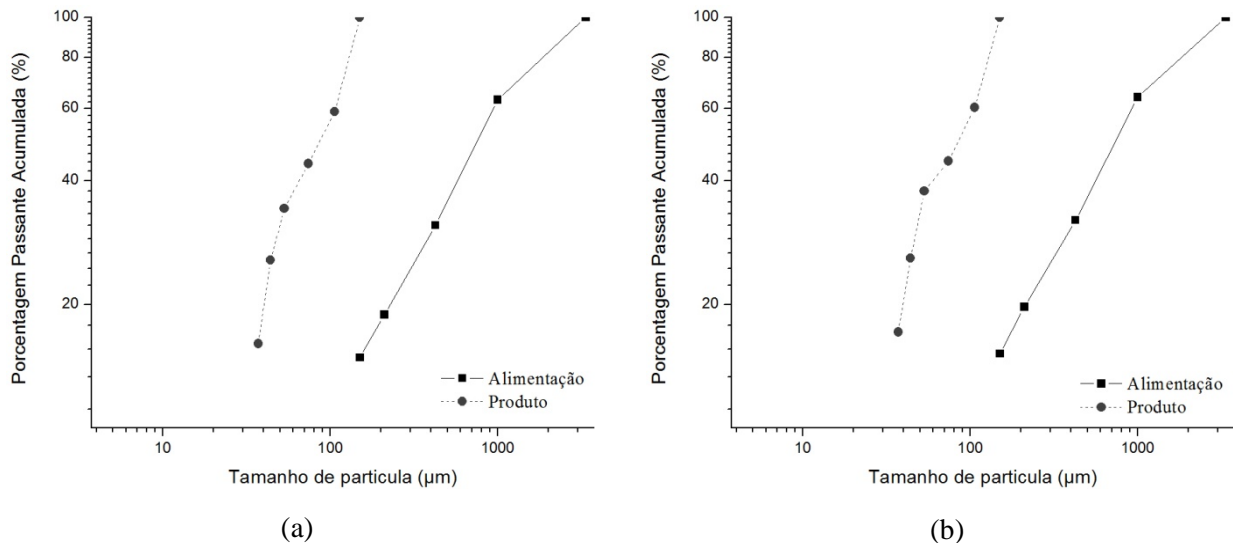


Figura 11 - Distribuição granulométrica da alimentação inicial e do produto da amostra: (a) Natural e (b) Aquecida.

Por interpolação linear calculou-se o A80 e o P80 para a determinação do WI de cada teste. E com este, a energia necessária para se moer uma tonelada de material. A Tabela II resume os resultados dos dois testes.

Tabela II- Resumo dos testes de WI

Teste	Finos na Alimentação (%)	Moabilidade Média (g/rot)	A80 (μm)	P80 (μm)	WI (kWh/t)	Energia (kWh/t)
Amostra Natural	14,83	1,56	1867,12	129,03	16,54	10,7332
Amostra Aquecida	15,16	1,79	1833,70	128,14	14,77	9,5986

Verifica-se que ambas as amostras pertencem a uma mesma população, visto que as distribuições granulométricas são similares, assim também pelos resultados de A80 e dos finos na alimentação, com resultados muito próximos, desta forma pode-se afirmar que o erro de amostragem não influenciou sobre o valor final do WI, pois se tratava da mesma amostra.

Podemos vislumbrar que na etapa de aquecimento também tivemos uma quantidade de energia dissipada no processo, onde alguns fatores podem influenciar de forma bastante expressiva. No caso do quartzo tivemos a provável mudança de sua estrutura cristalina, afetada em torno de 573° C, quando o mesmo passou de quartzo α para quartzo β , e no resfriamento o processo inverso, proporcionando possivelmente um decréscimo em seu limite de ruptura e a geração de fissuras, de modo a permitir uma geração maior de finos observados nos ensaios.

4. CONCLUSÕES

As etapas finais de fragmentação são ineficientes e apresentam um grande consumo energético. Por isso, a fragmentação vem sendo uma preocupação constante do mundo científico e tecnológico. Inúmeros estudos e pesquisas têm sido realizados para se estabelecer o conhecimento destas relações de energia no fenômeno de fragmentação. A cominuição mineral consome atualmente 3% da energia consumida no mundo inteiro (PEASE, 2007).

Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC) estimou que 30 a 50 % de toda a energia gasta em uma planta de beneficiamento é consumida na etapa de cominuição, podendo esse valor chegar a 70% para minérios muito “duros” (JKMRC apud PEREIRA, 2004).

Os ensaios realizados deixaram clara a influência da temperatura nas amostras de quartzo, verificou-se uma diminuição no índice de trabalho (WI) quando a amostra foi submetida a um aquecimento prévio com posterior resfriamento a temperatura ambiente, que de certa forma facilitou a operação de moagem, resultando em um consumo energético 10% menor, conforme apresentados.

Desta forma fica perceptível o estudo de métodos não convencionais nas etapas que antecedem a moagem, com intuito de verificar a viabilidade destes incrementos nas plantas de beneficiamento, tendo em vista os altos custos envolvidos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOND, F.C. *Crushing and Grinding Calculations. Parts I and II*. Allis Chalmers Bulletin n° 07R9235B. Reprinted from British Chemical Engineering, 1961.

- BRITO, F. V., Processamento de meios porosos à base de sílica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- 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.
- FENNER, C. N, *The stability relations of the silica minerals*, American Journal of Science, Series 4 Vol. 36, P.331-384, 1913.
- FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M. e LUZ, A. B. Cominuição. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de Minérios*. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.113-182.
- GALERY, R. *Fragmentação de Minérios: Primeira Parte. Notas de Aula*. Universidade Federal de Minas Gerais: DEMIN, 2006.
- HERBST, J. A.; Lo, Y. C. e FLINTOFF, B. Size liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). *Principles of mineral processing*. SME, 2003, p.61-118.
- 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.
- NIEUWENBURG, C. J. van; NOOIJER, C. N. J. de (1928), *Investigations on the one-component system SiO₂*. IIND Communication: Catalysts for the slow transformations.
- PEASE, J. Increasing the Energy Efficiency of Processing. General manager Xstrata Technology. 2007.
- PEREIRA, P. E. *Comparação entre Diferentes Testes de Moagem SAG para Determinação da Energia Unitária para Cominuição de Minérios Sulfetados de Cobre*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.