



CARACTERIZAÇÃO DA MOAGEM DE UM ITABIRITO ANFIBOLÍTICO – ESTUDO DE WORK INDEX

NEVES, T.V.¹, SILVA, L.S.S.¹, DE SÃO JOSÉ, F.², PEREIRA, C.A.¹

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas. e-mail: thiagovianaop77@gmail.com.

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFETMG), Departamento de Mineração e Construção Civil.

RESUMO

Moagem corresponde a uma das etapas de maior custo no beneficiamento de minérios, envolve elevado gasto energético e com produtividade diretamente relacionada à moabilidade dos diferentes minerais constantes no minério. Assim, torna-se importante caracterizar o comportamento do um minério em moagem, apoiando-se nas teorias da cominuição que relacionam a energia requerida para fragmentar dado material de alimentação em tamanhos de partículas do produto e, entre tais teorias tem-se o WI (Work Index). Nesta pesquisa foi determinado o WI de um itabirito anfíbolítico, procedente da mina Sapecado, Quadrilátero Ferrífero-MG, por meio da metodologia de Bond. Com tal metodologia, calculou-se o WI e a energia necessária para a moagem do itabirito. Segundo a literatura, o WI de um minério itabirítico varia de 6 a 25kWh/st, essa diferença ocorre devido às variações de características granulométricas, mineralógicas e de resistência do minério à fragmentação. Os resultados obtidos apontaram para valor de WI igual a 7,09kWh/st, dentro da faixa citada. Destacam-se também os cuidados necessários com a integridade do minério, pois devido a sua elevada friabilidade, esse possuiu facilidade de gerar finos durante manuseio que comprometem os resultados de WI. Aconselha-se efetuar a deslamagem no início do teste para sua posterior homogeneização.

PALAVRAS-CHAVE: Work Index, Teste de Bond, Moagem, Itabirito Anfíbolítico.

ABSTRACT

Milling corresponds to the most costly operations in mineral processing, involving high energy costs and has productivity directly related to the typology of different ores. Thus, it becomes important to know the ore behavior when subjected to milling, relying on the theories of comminution that discuss the energy required to fragment a given material to the product's particle sizes, i.e., the WI (Work Index). In this research, the WI of an amphibolitic itabirite from the Sapecado Mine, Iron Quadrangle was determined. Through the Bond Methodology, the WI and the energy required for the itabirite milling were calculated. According to the literature, the WI of an itabirite ore varies from 6 to 25kWh/st, this difference occurs due to variations of characteristics such as granulometric, mineralogical and properties related to the friability. The results showed a value of WI equal to 7.09kWh/st. And the special care with the integrity of the ore was also verified because due to its high friability, this one has facility of generating fines that compromise the results of WI. It is advisable to carry out the ore desliming at the beginning of the test for later homogenization.

KEYWORDS: Work Index, Bond Test, Grinding, Amphibolitic Itabirite

1. INTRODUÇÃO

A etapa de moagem é responsável por grande parte do consumo de energia em usinas de beneficiamento de minérios, que visam à produção de concentrados. Estudos sobre o comportamento de minérios à fragmentação podem determinar a capacidade de produção de uma mina, redução de custos, além de prever variações na taxa de alimentação ou distribuição granulométrica de produtos de moinhos.

O Work Index (WI) é um parâmetro que corresponde à resistência do minério durante a moagem, ou seja, um índice que está relacionado à maior ou menor facilidade de se fragmentar um minério (NBR11376, 1990). Corresponde, dessa forma, à energia total expressa em kWh por tonelada curta (907kg), necessária para reduzir determinado minério, desde o tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 106 μ m, malha de referência (Figueira *et al.*, 2014).

Através desse parâmetro e dos chamados fatores de Rolland, torna-se possível calcular a energia necessária para a redução das partículas a uma determinada granulometria, possibilitando o dimensionamento de moinhos tubulares (Beraldo, 1987).

Em pesquisa realizada por (Bond, 1971) foi estudada a moabilidade e determinado o WI de um minério de itabirito anfíbolítico da região de Itatiaiuçu, Minas Gerais. O minério analisado consistiu principalmente de goethita, hematita e quartzo, sendo a goethita mais abundante que a hematita em tal minério. O WI encontrado para tal minério foi de 9,25kWh/st.

Beraldo (1987) explorou a relação do consumo de energia de cominuição em função da granulometria do produto. Através de testes em moinho de bolas para diversos tipos de minérios e materiais, definiu o WI médio para minério de ferro (hematita + silicatos) igual a 12,4kWh/st, 11,1kWh/st quando somente hematita e 9,0kWh/st para limonita.

Já Rocha (1997) e Toríbio (2001) constataram, por meio de análises qualitativas, que variações de características como proporção, dimensão e forma dos poros (estudos de porosimetria) podem ocasionar sensíveis diferenças no comportamento das etapas de beneficiamento. Pode-se afirmar que aspectos a níveis micro e mesoestruturais, principalmente de porosidade também exercem forte influência no desempenho da etapa de cominuição dos minérios de ferro.

Atualmente, existem poucos trabalhos na literatura referentes à previsão da moabilidade dos minérios de ferro anfíbolíticos. Determinar informações quanto à moabilidade de minérios de ferro anfíbolítico enriquece a área da engenharia envolvendo o processamento de minérios de ferro, uma das commodities com maior participação na economia brasileira. As pesquisas possuíram um viés envolvido de alunos jovens pesquisadores e estudantes de engenharia, na busca por informações complementares, que pudessem ampliar a discussão em torno da cominuição do minério de ferro anfíbolítico (mina Sapecado) por meio do método de Bond e reforçar conceitos quanto sua moabilidade e gasto energético.

Itabiritos anfíbolíticos podem apresentar consideráveis teores de P e Al (reportado como Al₂O₃). A goethita atua com um dos principais minerais de ferro e apresenta também um alto grau de PPC (perda por calcinação). De ocorrência no Quadrilátero Ferrífero, na Mina de Alegria mais especificamente, tal rocha apresenta-se friável ou compacta e com massa específica média de 2,15g/cm³ a 2,24g/cm³ (Freitas, 2014).

2. MATERIAL E MÉTODOS

A amostra coletada na mina com dimensões de blocos e possuía massa inicial de 92,99kg. Tal amostra foi britada em britador de mandíbulas (APF de 20mm) e quarteada em divisor rotativo tipo carrossel, com espessura de material sobre a esteira alimentadora igual a 7,5 cm que distribuiu todo material em 12 compartimentos de igual volume.

O teste de Bond requer que todo o material esteja em uma granulometria abaixo de $3327\mu\text{m}$. Portanto, duas alíquotas diametralmente opostas foram tomadas do carrossel, ou seja, 15,50kg, cominuída novamente em britador de rolos (AA de 5,4mm) e peneirada na malha de $3327\mu\text{m}$.

Moinho padrão para o teste de Bond (Figura 1) com dimensões, (D x L), iguais a $0,304 \times 0,330\text{m}$ foi utilizado no ensaio. Outras ferramentas como pincéis, espátulas e recipientes para coleta e manuseio das amostras foram necessárias.



Figura 1. Moinho de Bond utilizado nos experimentos.

Para determinar o WI de um minério seco pelo método de Bond, necessita-se de um moinho de bolas padrão operando com carga circulante e a uma velocidade dentre 67 a 73rpm. A carga moedora de bolas é feita de aço e constituída de acordo com as normas do ensaio (Tabela 1).

Tabela 1. A carga de corpos moedores [6].

Número de bolas	Diâmetro das bolas [mm]
94	15,9
71	19,1
67	30,2
43	36,5
10	25,4

Os estágios iniciais do método são moagem de 15 a 30kg de minério com posterior classificação em peneira de 3,33mm de abertura, secagem e homogeneização da massa. A remoção de uma quantidade suficiente de minério e medição da sua densidade aparente com a ajuda de uma proveta graduada de um litro. Uma parte do material deve ser levemente compactado desde a parte mais profunda da proveta até a marca de 700mL, e em seguida vertido em balança e pesado. O procedimento deve ser feito em triplicatas e uma média deve ser tomada como o peso inicial da amostra (M).

Segue-se à análise granulométrica da alimentação na faixa de 3,33 a $0,106\text{mm}$ usando peneiras da série Tyler. Constrói-se um gráfico da porcentagem passagem acumulada versus aberturas das peneiras em μm . A partir deste gráfico determina-se a abertura da peneira que deixa passar 80% do material.

Determina-se, por peneiramento, a massa passante na malha teste. Este é o passante do primeiro ciclo, denominado de A₁ que corresponde à fração com granulometria abaixo da malha teste contida na alimentação.

Carrega-se o moinho com a carga de bolas descrita na Tabela 1 e com a quantidade encontrada de minério (M). No primeiro ciclo, deve-se moer o minério por um número de rotações (NR) definido entre 75 ou 80, dependendo do comportamento do minério à moagem.

Descarrega-se o moinho (minério e bolas) em recipiente apropriado. E procede-se o peneiramento do produto para determinar a massa retida na malha teste (MR_i), a massa passante (MP_i), bem como, a massa de passante líquido (MPL_i).

MPL_i é obtida pela diferença entre os valores contidos de A_i e MP_i. A alimentação nova corresponde, em peso, à fração passante (A_i), porém é retirada da pilha de homogeneização e adicionada ao moinho com a fração retida na peneira teste. Cabe lembrar que a fração passante na malha teste é descartada do circuito e, quando ela for igual à alimentação nova, o sistema estará em equilíbrio.

Calcula-se o valor da alimentação a ser acrescentada em regime (AA) (Equação 1).

$$AA = \frac{M}{(1+2,5)} = \frac{M}{3,5} \quad (1)$$

Dessa forma garante-se uma carga circulante de 250%.

A moabilidade (Mob) é obtida pela razão do valor de passante líquido, gerado no ciclo correspondente, pelo respectivo número de rotações em cada ciclo (Equação 2).

$$Mob = \frac{MPL_i}{NR} \quad (2)$$

Carrega-se novamente o moinho e calcula-se o novo NR para o ciclo seguinte (Equação 3), e realiza-se a moagem novamente.

$$NR_{(i+1)} = \frac{MPL_i}{Mob_i} \quad (3)$$

A verificação do equilíbrio também pode ser realizada por meio do cálculo da média aritmética dos três últimos valores de moabilidade. A diferença entre o maior e menor valor da moabilidade não poderá superar 5% em relação ao valor médio [6].

O padrão brasileiro NBR 11376:1990 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para o teste de Bond, detalha os procedimentos experimentais adotados. Os ensaios para determinação do WI, em laboratório, serão conduzidos em um moinho padrão e circuito fechado descrito na Figura 2.

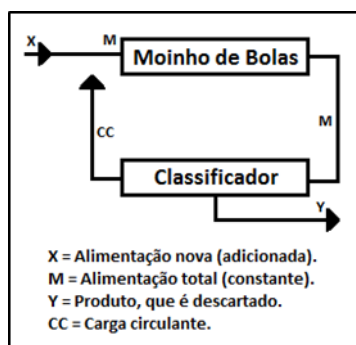


Figura 2. Diagrama esquemático do circuito fechado de moagem (Fonte: ABNT – NBR 11376).

Após o equilíbrio do teste de Bond uma nova análise granulométrica deve ser realizada na fração passante da malha teste utilizando peneiras Tyler abaixo de 148 μ m.

O cálculo do WI pode ser feito através da Equação 4.

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} \times Mob^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{A_{80}}} \right)} \times 1,1 \quad (4)$$

Onde:

WI – work index (kWh/st);

Am – abertura da malha de teste de classificação;

P80 – abertura da peneira onde passam 80 % da massa do produto, em μ m;

A80 – abertura da peneira onde passam 80 % da massa da alimentação, em μ m;

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.

Segundo Rowland (1973), a eficiência energética de um circuito de moagem deve ser estimada com base no WI operacional (Equação 5):

$$WI_{operacional} = \frac{W}{\left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]} \quad (5)$$

Onde E é a energia específica gasta na moagem.

$$E = 10 WI \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] EFi \quad (6)$$

EF_i são fatores de correção.

Os fatores de correção (Equação 6) foram propostos por Rowland (Valadão, 2007) e são aplicáveis aos ensaios de WI realizados. Serão destacados nesse trabalho apenas os fatores necessários de aplicação.

EF1 - Moagem a seco

Utiliza-se o fator igual a 1,3. Este fator exprime o fato de a moagem a seco apresentar menor eficiência que a moagem a úmido.

EF3 - Fator diâmetro do moinho

A eficiência cresce com o aumento do diâmetro até 3,81 m, acima do qual a eficiência se mantém. Para diâmetros menores que 3,81m esse fator é igual a 0,914.

EF7 - Baixa relação de redução em moinho de bolas (Equação 7).

Aplica-se quando a relação de redução é menor que 6.

Os demais fatores EF2, EF4, EF5 e EF6 não são necessários.

$$EF7 = \frac{2(Rr - 1,35) + 0,26}{2(Rr - 1,35)} \quad (7)$$

Define-se, ainda, como relação de redução Rr, Equação 8:

$$Rr = \frac{F_{80}}{P_{80}} \quad (8)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra de itabirito anfíbolítico mostrava bandas de cor marrom escura, formadas por goethita e quartzo (em quantidade variável e notada visualmente) com bandas de hematita e martita, anfíbólio e clorita provavelmente rica em ferro. O anfíbólio e a clorita são raramente observados, pois são os primeiros minerais a serem oxidados no minério de ferro, resultando na formação de goethita. A característica macroscópica mais marcante desses itabiritos é presença da goethita que ocorre com hábito fibroso e por vezes fibrorradiado.

Após preparação do itabirito foram obtidas 12 alíquotas com 7,75 kg cada.

Verificou-se que o itabirito anfíbolítico precisa de cuidados especiais, pois se trata de um material friável, com facilidade de se fragmentar mesmo quando pouco forçado. Nesse caso, para diminuir erros em relação à homogeneização optou-se pela deslamagem no início do processo e o máximo cuidado em manter o material homogêneo, ao retirar alíquotas para compor cada ciclo.

Dessa forma, as massas acrescentadas em cada ensaio foram retiradas de frações da pilha longitudinal. Sendo que, procurava-se retirar, aos poucos, somente a massa necessária para compor o novo ciclo. Se o incremento retirado possuía massa acima da necessária, efetuava-se a homogeneização dessa porção em lona, seguida pelo quarteamento até atingir a massa satisfatória. Todos esses cuidados com a homogeneização e retirada de novas frações durante os trabalhos foram necessários, pois o equilíbrio da moabilidade não estava sendo atingido nos experimentos anteriores. Dessa forma, verificou-se que um dos principais motivos era a homogeneidade das alíquotas dos novos ciclos. Esse problema pode ter ocorrido devido à quantidade de finos da amostra que dificultava alcançar sua homogeneidade.

A Figura 3 representa a análise granulométrica inicial da amostra. A massa do peneiramento foi 193,10 g em um tempo de 20 minutos. O gráfico relaciona a abertura das peneiras e a porcentagem passante em peso.

A Figura 4 apresenta a análise granulométrica da porção passante na malha teste (148 μm) resultante da moagem quando o equilíbrio foi atingido. A massa do peneiramento foi 135,26 g em um tempo de 20 minutos.

A abertura da peneira com 80% passante de 117 μm e esse valor foi utilizado no cálculo do WI.

O valor do WI encontrado foi de 7,09 kWh/st. Com esse valor, calculou-se a energia necessária para a moagem de uma tonelada sendo igual a 5,46 kWh/t.

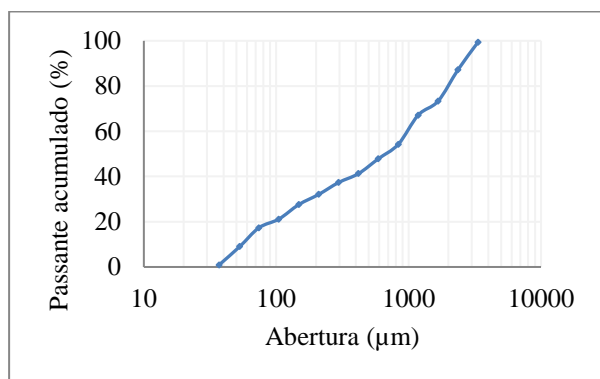


Figura 3. Curva de distribuição granulométrica da alimentação.

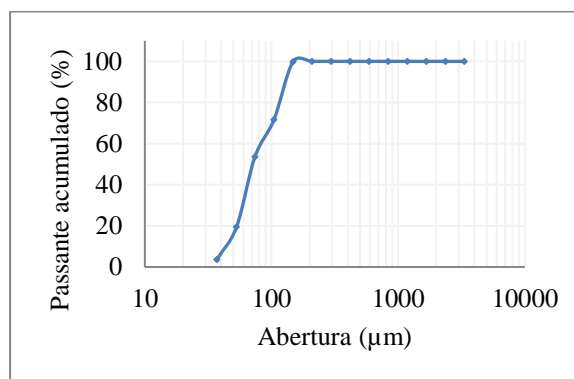


Figura 4. Curva de distribuição granulométrica do produto final.

Conforme mencionado, a bibliografia relata que o WI de minério de ferro varia de 6 a 25 kWh/st dependendo das características do minério e da gênese do seu depósito (Simão, 2010).

De acordo com Yovanovic (2014), diretor da Modelo Operacional (MOPE), na revista minérios, o WI de minérios anfíbolíticos tem sido compreendido entre valores de 7 a 12 kWh/st por testes realizados na Fundação Gorceix, Ouro Preto.

Para o itabirito anfíbolítico da mina Lagoa das Flores, Itaiçu (MG), determinado por Vasconcelos (2011) o WI foi de 7,09 kWh/st, enquanto o índice do itabirito anfíbolítico da Mina Sapecado, Quadrilátero Ferrífero (MG), determinado por Oliveira (2014) foi menor com 6,35 kWh/st.

De acordo com Oliveira (2014), desigualdades dos índices de trabalho podem estar relacionadas à composição mineralógica ou diferença de frações friáveis nas amostras.

4. CONCLUSÕES

Os resultados dos estudos de WI para o minério itabirítico anfíbolítico apresentou valores dentro do âmbito da literatura. O WI encontrado foi de 7,09 kWh/st e a energia de 5,46 kWh/t, para essa tipologia.

Além disso, verificou-se a necessidade de cuidados especiais com tal minério, pois sua facilidade de fragmentação gerou problemas em manter a homogeneidade do material, devido à quantidade de finos gerada durante o manuseio da pilha longitudinal e para a retirada de novas alíquotas a serem alimentadas no moinho. Para solucionar esse problema, aconselha-se efetuar a deslamagem do material no início e homogeneização como maneira de controlar a quantidade de finos existentes, pois o manuseio inevitavelmente produzirá mais finos.

Além disso, para qualquer trabalho de WI é necessário atenção ao teste para que nenhuma medida seja equivocada, pois se trata de um ensaio trabalhoso e demorado. Por essa ótica, apesar de o experimento envolver uma massa considerável, mínimos erros podem resultar em diferenças que se acumulam ao decorrer dos ciclos, impossibilitando a estabilização da mobilidade e conseqüentemente o resultado final.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto, Fundação Gorceix, CAPES, FAPEMIG e ao CNPq.

6. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Moinho de Bolas. Determinação do Índice de Trabalho: NBR 11376. Rio de Janeiro, 1990.

Beraldo JL. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo: Editora Edgar Blücher; 1987.

Bond FC. Crushing and Grinding Calculations Reprints from British Chemical Engineering - Allis Chalmers Publication; 1971.

Figueira HVO, Almeida SLM, Luz AB. Cominuição. Comunicação técnica elaborada para a 4a Edição do Livro de Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM; 2004.

Freitas LS. Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco Mineração S/A. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte; 2014.

Oliveira DM, Souza HN, Cirino JS. Determinação do WI de uma amostra de Itabirito Anfibolítico – 2014. UFOP.

Rocha JMP. Caracterização de Minérios Goethíticos e limoníticos da Mina de Alegria. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte; 1997.

Rowland CA. Comparison of work indices calculated from operation data with those from laboratory test data, IMM (London). In: Proceedings do 10th IMPC. p. 47-61.

Simão HK. Concentrabilidade de minério de ferro de Cateruca. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2010.

Toríbio NM. Estudo das Características Intrínsecas dos Concentrados do Minério de Ferro do Complexo Alegria. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2001.

Valadão GES, Araújo AC. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ª Ed. Belo Horizonte: UFMG; 2007.

Vasconcelos JA. Rotas de processo para concentração de rochas itabiríticas da Mina Lagoa das Flores, Itatiaiuçu, MG. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte; 2011.

Yovanovic AP. Novos moinhos com velhos paradigmas. Disponível em: [/www.revistaminerios.com.br/Publicacoes/3547/novos-moinhos-com-velhosparadigmas.aspx](http://www.revistaminerios.com.br/Publicacoes/3547/novos-moinhos-com-velhosparadigmas.aspx) Acesso em: 25 maio, 2014.