

Tema: Lavra e Tratamento de Minérios

## INFLUÊNCIA DE MINERAIS SULFETADOS NO WI DE UM MINÉRIO DE ZINCO PREDOMINANTEMENTE SILICATADO\*

Fábio de São José<sup>1</sup>  
 Francielle Câmara Nogueira<sup>1</sup>  
 Daniel Geraldo da Cruz<sup>1</sup>  
 Diogo Prado Rodrigues<sup>3</sup>  
 Carlos Alberto Pereira<sup>4</sup>

### Resumo

Sistemas de moagem são projetados baseando-se, entre outros parâmetros, no consumo de energia das rotas existentes. Consideram-se custos com energia um desafio para a indústria mineral, pois a maioria da energia disponível ao processo é inevitavelmente absorvida pelos equipamentos e somente uma menor porção é destinada à fragmentação desejada. Hoje, a maioria das teorias utilizadas na avaliação do desempenho energético parte dos estudos de pesquisadores como Fred Chester Bond. De acordo com Bond, Work Index (WI) é um parâmetro representativo da resistência à moagem do minério, servindo para medir o consumo de energia na fragmentação e para comparar o comportamento de diferentes minérios. Estudos recentes comprovam que o WI de materiais em mistura pode ser medido, geralmente, com alto desvio devido às diferenças existentes de moabilidade de cada tipologia. Este trabalho consistiu na determinação do WI de minério de zinco silicatado com elevações nos teores de esfalerita (ZnS) e galena (PbS), devido à avanços na lavra, minério composto unicamente por willemita e suas misturas. Valores encontrados mostraram que a presença significativa de minerais de classes distintas daquele predominante na frente de lavra pode influenciar na determinação de parâmetros importantes para o processamento mineral. Amostras foram fornecidas pela Votorantim Metais Zinco.

**Palavras-chave:** Work index; Moabilidade; Willemita; Minerais sulfetados.

### INFLUENCE OF SULPHIDES MINERALS INTO WI OF ORE COMPOSED PREDOMINANTLY BY ZINC SILICATE

#### Abstract

Milling systems are designed based on, among other parameters, the power consumption of existing routes. Energy costs may become a challenge in the mining industry since most of the energy available to the process is inevitably absorbed by the equipment and a minor portion is directed to the desired fragmentation. Today, most theories used to assess the energy performance of the studies of researchers such as Fred Chester Bond. According to Bond, Work Index (WI) is a parameter that represents the resistance to crushing of ore, serving to measure the power consumption of fragmentation and to compare the behavior of different minerals. Recent studies prove that the mixture of materials in WI can be measured, usually with high deviation due to differences in grindability of each typology. This work consisted in determining the WI for zinc silicate ore with increases in levels of sphalerite (ZnS) and galena (PbS), due to progress in mining exploration, ore consisting solely of willemite and their mixture (1:1). Values found showed that the significant presence of distinct classes of minerals that prevalent in mining front can influence the determination of important parameters for the mineral processing. Samples were provided by Votorantim Metais Zinco.

**Keywords:** Work index; Grindability; Willemite; Sulphide minerals.

<sup>1</sup> Engenheiro(a) Metalúrgico(a), Mestrando, Depto. de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Controle e Automação, Mestrando, Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro de Minas, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro de Minas, Dr. Professor Associado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A quantidade de energia gasta para manter uma Instalação de Tratamento de Minérios (ITM), por vezes, torna-se um gargalo de produção devido aos elevados custos envolvidos. Como todas as indústrias passam por um cenário de alta competitividade qualquer iniciativa com carácter economicista é visto de forma positiva.

Como as etapas de cominuição são grandes consumidores de energia tornou-se necessário o desenvolvimento de metodologias para avaliar seus gastos energéticos. Neste quesito, o Índice de Trabalho (Work Index - WI) surge como um parâmetro de extrema importância para os processos de beneficiamento mineral. Teoricamente, WI significa a resistência do minério ao esmagamento desenvolvida durante sua cominuição e permite o cálculo da energia requerida para moer o material até o tamanho de partícula desejado. Numericamente, corresponde ao trabalho requerido para cominuir uma tonelada curta de minério a partir de um tamanho considerado infinito, até 80% passante pela abertura de uma malha teste (106  $\mu\text{m}$ ).

A teoria da cominuição está focada na entrada de energia e no tamanho da partícula formada a partir de um determinado tamanho de alimentação. Várias teorias foram desenvolvidas, porém nenhuma das quais é inteiramente satisfatória [1].

A este respeito, o Engenheiro de Minas e Pesquisador americano Fred Chester Bond trabalhou e sugeriu métodos para determinação rápida do WI que pode atender a dinâmica de uma planta de beneficiamento atual, estimando o gasto de energia e permitindo ações corretivas nas operações em tempo real.

Hukki [2] constatou que as equações até então propostas para determinação de WI tinha relação direta com determinada faixa granulométrica. A teoria de Bond seria mais específica e aplicável a faixas granulométricas mais usuais na moagem industrial.

O maior problema reside no fato de que maior parte da energia disponibilizada ao processo de cominuição é desperdiçada pelas próprias máquinas, e somente uma menor fração é utilizada para a redução granulométrica. Espera-se que exista uma relação entre a energia necessária para quebrar o material e a nova superfície produzida, mas esta relação só pode ser manifestada, se a energia consumida para a criação da nova superfície permitir ser medida separadamente. Em um moinho de bolas, por exemplo, pode-se demonstrar que menos de 1% da energia total está disponível para a redução do tamanho inicial, a maior parte da energia é transformada em calor [3].

Natarajan [4] ao publicar trabalho no qual estudou o desgaste de corpos moedores no processamento de minério sulfetado de chumbo-zinco chama a atenção ao afirmar que aproximadamente 60% da energia envolvida no processo é consumida pela britagem e moagem do minério. E a soma destas despesas aos custos envolvendo os desgastes de corpos moedores torna-se o verdadeiro problema no beneficiamento mineral.

Outro fator considerável é a plasticidade dos materiais, elevando o consumo de energia devido somente à mudança de forma pronunciada, retendo energia sem criar novas superfícies. Portanto, as teorias de cominuição precisam assumir que o material a priori é frágil e que nenhuma energia de processo é adsorvida por alongamento ou a contração e sim é fielmente utilizada na ruptura dos materiais, sendo uma consideração idealista.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A teoria mais antiga é atribuída a von Rittinger e afirma que a energia consumida durante a redução de tamanho de sólidos é proporcional à área da nova superfície produzida [3].

O trabalho apresentado consistiu em determinar o WI para um minério constituído unicamente por willemita, minério predominantemente composto por zinco silicatado, mas com consideráveis teores de esfalerita (sulfeto de zinco) e galena (sulfeto de chumbo), um não portador de zinco e a mistura destes minérios. Todas as amostras foram fornecidas pela Votorantim Metais Zinco e foi utilizado um moinho de bolas padrão para aplicação do Método de Bond.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Amostras estudadas

(S1): amostra de minério willemítico (mineral-minério: willemita e como ganga: dolomita, quartzo, clorita, calcita, etc.);

(S2): amostram de minério de zinco predominantemente silicatado com maiores teores de sulfetos de zinco e chumbo com prata associada;

(Blendada): 50% de S1 + 50% de S2

#### 2.1.1 Caracterização das amostras

A caracterização das amostras envolveram análises químicas por faixa granulométricas para determinação de teores dos principais elementos e análises mineralógicas qualitativamente por difração de raios X.

### 2.2 Determinação do Work Index pelo Método de Bond

Os ensaios foram realizados a fim de determinar o Work Index de um minério proveniente de Votorantim Metais Zinco localizada em Vazante, no noroeste de Minas Gerais, Brasil, constituído predominantemente por willemita, um mineral-minério de zinco silicatado, e que em meados da década de 2000 apresentou crescentes níveis de esfalerita (ZnS) e outros minerais como galena (PbS). Um moinho padrão (Figura 1) com dimensões, (D x L), iguais a 0,304 x 0,330 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 [5], necessita-se de um moinho de bolas padrão operando com carga circulante e a uma velocidade

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

dentre 67 a 73 rpm. A carga moedora de bolas é feita de aço e distribuída de acordo com 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 de Bond são moagem de 15 a 30 kg de minério com posterior classificação em peneira de 3,33 mm 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 1L. Uma parte do material deve ser levemente compactado desde a parte inferior da proveta até sua marca de 700 mL, e em seguida ser pesado. O procedimento deve ser feito em triplicata e uma média deve ser tomada como o peso inicial da amostra (M).

Segue-se a análise granulométrica da alimentação na faixa de 3,33 a 0,106 mm usando peneiras da série Tyler. Constrói-se um gráfico da porcentagem passagem acumulada versus aberturas das peneiras em milímetros. A partir deste gráfico determina-se a abertura na qual 80% do material é passante.

Determina-se, por peneiramento, a massa passante na malha teste. Este é o passante do primeiro ciclo, denominado de  $A_1$  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 com a quantidade (M) de minério encontrada. No primeiro ciclo, deve-se moer o minério por um número de rotações (NR) definido, por exemplo, 75 ou 80, dependendo das características do minério quanto 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).

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

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



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

O padrão brasileiro ABNT NBR 11376:1990 para o teste de Bond detalha os procedimentos experimentais adotados.

### 2.3 A análise Granulométrica – Amostras S1 e S2

Análises granulométricas da alimentação inicial e do produto final devem ser realizadas à seco, conforme a metodologia adotada. As amostras para peneiramento devem ser cuidadosamente homogeneizadas e quarteadas em divisor apropriado. Peneiras da série Tyler foram utilizadas, conforme sugerido pelo padrão ABNT NBR 11376:1990.

### 2.4 Cálculo de WI

Bond propôs o uso de um índice conhecido como WI (Work Index) ou Índice de Trabalho, que é definido como o trabalho necessário para reduzir a unidade de peso (tonelada curta = 907 kg) do material considerado, desde um tamanho inicial, teoricamente infinito ( $F = \infty$ ), até uma granulometria 80% passante em 106  $\mu\text{m}$  (malha teste) (Equação 4).

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} \times Mob^{0,82} \times \left[ \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]} \times 1,102 \quad (4)$$

WI: Work Index, em [kWh/st]

$P_{80}$ : abertura em que 80% do produto passa [ $\mu\text{m}$ ];

$F_{80}$ : abertura em que 80% da alimentação passa [ $\mu\text{m}$ ];

Mob: média dos três últimos valores do índice de moabilidade no estado de equilíbrio [g/revolução];

Am: abertura da peneira teste [ $\mu\text{m}$ ];

1,102: fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica.

Segundo Rowland [7], a eficiência energética de um circuito de moagem deve ser estimada com base no WI operacional (Equação 5):

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

Onde W é a energia específica gasta na moagem.

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

EFi são fatores de correção.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Os fatores de correção (Equação 6) foram propostos por Rowland [7] e são aplicáveis aos ensaios de WI realizados.

- EF<sub>1</sub> - 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.

- EF<sub>3</sub> - Fator diâmetro

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

- EF<sub>7</sub> - Baixa relação de redução em moinho de bolas (Equação 7).

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

$$EF_7 = \frac{2(R_r - 1,35) + 0,26}{2(R_r - 1,35)} \quad (7)$$

Define-se, ainda, como relação de redução R<sub>r</sub>, Equação 8:

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

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização das Amostras

#### 3.1.1 Análise granuloquímica e difração de raios X da amostra S1

Análise granuloquímica da amostra (S1) revelou que o teor de zinco é maior nas faixas granulométricas inferiores a 150#, nas quais o teor médio de SiO<sub>2</sub> foi superior a 36% [8].

Oliveira e Pereira [8] também caracterizaram a amostra (S1) por difração de raios X. Com resultado, apresenta-se o difratograma da Figura 3. Constata-se a predominância da espécie silicatada portadora de zinco.

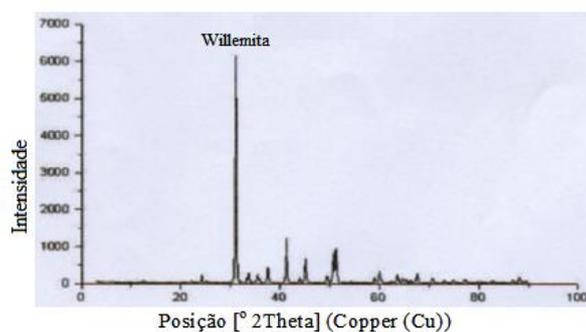


Figura 2. Difratograma da Willemita [8].

#### 3.1.2 Análise granuloquímica e difração de raios X da amostra S2

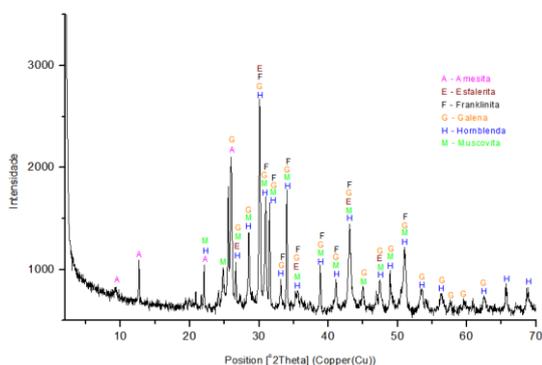
Resultados da análise granuloquímica da amostra (S2) (Tabela 2). Os teores de zinco foram obtidos por meio de análise utilizando padrão para zinco silicatado. O chumbo presente na amostra é devido majoritariamente à forma PbS.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

**Tabela 2.** Resultado da análise granulométrica do minério de zinco.

Tamanho		Teores		
#	µm	Ag (ppm)	%Pb	%Zn
+100	147	9367,34	19,65	20,54
+150	104	6371,78	18,66	25,63
+270	53	3714,24	17,14	23,97
+400	37	2800,81	18,54	23,68
-400	-37	1544,48	14,49	14,74
Teor médio		2168,05	15,17	16,47

Por outro lado, o difratograma de raios X da amostra (S2) pulverizada (Figura 2) revelou a presença dos minerais franklinita [ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>], galena [PbS], esfalerita [ZnS], moscovita [KAl<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>B)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>], hornblenda [NaCa<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>(Si<sub>7</sub>Al)O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>] e amesita [Mg<sub>2</sub>Al(AlSiO<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>].

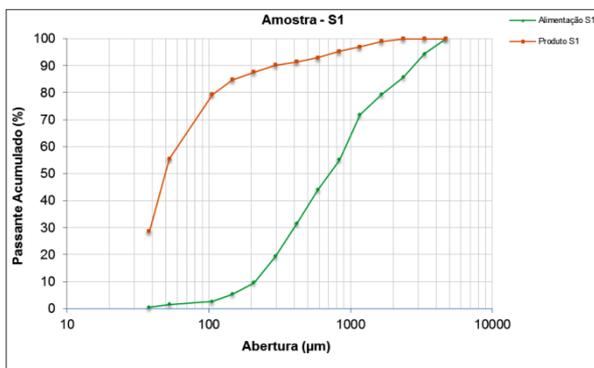


**Figura 3.** Difratoograma do minério de zinco analisado.

Estes resultados confirmam a composição do minério estudado e mostram a presença de outros minerais não silicatados, principalmente galena, esfalerita e hornblenda.

### 3.2 Determinação do WI para a Amostra S1

As curvas do gráfico seguinte (Figura 4) representam as distribuições granulométricas da alimentação e do produto final do teste de WI da amostra S1.



**Figura 4.** Distribuição granulométrica da alimentação e produto final para a amostra S1.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

### 3.3 Determinação do WI para a Amostra S2

As curvas do gráfico seguinte (Figura 5) representam as distribuições granulométricas da alimentação e do produto final do teste de WI da amostra S2.

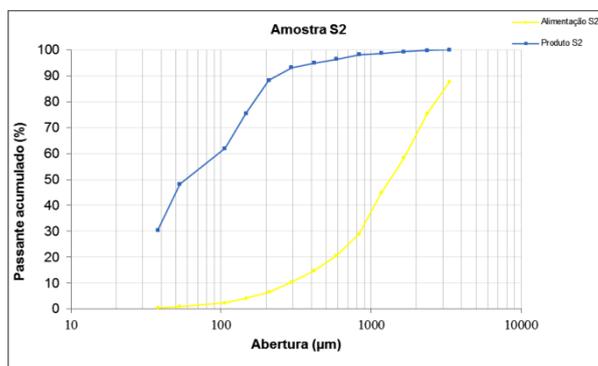


Figura 5. Distribuição granulométrica da alimentação e produto final para a amostra S2.

### 3.4 Determinação do WI para a Amostra Blendada

As curvas do gráfico seguinte (Figura 6) representam as distribuições granulométricas da alimentação e do produto final do teste de WI da amostra blendada.

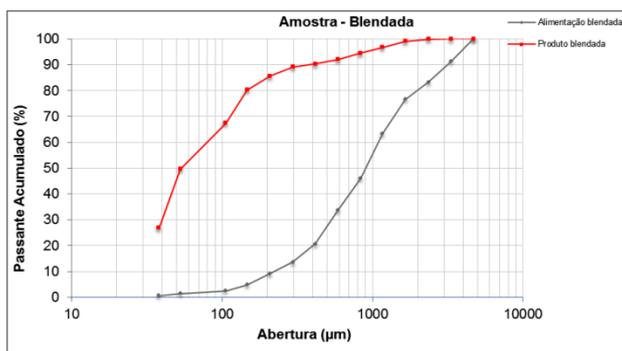


Figura 6. Distribuição granulométrica da alimentação e produto final para a amostra Blendada.

A Tabela 3 resume os valores de WI obtidos por meio dos cálculos e ensaios realizados, assim como os valores do mesmo parâmetro corrigido ( $WI_{op}$  corrigido). Os valores de moabilidade apresentados referem-se às médias aritméticas obtidas a partir dos três últimos ciclos do ensaio após estabilização do sistema.

**Tabela 3.** Valores de WI obtidos por meio dos cálculos e ensaios realizados.

Amostra	Moabilidade média (gramas/revolução)	WI Bond (kWh/st)	$WI_{op}$ corrigido (kWh/st)
S1 (willemita)	1,20	20,35	24,39
S2 (willemita + sulfetos)	1,22	24,65	29,54
Blendada (S1 + S2)	1,22	23,56	28,29

Figueira et al. [9] citaram no trabalho, “Estudo de um método simplificado para determinação do Índice de Trabalho e sua aplicação à remoagem”, que minérios willemíticos apresentam um Índice de Trabalho médio em torno de 19,42 kWh/t.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Segundo Beraldo [10] a faixa de WI para minério de chumbo-zinco é de 7 a 26 kWh/t o que traduz a tenacidade deste minério à fragmentação. Este fato pode estar relacionado à maior competência dos minerais sulfetados de chumbo diante da fragmentação.

O Índice de Trabalho de materiais não homogêneos pode ser medido, geralmente, com alto desvio motivado por suas diferenças de moabilidade [11].

Fato que contribui para que os dados de literatura sejam divulgados em faixas e não em valores aproximados.

Csóke et al. [11] salienta também que ocorrem diferenças significativas no parâmetro WI quando se estuda a mistura de materiais. Hosten e Avsar [12] provaram que o WI de uma mistura de clínquer e tufo pozolânico não pode ser determinado por simples média ponderada de resultados de cada material ensaiado separadamente.

Por esta ótica, verifica-se a mesma influência da presença de minerais sulfetados no valor de WI do minério silicatado estudado, deslocando seu valor para faixas consideradas aos minérios tipo chumbo-zinco.

## 4 CONCLUSÕES

Conclui-se pelo trabalho desenvolvido que a presença significativa de minerais de classes distintas daquele predominante na frente de lavra pode influenciar na determinação de parâmetros importantes para o processamento mineral como moabilidade, levando a subestimativa ou supervalorização de dados e fatores.

Salienta-se que as amostras foram consideradas representativas e que a variabilidade na tipologia mineral, devido as diferentes classes minerais, influencia diretamente no desempenho da moagem durante processamento mineral.

Minerais que apresentam comportamento mais competente a fragmentação, como a galena nesse estudo, contribuem proporcionalmente para a elevação do parâmetro WI com conseqüente aumento do gasto energético. Nesse aspecto a partir dos trabalhos de moagem realizados conclui-se que a amostra denominada blendada, com proporção de minerais sulfetado maior, apresentou elevação no valor do parâmetro WI quando comparando-se a amostra constituída somente por willemita.

Em números, a elevação no valor do parâmetro WI foi exatamente de 21,11% analisando-se resultados entre a amostra somente de willemita e willemita mais sulfetos. Com a amostra blendada a elevação foi de aproximadamente 16%.

## Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto, Fundação Gorceix, CAPES, FAPEMIG e ao CNPq.

## REFERÊNCIAS

- 1 Wills BA, Atkinson K. Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies, *Minerals Engineering*, 1993; 6(7): 697, 1993.
- 2 Hukki RT. Proposal for a Solomonian Settlement between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond, *Transactions on AIME*, 1961; 220: 403-408.
- 3 Wills BA. *Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7. Cornwall: Pergamon Press, p. 785, 2006.
- 4 Natarajan KA. Ball wear and its control in the grinding of a lead-zinc sulphide ore. *International Journal of Mineral Processing*, 1992; 34: 161-175.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



- 5 Bond FC. Crushing and Grinding Calculations: Part I. British Chemical Engineering, 1961; 6: 375-385.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 11376:1990: Moinho de bolas - determinação do índice de trabalho, Rio de Janeiro, p. 4, 1990.
- 7 Rowland CA, Kjos DM, Rod Mills, Ball Mills. In: Mineral Processing Plant Design. Cap. 12. New York: SME, 1969. p. 239-278.
- 8 Oliveira H, Pereira CA. Estudo do efeito de dispersantes na concentração de minério calamínico. SISBIN/UFOP. 2003; p. 102-110.
- 9 Figueira HV, Pretti LA, Valle LRM. Estudo de um método simplificado para determinação do "Índice de Trabalho" e sua aplicação à remoagem. CETEM, Nº 36, p. 42, 1985.
- 10 Beraldo JL. Moagem em moinhos tubulares. São Paulo: Edgar Blücher; 1987.
- 11 Csóke B, Rácz A, Mucsi G. Determination of the Bond work index of binary mixtures by different methods. International Journal of Mineral Processing 123 (2013) 78–86.
- 12 Hosten C, Avsar C. Grindability of mixtures of cement clinker and trass. Cem. Concr. Res. 28 (11), 1519–1524. 1998.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.