



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



PAULO HENRIQUE MAGALHÃES SILVA

CÁLCULO DO WI DE BOLAS PARA DIFERENTES MISTURAS DE MINÉRIOS

**OURO PRETO
2024**

PAULO HENRIQUE MAGALHÃES SILVA

CÁLCULO DO WI DE BOLAS DE DIFERENTES MISTURAS DE MINÉRIOS DE FERRO

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Processamento Mineral

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586c Silva, Paulo Henrique Magalhaes.
Cálculo do WI de bolas de diferentes misturas de minérios de ferro.
[manuscrito] / Paulo Henrique Magalhaes Silva. - 2024.
53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Cominuição (Beneficiamento de
minério). 3. Minério de ferro. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Henrique Magalhães Silva

Cálculo do WI de bolas para diferentes misturas de minérios

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 04 de outubro de 2024

Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutora] - Francielle Câmara Nogueira - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Engenheiro de Minas] - Fernando Barros Puperi - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/10/2024, às 13:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0795989** e o código CRC **41FE51C8**.

À Deus.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me possibilitar chegar até essa etapa da minha graduação, onde, repleta de adversidades, conseguiu retirar o melhor da minha capacidade intelectual. Aos meus familiares em especial aos meus pais Maria das Graças Magalhães Silva e José Silva por sempre me apoiarem nesta caminhada que se iniciou no ano de 2019. A minha irmã Verônica Magalhães Silva por ser sempre muito mais que uma irmã uma amiga nas horas difíceis e por fim a minha namorada Brendha, por sempre me ajudar nas dificuldades da graduação principalmente durante a realização deste trabalho.

Deixo também o agradecimento aos professores e funcionários do departamento de Engenharia de Minas da Universidade de Ouro Preto, em especial ao professor orientador, Vladimir Kronemberger Alves, pelo suporte e acompanhamento fornecido durante a realização do curso, e em especial durante a realização deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desta monografia e durante a minha passagem pela graduação de Engenharia de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto, a qual agradeço o ensino de ótima qualidade e de forma gratuita, onde todo o suporte foi prestado de forma excepcional.

RESUMO

O consumo energético no processo de cominuição corresponde até 80% de todo o processamento mineral. Diante disso, se faz necessário o estudo detalhado de todo o projeto de britagem e moagem, desde da escala laboratorial até o cenário industrial. Atualmente, o minério de ferro apresenta alto valor de *Ball Work Index (BWI)* e teor de ferro cada vez mais baixo, fato vivenciado em diversas regiões do Brasil, com destaque para o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Uma medida para contornar este cenário é a criação de blends intermediários dentro da mina, para posterior alimentação do sistema de britagem e moagem, utilizando o minério com características que resultem em uma boa performance do sistema. O presente trabalho tem como objetivo, a verificação do caráter não-aditivo do *BWI*. Assim, o *BWI* de uma blendagem de dois minerais diferentes não pode ser calculado por uma média ponderada, como ocorre com o teor e densidade, que são consideradas variáveis aditivas. Para realização do estudo, considerou-se uma mistura binária de minérios de ferro coletados em duas minas localizadas no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, próximas à cidade de Itabirito, utilizando metodologias validadas, para realização de testes de determinação do índice de trabalho de um moinho de bolas (*BWI*). Os resultados obtidos concluíram que, o *BWI* não pode ser caracterizado como uma variável aditiva. No entanto para misturas de minérios de ferro onde mais de 75% da massa seja composta pelo material de maior resistência à cominuição, o *BWI* tende a ter um caráter aditivo, fato esse, devido ao acúmulo das partículas mais competentes dentro do moinho. Por fim, o estudo analisou a estimativa do *BWI* de uma mistura através de um modelo matemático, proposto por Tavares e Kallembach (2013), apresentando resultados consistentes entre os valores experimentais e teóricos.

Palavras-Chave: *BWI*; Cominuição; Eficiência energética; Minério de ferro; Mistura de minérios.

ABSTRACT

Energy consumption in the crushing process accounts for up to 80% of all mineral processing. Therefore, a detailed study of the entire crushing and grinding project is necessary, from the laboratory scale to the industrial scenario. Currently, iron ore has a high Ball Work Index (BWI) value and increasingly lower iron content, a fact experienced in several regions of Brazil, especially the Iron Quadrangle of Minas Gerais. One measure to overcome this scenario is the creation of intermediate blends within the mine, for later feeding of the crushing and grinding system, using ore with characteristics that result in good system performance. The present work aims to verify the non-additive nature of the BWI. Thus, the BWI of a blend of two different minerals cannot be calculated by a weighted average, as is the case with grade and density, which are considered additive variables. To carry out the study, a binary mixture of iron ores collected from two mines located in the Iron Quadrangle of Minas Gerais, near the city of Itabirito, was considered, using validated methodologies, to perform tests to determine the work index of a ball mill (BWI). The results obtained concluded that the BWI cannot be characterized as an additive variable. However, for mixtures of iron ores where more than 75% of the mass is composed of the material with the greatest resistance to comminution, the BWI tends to have an additive character, a fact due to the accumulation of the most competent particles inside the mill. Finally, the study analyzed the estimate of the BWI of a mixture through a mathematical model proposed by Tavares and Kallembach (2013), presenting consistent results between the experimental and theoretical values.

Keywords: *BWI*; Comminution; Energy efficiency; Iron ore; Mineral mixture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Britador de Mandíbula à esquerda e britador de Rolos à direita	23
Figura 2 - Pilha formada com o material A hematita	24
Figura 3 - Pilha formada com o Material B itabirito	24
Figura 4 - Representação do quarteamento em pilha cônica	25
Figura 6 – Pilhas cônicas longitudinais formadas para a realização dos testes de BWI	26
Figura 7 - Software VKABWI.....	27
Figura 9 - Moinho de Bond utilizado para realização dos testes.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de correção de EF2	16
Tabela 2 - Valores de referência de BWI	18
Tabela 3 - Série de peneiras utilizadas segundo a série de Tyler.	27
Tabela 4 - Proporção de cada amostra para a realização dos testes.	28
Tabela 5 - Número de bolas utilizado.....	29
Tabela 6 - Massa obtida pelo quarteamento das massas de A e B	31
Tabela 9 – Massa em gramas, obtidas em 700 mL para início dos testes de moagem.....	33
Tabela 10 - Valores de BWI, P80 e F80 obtidos experimentalmente.	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 FRAGMENTAÇÃO	13
3.2 TEORIAS DA COMINUIÇÃO	14
3.3 PRIMEIRA LEI DA COMINUIÇÃO	14
3.3.1 Segunda Lei da cominuição	14
3.3.2 Terceira lei da cominuição	15
3.4 FATORES DE CORREÇÃO DE ROWLAND	16
3.5 VALORES DE REFERÊNCIA DE BWI	18
3.6 MISTURA DE MINÉRIOS.	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	23
5. RESULTADOS	31
6. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37
7. APÊNDICE	40

1. INTRODUÇÃO

A constante necessidade de redução de custos no processo de cominuição mineral leva as empresas a buscarem alternativas para a redução do consumo energético associado ao processo, aumentando, assim, desempenho das operações, para ainda sim continuarem a competitividade do mercado. O valor da tonelada do minério de ferro se encontra estabilizado em torno de US\$ 105,0/t, o que não tem sido considerado atrativo para novos investimentos (Investing.com, 2024).

O processo de cominuição é composto pelas etapas de britagem e moagem de minérios de ferro, e o consumo energético dessas etapas pode chegar a cerca de 80% de todo o processo de beneficiamento mineral (Figueira *et al.*, 2006). Portanto é de suma importância o estudo relacionado a etapa de fragmentação, uma vez que qualquer melhoria no processo resulta em significativa economia no empreendimento. (Vargas *et al.*, 2010).

Outro desafio atual é o teor decrescente de minério de ferro, que resulta em uma necessidade de aprimoramento das etapas de concentração como é o cenário vivenciado no quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Atualmente os minérios de alto teor estão ficando cada vez mais escassos, como por exemplo as hematitas de teores em torno de 64% de ferro em sua composição, sendo elas substituídas por minérios de itabirito compactos de baixo teor, com cerca de aproximadamente 40% de ferro. Para alcançar um material que atenda os parâmetros de alimentação (propriedades físicas e químicas) determinados pela fase de concentração, é comum a realização de um blend de materiais dentro da mina para assim chegar em um *Run of Mine (ROM)* com as especificações adequadas tanto em teores quanto em consumo energético.

Para a realização do blend algumas questões devem ser levadas em consideração, pois erros, podem impactar o desempenho posterior, como: Teores, Consumo Energético da Cominuição, concentração de contaminantes e alto índice de granulado ou finos.

Para a estimativa do consumo energético de uma mistura de minérios, é necessário estudo detalhado, visto que o material de maior resistência à fragmentação tende a se acumular dentro do moinho, uma vez que se aumenta o número de ciclos da moagem em escala laboratorial (Tavares e Kallembach, 2013). Ou seja, caso o material de maior *BWI* seja a de maior porcentagem na mistura, o processo de moagem será impactado de forma muito severa, onde o material que se acumula dentro do moinho será fragmentado com maior dificuldade ocasionando assim uma elevação no valor do *BWI*.

Este trabalho consiste em avaliar o valor do *BWI* para diferentes misturas de minérios. O material de estudo é proveniente de duas minas que alimentam uma mesma usina de cominuição e concentração, para posterior alimentação da etapa de pelotização. Localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero, próximo a cidade de Itabirito contendo litologias diferentes: hematita e itabiritos. Dentro do estudo foram realizados ensaios de *BWI* com diferentes proporções dessas misturas, utilizando um software para cálculo dos valores do índice de trabalho para moinhos de bolas, conforme a metodologia proposta por Alves, Castro e Thums (2023).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a determinação do *BWI* de diferentes misturas de minérios de ferro, compostas por hematita e itabirito compacto, através do método de Bond, e comparar com o modelo de determinação de *BWI* de misturas de minérios de ferro proposto por Tavares e Kallemback (2013).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o ensaio de determinação do índice de trabalho de um moinho de bolas em escala laboratorial.
- Verificar o carácter não-aditivo do *BWI*.
- Comparar o resultado do *BWI* experimental de diferentes misturas de minérios com o modelo proposto por Tavares e Kallemback.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Comumente as reservas de minério de ferro apresentam matérias primas em condições que necessitam de um processamento mínimo posterior à sua extração para redução da dimensão dos blocos heterogêneos a um tamanho possível para manejo nas indústrias posteriores. Para tanto, é necessário cominuir o material extraído, ou seja, realizar operações de redução das partículas minerais de forma controlada até se atingir um objetivo determinado por uma especificação (Wills e Finch, 2015).

3.1 FRAGMENTAÇÃO

Dentro das etapas do processamento dos minerais, existem as chamadas fases de cominuição do material para que o mesmo possa ser reduzido a um tamanho ao qual ocorra a liberação das partículas de interesse. Nesta etapa, estão compreendidas a britagem e a moagem, sendo que a britagem visa reduzir o material proveniente, da mina chamado *ROM*, até uma dimensão adequada para alimentação do processo subsequente, que é a moagem. O processo de britagem é constituído por várias etapas e diferentes tipos de equipamentos em série, como britadores de mandíbula, rolos, cônicos, giratórios, entre outros. O processo pode se estender até a britagem quaternária em alguns casos, mas, usualmente é utilizado até a etapa da britagem terciária (Figueira *et al.*, 2010).

Já no processo de moagem, acontece uma padronização dos equipamentos responsáveis pela fragmentação do material até se atingir a liberação das partículas de interesse. Segundo Figueira *et al.* (2010), na etapa de moagem, as partículas são fragmentadas por uma combinação de forças até um tamanho adequado para etapas posteriores de concentração. Cada tipo de minério possui uma granulometria adequada para moagem, a ser definida por diversos fatores como o grau de liberação da ganga e do mineral de valor além do método de concentração aplicado. Para este processo, utilizam os moinhos, que são equipamentos que podem ser preenchidos com diferentes tipos de corpos moedores que realizam a cominuição do material, sendo alguns deles: bolas, barras, *cylpebs* outros. A escolha do corpo moedor varia de acordo com a granulometria desejada, assim como as características do material (Junior e Sampaio, 2007).

Segundo Alves (2006), na etapa de moagem alguns valores são de suma importância para o seu conhecimento e controle, sendo eles: consumo específico de energia (E), determinado em kWh/t, que representa o consumo líquido de energia (kWh) por tonelada de alimentação nova processada; carga circulante (CC), sendo definida como a razão entre a tonelada seca de descarga do *underflow* e do *overflow* do classificador.

3.2 TEORIAS DA COMINUIÇÃO

Dentro da literatura existem três principais leis da cominuição, sendo elas propostas por von Rittinger, Kick e Bond (Figueira *et al*, 2010) que correlacionam o consumo específico de energia com a geração de finos de determinado material.

3.3 PRIMEIRA LEI DA COMINUIÇÃO

Estabelece a relação onde a energia específica consumida pelo incremento de superfície que resulta na redução das partículas sendo diretamente proporcional à nova superfície gerada no processo (Rittinger, 1867; Alves, 2006).

$$E = K \left(\frac{1}{dp - \frac{1}{Da}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

E: energia consumida por unidade de massa da alimentação;

dp: diâmetro da partícula do produto;

Da: diâmetro da partícula da alimentação;

K: constante de proporcionalidade.

3.3.1 SEGUNDA LEI DA COMINUIÇÃO

Considera que a energia para se reduzir as partículas é proporcional a uma razão entre o tamanho máximo da alimentação e o tamanho máximo do produto do sistema (Kick 1885; Alves 2006).

$$E = K \ln \left(\frac{Da}{dp} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E: energia consumida por unidade de massa da alimentação;

Da: diâmetro da partícula na alimentação;

dp: diâmetro da partícula no produto;

K: constante de proporcionalidade.

3.3.2 TERCEIRA LEI DA COMINUIÇÃO

Atualmente a teoria mais aceita e estudada é a lei de Bond (1952). O autor determinou através de diversos testes realizados em escala laboratorial, piloto e industrial que a energia consumida no processo de fragmentação das partículas é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho.

$$W = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

W: Potência consumida (kWh/st);

P80: d80 do produto (um);

F80: d80 da alimentação (um);

WI: *Work Index* (kWh/st).

No entanto, existem alguns aspectos que a teoria não consegue abranger. De acordo com Alves (2006), a equação retorna o consumo de potência em kWh/st para moagem a úmido, em um moinho com dimensões de 8” (2438mm). Além de ser válida apenas para moinhos de barras que operam em circuito aberto e em circuito de moagem fechado para moinhos de bolas (Rowland JR, 1982).

Segundo Campos (2019), o índice de trabalho de Bond para moagem de bolas representa a energia em kWh/t requerida para reduzir um material específico, em um moinho de bolas, de um tamanho teoricamente infinito para um produto com 80% na malha de 106µm.

$$BWI = \frac{49,0}{Am^{0,23} \cdot Mob^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

BWI: é o índice de trabalho para moinho de bolas, em kWh/t;

Am: é a malha de teste em µm;

Mob: é definido como o índice de moabilidade.

3.4 FATORES DE CORREÇÃO DE ROWLAND

Buscando se obter os valores de potência consumidos no processo de cominuição para diferentes condições de trabalho, foram postulados por Rowland oito fatores de correção que são multiplicados pelo valor de W. Esses oito fatores são descritos abaixo (Figueira *et al.* 2010).

EF1 – Moagem a seco.

Para moagem a seco, temos o incremento de 30% no consumo energético comparando com a moagem a úmido. Utilizamos, portanto, o fator de correção abaixo:

$$EF1 = 1,3$$

EF2 – Circuito Aberto

Caso o circuito de moagem de bolas seja do tipo aberto, é necessário a multiplicação do valor de W pelos fatores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de correção de EF2

% do produto que seja menor que a malha de teste do BWI de bancada	EF2
50	1,035
60	1,05
70	1,10
80	1,20
90	1,40
92	1,46
95	1,57
99	1,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

EF3 – Diâmetro interno do moinho

Se o diâmetro do moinho seja diferente de 8", deve-se multiplicar por:

$$EF3 = (8/D)^{0,2}, \text{ caso o diâmetro interno do moinho (D) esteja em pés.}$$

$$EF3 = (2,44/D)^{0,2}, \text{ caso o diâmetro interno do moinho (D) esteja em metros.}$$

EF4 – Alimentação muito grossa.

Esse fator é empregado onde a alimentação F_{80} seja superior ao tamanho ótimo da alimentação, sendo este determinado pela equação 5 e 6:

Para moinhos de bolas temos a equação 5.

$$F_0 = 4000 \cdot \frac{\sqrt{13}}{WI} \quad \text{Equação 5}$$

Para moinhos de barras temos a equação 6.

$$F_0 = 16000 \cdot \frac{\sqrt{13}}{WI} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

F_0 : é o tamanho ótimo da alimentação, em μm ;

WI: é o valor de work index operacional, em st.

Para uma alimentação muito grossa utilizamos o fator expresso pela equação 6 e 7 abaixo.

$$EF4 = \frac{RR + (WI - 7) \times \left(\frac{F_{80} - F_0}{F_0} \right)}{RR} \quad \text{Equação 7}$$

$$RR = \frac{F_{80}}{P_{80}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

RR: é a relação de redução do moinho.

EF5 – Produto muito fino

Caso o P_{80} seja inferior a $74\mu\text{m}$ o fator de correção abaixo deve ser empregado, como apresentado na equação 8.

$$EF5 = \frac{P_{80} + 10,3}{1,145 \times P_{80}} \quad \text{Equação 9}$$

EF6 – Relação de redução

Caso a RR para o moinho de bolas calculada no EF4 seja inferior a 6, o fator abaixo é empregado, como apresentado na equação 9.

$$EF7 = \frac{(RR-1,35)+0,26}{2 \times (RR-1,35)} \quad \text{Equação 10}$$

EF8 – Ineficiência dos moinhos de barras

Esse fator corresponde a ineficiência dos moinhos de barras, compensando a distinção entre as potências calculadas pela fórmula e as potências reais consumidas.

Para um moinho de barras sozinho em um circuito de moagem temos:

EF8 = 1,4, se a alimentação é proveniente de um circuito aberto de britagem;

EF8 = 1,2, se a alimentação vem de um circuito fechado de britagem.

Para um moinho de barras trabalhando em conjunto com um moinho de bolas, sem a presença do sistema de classificação em ambos;

EF8 = 1,2, se a alimentação é proveniente de um sistema aberto de britagem;

EF8 = 1,0, se a alimentação é proveniente de um sistema fechado de britagem, e possuir um $F_{80} \leq 1/2$ ".

3.5 VALORES DE REFERÊNCIA DE BWI

Dentro dos estudos realizados por Bond (1985), estabelece-se valores para diferentes litologias, servindo para referência no cálculo de BWI. Os valores propostos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de referência de *BWI*

Material	BWI(kWh/t)	Material	BWI (kWh/t)
Andesita	24,39	Mica	148,26
Ardósia	15,24	Minério de Chumbo	12,57
Areia silicosa	18,14	Minério de chumbo-zinco	12,57
Arenito	12,71	Minério de cobre	12,46
Argila	7,83	Minério de cromo	10,58
Argila calcinada	1,58	Minério de espodumênio	15,10
Barita	6,88	Minério de estanho	11,92

Basalto	22,50	Minério de ferro	17,02
Bauxita	10,42	Minério de ferro especularítico	16,98
Calcário	12,80	Minério de ferro hematítico	13,98
Calcário calcítico	11,22	Minério de ferro limonítico	9,31
Carbeto de silício	28,85	Minério de ferro magnetítico	11,25
Carvão	12,53	Minério de ferro oolítico	12,49
Cascalho	27,75	Minério de ferro taconítico	16,39
Cianito	20,80	Minério de Manganês	13,73
Cimento clinker	14,87	Minério de molibdênio	14,30
Cimento cru	11,65	Minério de níquel	13,10
Coque	22,82	Minério de ouro	16,35
Coque Verde de Petróleo	81,35	Minério de pirita	9,81
Coral	11,20	Minério de pirrotita	10,56
Diorito	21,38	Minério de potássio	9,79
Dolomito	12,47	Minério de prata	19,07
Escória	17,37	Minério de rutilo	13,36
Escória de alto Forno de ferro	13,40	Minério de titânio	13,10
Esmeril	64,13	Minério de urânio	19,76
Feldspato	12,86	Minério de zinco	13,69
Ferro-cromo	9,78	Pedra-pomes	13,15

Ferro-manganês	8,56	Quartzito	13,43
Ferro-silicato	14,14	Quartzo	14,08
Flourita	10,76	Rocha fosfática	11,17
Fosfato fertilizante	14,36	Sal de potássio	9,07
Ferro-cromo	9,78	Pedra-pomes	13,15
Ferro-manganês	8,56	Quartzito	13,43
Ferro-silicato	14,14	Quartzo	14,08
Flourita	10,76	Rocha fosfática	11,17
Fosfato fertilizante	14,36	Sal de potássio	9,07
Ferro-cromo	9,78	Pedra-pomes	13,15
Ferro-manganês	8,56	Quartzito	13,43
Ferro-silicato	14,14	Quartzo	14,08
Flourita	10,76	Rocha fosfática	11,17
Fosfato fertilizante	14,36	Sal de potássio	9,07
Gabro	20,34	Sienito	16,42
Galena	11,23	Sílex	28,84
Gnaisse	22,19	Sílica	14,91
Grafita	49,64	Silicato de sódio	14,33
Granada	13,64	Sínter	9,67
Granito	15,86	Vidro	3,40
Ilmenita	14,45	Xisto betuminoso	19,95
Magnesita calcinada	18,52	Xisto	18,08

3.6 MISTURA DE MINÉRIOS.

A geometalurgia é uma importante ferramenta para se compreender e analisar diversas litologias de uma mina, correlacionando propriedades geológicas e metalúrgicas. Sendo que, atualmente os minérios de ferros possuem teores cada vez menores e valores de consumo energético mais elevados (Bueno, 2015). Dentro de um estudo geometalurgico alguns dos parâmetros analisados são: grau de liberação das partículas, requerimento energético e recuperação do material de interesse na rota de processamento. No modelo de blocos de uma mina esses valores são imputados dentro do mesmo, para se planejar o *blend* para melhor atendimento da usina, no entanto, o modelo de blocos pode superestimar os maciços rochosos de baixa qualidade e subestimar os maciços rochosos de boa qualidade (Eivazy, 2016).

Partindo do originalizado, observamos que, nem todas as propriedades possuem carácter aditivo, ou seja, são definidas por meio da média ponderada dos valores das propriedades individuais de cada litologia. Como exemplo, as propriedades de carácter aditivo, podemos citar os teores das substâncias presentes nas amostras.

Porém, algumas propriedades não são de carácter aditivo como o *BWI*, sendo caracterizado como não-aditivo, ou seja, em um primeiro momento ele não pode ser determinado pela mistura de duas ou mais litologias através de uma média ponderadas dos valores de *BWI* de cada litologia (Eivazy, 2016).

Esse fato foi comprovado por alguns autores, como Tavares e Kallemback (2013), sendo o *BWI* um fator aditivo não linear, onde a justificativa é relacionada ao fato do acúmulo de material mais competente dentro do moinho, ao longo do teste de *BWI*, ocasionando o aumento de ciclos ao longo do teste de moagem. Dentro do estudo os autores determinaram que o *BWI* de uma mistura binária é determinado através das equações 10, 11 e 12 abaixo.

$$BWI_{mistura} = \varphi BWI_{maior} + (1 + \varphi) BWI_{menor} \quad \text{Equação 11}$$

$$\varphi = 0,2857\delta + 0,7143\delta \frac{\alpha}{1 + \delta(\alpha-1)} \quad \text{Equação 12}$$

$$\alpha = 3,05 - \frac{2,09}{\left(1 + 0,67 \left(1 - \frac{BWI_{maior}}{BWI_{menor}}\right)\right)^{9,5}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

φ : é a fração mássica da litologia mais competente presente no moinho;

δ : é o percentual da litologia mais competente presente na amostra;

α : é o fator dependente da relação entre os valores de BWI das duas litologias da mistura.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram coletados cerca de 60 quilogramas de minério de ferro das britagens das minas A e B, localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero, próximo a cidade de Itabirito-MG. Foram coletados cerca de 30 quilogramas de cada amostra para a realização deste trabalho. A preparação das amostras respeitou o estabelecido na norma ABNT NBR 3082 (2019), que estabelece, que todas as partes do minério no lote devem ter a mesma oportunidade de serem selecionadas, assegurando a representatividade das amostras.

Todos os experimentos foram realizados utilizando a estrutura do Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Inicialmente, o material foi seco em uma estufa, para a retirada da umidade, posteriormente britado em um britador de mandíbula, cuja abertura de 10 mm na posição aberta. Em seguida, o material passou por uma nova britagem, em um britador de rolos lisos de 5mm de abertura na posição aberta. Ao final deste ciclo, o material foi peneirado em uma peneira com abertura de 3,35mm, e o material retido fosse encaminhado novamente para o britador de rolos. Uma pequena massa ficou acima de 3,35mm e para a fragmentação deste material foi utilizado um martelo de mão com o intuito de realizar a fragmentação, para que o material fosse passante na peneira de 3,35mm. Com isso, foi possível realizar a britagem de toda a amostra e a minimização da formação de finos durante o processo. Na Figura 1 estão apresentados os britadores de mandíbula e de rolos.

Figura 1- Britador de Mandíbula à esquerda e britador de Rolos à direita



Fonte: Autor.

A próxima etapa da preparação das amostras constitui na realização da homogeneização em pilhas cônicas em lona, realizada três vezes e seguida pelo quarteamento com auxílio de uma chapa de aço. As Figuras 2 e 3 demonstram as pilhas formadas pelos materiais A e B para efeito de comparação de escala a figura 3 está comparada com uma pá manual comum.

Figura 2 - Pilha formada com o material A hematita



Fonte: Autor.

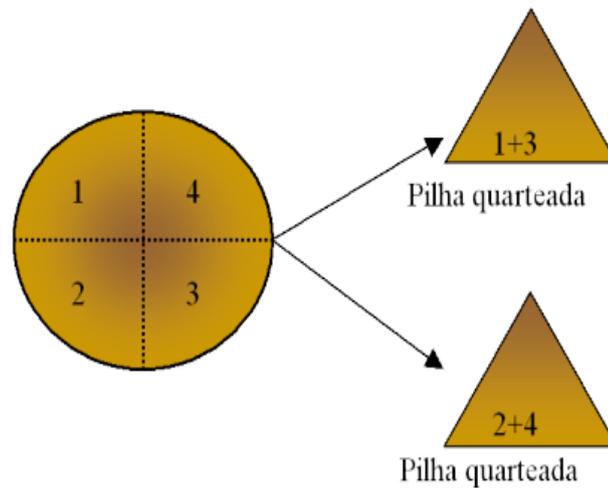
Figura 3 - Pilha formada com o Material B itabirito



Fonte: Autor.

Foram tomadas as amostras diametralmente opostas, sendo que para cada amostra A e B foram obtidas duas alíquotas para cada. As quatro amostras foram devidamente reservadas e identificadas. A Figura 4 segue descreve o processo de quarteamento das pilhas.

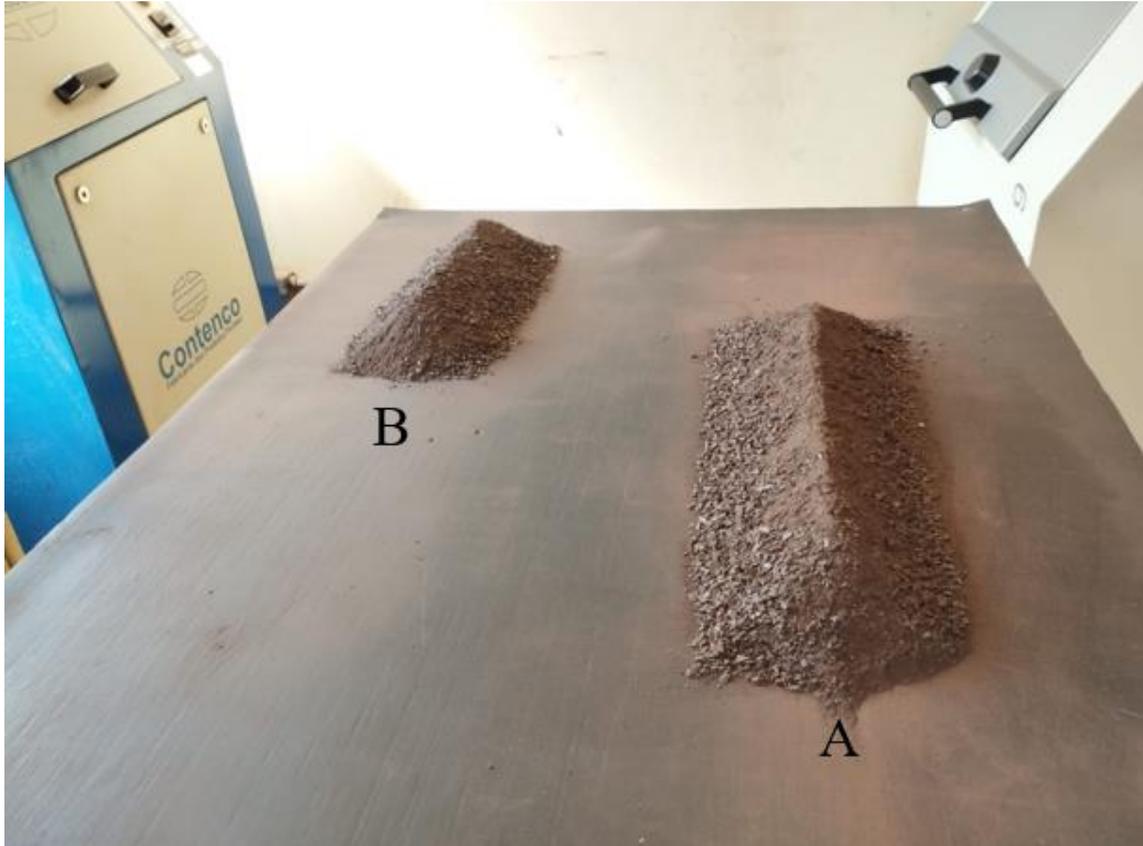
Figura 4 - Representação do quarteamento em pilha cônica



Fonte: Figueira (2006).

Para o início dos testes de *BWI*, as amostras de A e B foram homogeneizadas separadamente em pilhas longitudinais retirando-se as extremidades e repassando o material sobre a pilha, evitando assim possíveis desvios da granulometria do material, sendo este processo realizado três vezes. A Figura 6 representa as duas pilhas formadas para realização dos testes.

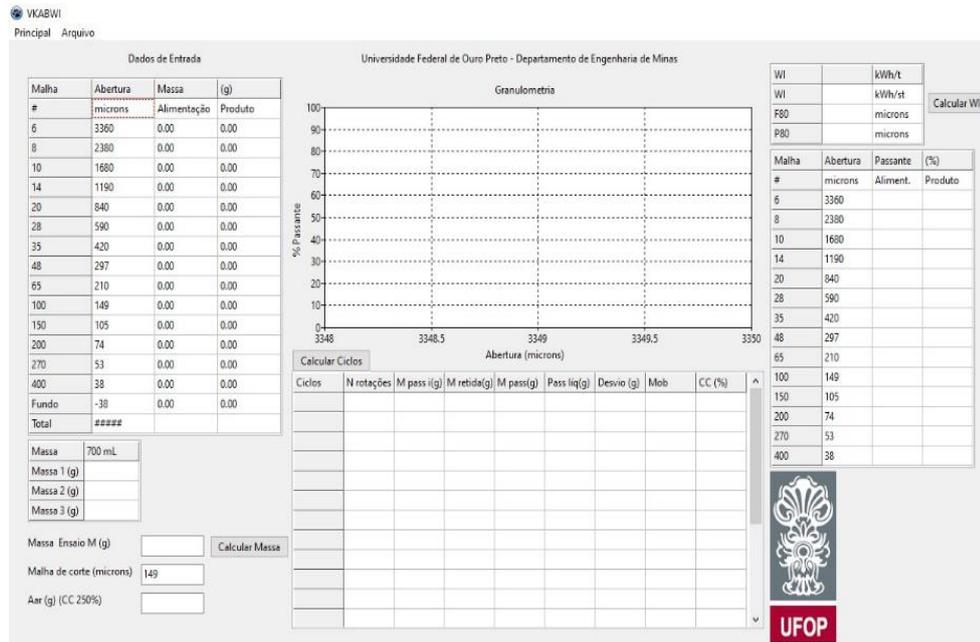
Figura 5 – Pilhas cônicas longitudinais formadas para a realização dos testes de *BWI*



Fonte: Autor.

Realizada a preparação do material para os testes, foi utilizado o programa computacional VKABWI (Alves *et. al.*, 2023) onde os dados de massa e análises granulométricas foram inseridos e como retornos foram obtidos os valores de *BWI*, P_{80} e F_{80} , assim como gráficos. O *software*, desenvolvido e disponibilizado pelo Professor Doutor Vladimir Kronemberger Alves, está apresentado na Figura 7. Na versão atual deste programa foi inserida a equação utilizada para o cálculo de *BWI* de bancada, considerando a elevada presença de finos, conforme proposta por Bond (1953) e descrita no trabalho de Puperi (2024).

Figura 6 - Software VKABWI



Fonte: Autor

Foi realizada a análise granulométrica por peneiramento a seco por 20 minutos, seguindo a série de Tyler (peneiras de 3,35mm a 38um), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Série de peneiras utilizadas segundo a série de Tyler.

Malha #	Abertura em mm	Abertura em μm
6	3,36	3360
8	2,28	2380
10	1,68	1680
14	1,19	1190
20	0,84	840
28	0,59	590
35	0,420	420
48	0,297	297
65	0,210	210
100	0,149	149
150	0,105	105
200	0,074	74
270	0,053	53
400	0,038	38

-400

-0,038

-38

Fonte: Autor.

Os valores obtidos, foram inseridos no software utilizado, onde obtemos o F_{80} . A próxima etapa foi a determinação da massa a ser utilizada no ensaio, sendo calculada pela média de três medidas compactadas em uma proveta de 1000mL, onde completando até a marca de 700mL, com o material. As proporções em massa de cada amostra, descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Proporção de cada amostra para a realização dos testes.

Amostra	%	%	%	%	%
A	0	25	50	75	100
B	100	75	50	25	0
Teste	1	2	3	4	5

Fonte: Autor

O moinho de teste utilizado (Figura 9) é o padrão para ensaio de Bond, cilíndrico de dimensões 30,5 x 30,5 cm, com paredes lisas em aço ASTM-A36 e velocidade constante de 70 rotações por minuto. Foi utilizada uma carga de 285 bolas de ferro, pesando aproximadamente 20,125 kg, conforme Tabela 5.

Figura 7 - Moinho de Bond utilizado para realização dos testes



Fonte: Autor.

Tabela 5 - Número de bolas utilizado.

Número de Bolas	Diâmetro (mm)
43	36,5
67	30,2
10	25,4
71	19,1
94	15,9

Fonte: Alves (2007).

Ao final de cada etapa de moagem, o material foi retirado do moinho de bolas e peneirada na peneira teste de 150 μm , utilizando de peneiras de alívio. O material passante foi arquivado ou encaminhado para cálculo de densidade. O material retido foi pesado e o valor obtido foi inserido no programa computacional utilizado. O material retirado da pilha de alimentação foi adicionado ao material retido na peneira com abertura de 150 μm para recompor a massa do ensaio. Esse procedimento foi repetido até que o resultado de moabilidade atingisse

o equilíbrio, ou seja, até obtermos três resultados consecutivos com variação inferior a 3% ou que apresentassem inversão de tendência de crescimento ou decrescimento em três ciclos consecutivos. Os resultados foram obtidos automaticamente pelo programa computacional VKAWBI utilizado. Quando isso ocorre, a massa passante na peneira com abertura de 150 μm é considerada como produto.

Todos os dados foram inseridos no *software* VKAWBI, que calcula todos os parâmetros do teste, isto é, a massa de ensaio, o número de ciclo, F80 [μm], P80 [μm], BWI [kWh/t e kWh/st], entre outros.

5. RESULTADOS

Após a etapa de preparação, composta pela homogeneização e quarteamento das amostras realizado em pilha cônica, foram obtidos os seguintes valores para as quatro amostras das minas A e B. Os dados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa obtida pelo quarteamento das massas de A e B

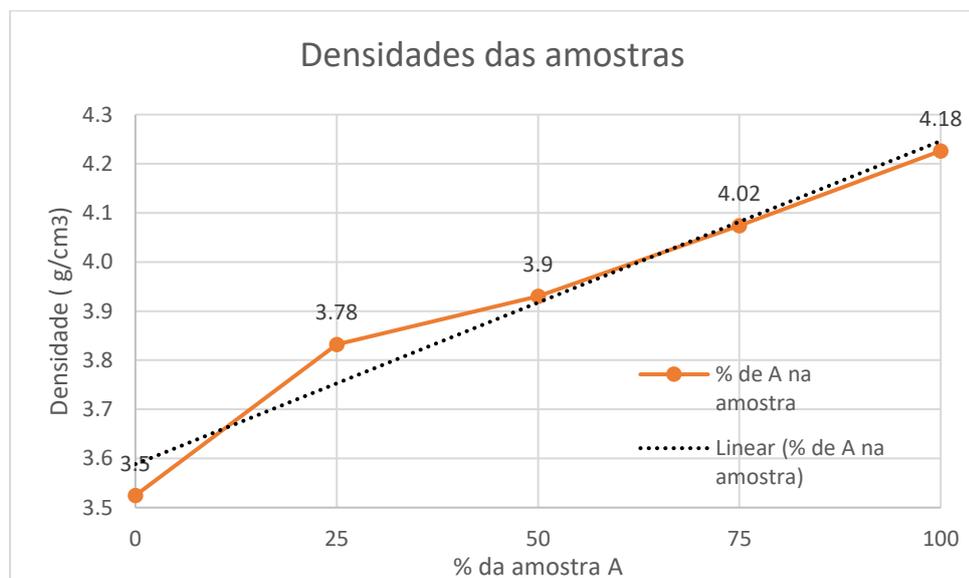
Mina	Amostras	Massa em Kg
A	Amostra 1	19,40
	Amostra 2	16,86
B	Amostra 3	16,20
	Amostra 4	15,72

Fonte: Autor.

As amostras 1 e 3 foram utilizadas nos ensaios de *BWI*, enquanto as amostras 2 e 4 foram reservadas para uso futuro, caso necessário.

Para o início dos testes de *BWI*, foram determinadas as densidades das amostras através do método de picnometria, sendo os testes realizados em triplicata. O resultado obtido para a densidade das misturas se encontra na Figura 10.

Figura 10 - Densidades das amostras obtidas para cada teste por picnometria



Fonte: Autor.

A próxima etapa foi a realização da análise granulométrica para inserção no software. Para a determinação da análise granulométrica, seguindo a série de peneiras proposta pelo software VKABWI. Após os ensaios granulométricos das 5 amostras, obtivemos os seguintes resultados conforme a Tabela 7.

Fonte: Autor.

Tabela 7 - % passante análise granulométrica das misturas realizadas

Peneira(mm)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
3,350	99,19%	99,64%	99,29%	98,73%	98,88%
2,360	82,52%	86,74%	84,25%	83,53%	80,47%
1,700	65,41%	68,37%	65,51%	64,80%	59,37%
1,180	55,32%	57,67%	54,45%	53,16%	47,22%
0,850	39,45%	44,97%	42,92%	41,27%	33,41%
0,601	36,10%	40,32%	35,68%	33,08%	26,38%
0,425	29,70%	36,91%	34,15%	30,89%	22,74%
0,300	27,38%	32,68%	29,16%	26,34%	20,18%
0,212	22,57%	30,17%	27,77%	23,64%	18,66%
0,150	13,93%	27,75%	24,88%	21,84%	16,59%
0,106	10,47%	24,67%	22,17%	19,35%	15,18%
0,075	9,28%	19,08%	19,39%	16,79%	13,22%
0,053	6,05%	12,77%	12,98%	8,13%	11,72%
0,038	4,06%	6,69%	4,28%	3,58%	5,23%
-0,038	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor.

Na determinação da massa de 700 mL para início dos testes foram obtidos os seguintes valores para as amostras, conforme apresentados na Tabela 9.

Tabela 7 – Massa em gramas, obtidas em 700 mL para início dos testes de moagem.

Teste	1	2	3	4	5
Massa 700ml	1517,1	1599,84	1692,12	1795,7	1912,79

Fonte: Autor.

Com os dados necessários, imputados no programa VKABWI, foram realizados os testes, sendo os valores de BWI , F_{80} e P_{80} para as amostras, sendo apresentados na Tabela 10. Os *prints* realizados das telas de cada teste realizado no programa dispostos nos apêndices.

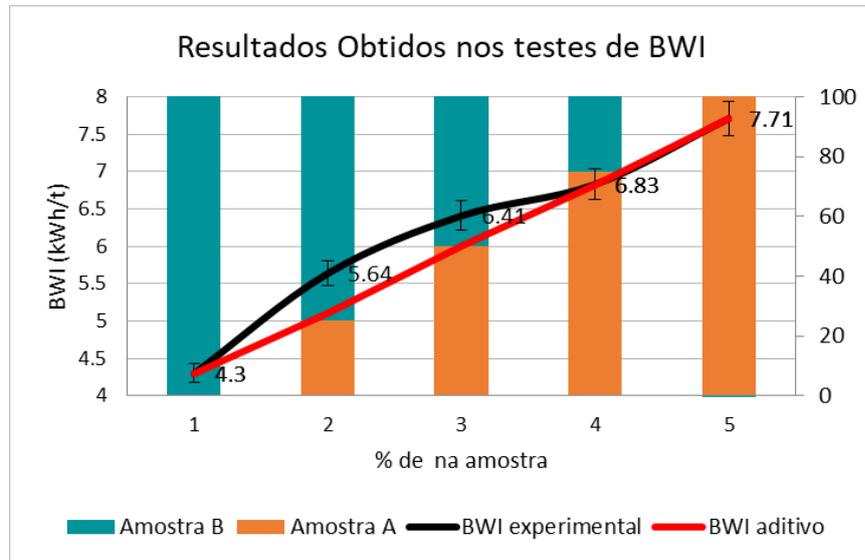
Tabela 8 - Valores de BWI , P_{80} e F_{80} obtidos experimentalmente.

Teste	1	2	3	4	5
BWI (kWh/t)	4,3	5,64	6,41	6,83	7,71
P_{80} (μm)	2272	2114	2215	2243	2364
F_{80} (μm)	99	92	102	101	113

Fonte: Autor.

Tomando como base que o BWI da mistura se comporte como uma variável aditiva, supondo que ele pode ser calculado através de uma média ponderada entre os valores de A e B tendo como peso a proporção em massa de cada minério da composição da amostra. Com isto foi realizado o cálculo do BWI por meio da média ponderada sendo os resultados denominado BWI aditivo, na Figura 11 são apresentados os valores de BWI experimental x BWI aditivo, em relação as porcentagens em massa das litologias constituintes de cada amostra.

Figura 11 - Correlação entre BWI Experimental x BWI Teórico.

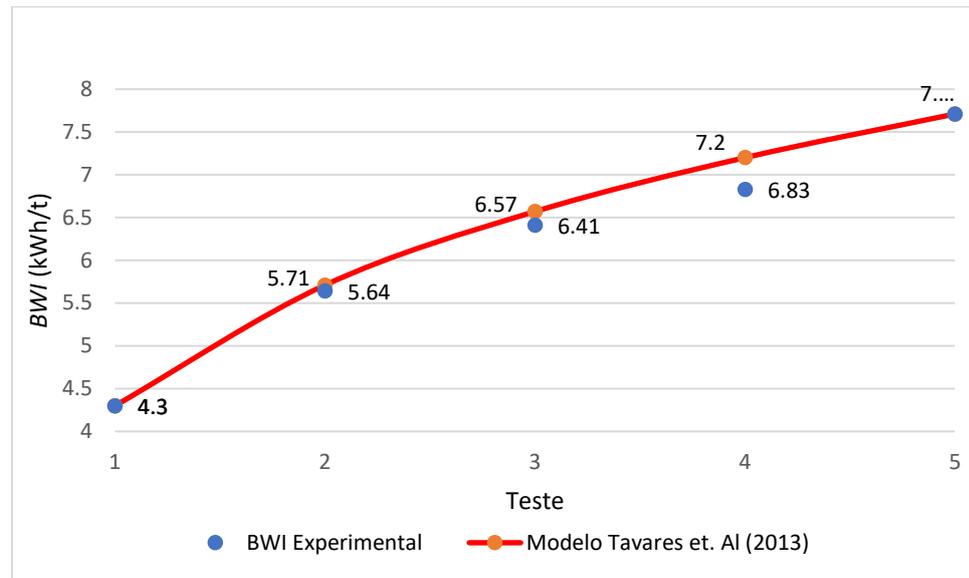


Com base nos resultados obtidos podemos observar que o *BWI* não pode ser definida como uma variável aditiva, pois os valores experimentais dos testes 2, 3 que possuem proporções intermediárias das litologias A e B, diferem significativamente do valor *BWI* aditivo, sendo ele calculado pela média ponderada dos valores de A e B.

. O comportamento das partículas no moinho é influenciado pelo material de maior competência devido ao fato de se acumularem na carga circulante do moinho, resultando que o valor do *BWI* seja maior do que o determinado por uma simples média ponderada.

A Figura 12 apresenta os resultados obtido por meio da metodologia descrita por Tavares e Kallenback (2013) para a determinação de *BWI* de uma mistura de duas litologias diferentes.

Figura 12- Correlação entre BWI Experimental x Modelo proposto por Tavares.



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados demonstram que o modelo determinado por Tavares e Kallemback (2013) possui boa precisão para estimativa do valor de *BWI* em uma mistura binária composta por duas litologias distintas, podendo auxiliar assim na tomada de decisões e ser utilizado em estudos geometalúrgicos.

6. CONCLUSÃO

. Os resultados obtidos comprovaram que o *BWI* é uma variável não-aditiva. Assim, não é possível estimar o seu valor para uma mistura de minérios composto por duas litologias distintas por meio de uma simples média ponderada. Ao longo do processo de moagem, a litologia de maior resistência à cominuição tende a se acumular dentro do moinho à medida que o número de ciclos aumenta, resultando assim que o valor do *BWI* não segue um comportamento aditivo como discutido neste trabalho.

No entanto, para amostras binárias em que a % da litologia mais competente, seja superior a 75% da amostra total, o valor de *BWI* tende a apresentar um comportamento aditivo, determinado assim por meio de uma média ponderada. Contudo, esse é um cenário específico no qual em o carácter aditivo é confirmado.

Portanto, para uma estimativa do valor de *BWI* de mistura de minérios, recomenda-se a utilizar o método proposto por Tavares e Kallembach (2013), que a estimativa apresenta boa precisão e facilidade de aplicação, sendo sim, confirmando a metodologia deste trabalho. Por fim, o método de estimativa contribui significante para simplificação de cálculos e para maiores aplicabilidades dentro de estudos de geometurgia, sendo um importante tópico dentro do processo de fragmentação e posteriormente concentração de minérios.

REFERÊNCIAS

- ANJOS SILVA, M. Escalonamento de diâmetro de bolas de reposição em moinhos via simulação. 58 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto, 2023.
- ALVES, V. K. Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem. 122 f. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- ALVES, V. K.; CASTRO, G. G.; THUMS, V. L. Guia de determinação do work index de moinho de bolas. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 8, p. 11, Ago. 2023.
- BOND, F. C. The Third Theory of Comminution. *Transactions on AIME Mining Engineering*. v. 193, pp. 484-494, 1952.
- BOND, F.C, 1985. General Aspects of Comminution. Em: General Aspects of Comminution - History. s.l.:SME Mineral Processing Handbook, eds. Weiss N.L, pp. 3A-16 a 3A-27.
- BUENO, M; FOGGIATO, B; LANE, G. Geomettalurgy applied in comminution to minimize design risks. In: Proceedings of 6th International Semi-Autogenous Grinding and High-Pressure Grinding Roll Technology Conference, 2015, Vancouver, Canadá.
- CAMPOS, L. J. F; SILVA, P.H; MAZZINGHY, D.B; TAVARES, L.M; CAMPOS, P.H.A; GALÉRY, R. O índice de trabalho de Bond para moagem de bolas (BWI) é uma variável aditiva? XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. p. 1–8. nov, 2019.
- EIVAZY H, ESMAIELI K, JEAN R. Challenges in modelling geomechanical heterogeneity of rock masses using geostatistical approaches. In: World Mining Congress. Proceedings of 24th World Mining Congress, v.3, p. 27-36, 2016.

FIGUEIRA, H.; DA LUZ, A.; ALMEIDA, S. Britagem e Moagem. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, v. 5a Edição, p. 143–211, ago de 2006.

Minério de ferro refinado 62% Fe CFR Futuros. Investing.com. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-futures>>. Acesso em: jun de 2024.

JUNIOR, D. H; SAMPAIO, J. A. Cominuição. 4.3 Circuitos Industriais de Moagem. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia. v. 6ª Edição, p. 187-221, jul de 2007.

PUPERI, F.B. Comparação Entre diferentes métodos, cálculos e correções de “Work Index” para moinho de bolas (BWI) para minérios com elevada quantidade de finos. (Monografia), Universidade Federal De Ouro Preto, 2024.

TAVARES, L, M; KALLEMBACK, R, D, C. Grindability of binary ore blends in ball mills. Minerals Engineering 41 (2013); 115-200.

VARGAS, H.; DA LUZ, A. B.; DE ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. 5a Edição ed. [s.l.] Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. p. 143–211.

ROWLAND JR. C. A. Testing for the selection of comminution circuits to prepare concentration feed. Mill Operator’s Conference. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1982.

WILLS, B. A., FINCH, J. Wills’ mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. ButterworthHeinemann, 2015.

7. APÊNDICE

Anexo 1 – Valores das densidades das misturas

Anexo 2 – Valores das porcentagens em massa de cada mistura

Anexo 3 – Análises Granulométricas

Anexo 4 – Capturas de telas dos ensaios de *BWI* software VKABWI

Anexo 1 – Valores das densidades das misturas

Teste 1		
P1	PIC VAZIO	41,53
P2	PIC+MAT	77,96
P3	PIC+MAT+AGU	121,3
P4	PIC+AGUA	95,38
P1	PIC VAZIO	41,57
P2	PIC+MAT	75,07
P3	PIC+MAT+AGU	119,27
P4	PIC+AGUA	95,42
P1	PIC VAZIO	41,56
P2	PIC+MAT	82,28
P3	PIC+MAT+AGU	124,46
P4	PIC+AGUA	95,42

Teste 2		
P1	PIC VAZIO	26,5
P2	PIC+MAT	56,59
P3	PIC+MAT+AGU	99,36
P4	PIC+AGUA	77,32
P1	PIC VAZIO	26,52
P2	PIC+MAT	58,51
P3	PIC+MAT+AGU	100,79
P4	PIC+AGUA	77,27
P1	PIC VAZIO	26,51
P2	PIC+MAT	59,57
P3	PIC+MAT+AGU	101,71
P4	PIC+AGUA	77,28

Teste 3		
P1	PIC VAZIO	26,46
P2	PIC+MAT	66,47
P3	PIC+MAT+AGU	106,97
P4	PIC+AGUA	77,44
P1	PIC VAZIO	26,49
P2	PIC+MAT	74,42
P3	PIC+MAT+AGU	112,78
P4	PIC+AGUA	77,3
P1	PIC VAZIO	26,49
P2	PIC+MAT	66,34
P3	PIC+MAT+AGU	106,99
P4	PIC+AGUA	77,34

Teste 4		
P1	PIC VAZIO	26,48
P2	PIC+MAT	58,79
P3	PIC+MAT+AGU	101,5
P4	PIC+AGUA	77,27
P1	PIC VAZIO	26,51
P2	PIC+MAT	59,49
P3	PIC+MAT+AGU	101,92
P4	PIC+AGUA	77,28
P1	PIC VAZIO	26,49
P2	PIC+MAT	58,37
P3	PIC+MAT+AGU	101,42
P4	PIC+AGUA	77,28

Teste 5		
P1	PIC VAZIO	41,51
P2	PIC+MAT	86,71
P3	PIC+MAT+AGU	129,81
P4	PIC+AGUA	95,59
P1	PIC VAZIO	41,54
P2	PIC+MAT	95,14
P3	PIC+MAT+AGU	136,19
P4	PIC+AGUA	95,52
P1	PIC VAZIO	41,53
P2	PIC+MAT	83,04
P3	PIC+MAT+AGU	127,22
P4	PIC+AGUA	95,44

Anexo 2 – Valores das porcentagens em massa de cada mistura

Planilha para cálculo de massa para 700 ml - misturas					
Volume (mL)	Amostra	%	Densidade Aparente	Massa (g)	Volume
700	A1	100	2,73	1912,79	700
	A2	0	2,17	0,00	0
				1912,79	700

Peso 700 mL amostra pura	
100	1912,79
0	1517,1

Ciclos		
Massa Reposição	Amostra	Massa (g)
32,00	A1	32,00
	A2	0,00

Planilha para cálculo de massa para 700 ml - misturas					
Volume (mL)	Amostra	%	Densidade Aparente	Massa (g)	Volume
700	A1	75	2,73	1346,77	493
	A2	25	2,17	448,92	207
				1795,70	700

Peso 700 mL amostra pura	
75	1912,79
25	1517,1

Ciclos		
Massa Reposição	Amostra	Massa (g)
32,00	A1	24,00
	A2	8,00

Planilha para cálculo de massa para 700 ml - misturas					
Volume (mL)	Amostra	%	Densidade Aparente	Massa (g)	Volume
700	A1	50	2,73	846,06	310
	A2	50	2,17	846,06	390
				1692,12	700

Ciclos		
Massa Reposição	Amostra	Massa (g)
32,00	A1	16,00
	A2	16,00

Peso 700 mL amostra pura	
50	1912,79
50	1517,1

Planilha para cálculo de massa para 700 ml - misturas					
Volume (mL)	Amostra	%	Densidade Aparente	Massa (g)	Volume
700	A1	75	2,73	1346,78	493
	A2	25	2,17	448,93	207
				1795,70	700

Ciclos		
Massa Reposição	Amostra	Massa (g)
32,00	A1	24,00
	A2	8,00

Peso 700 mL amostra pura	
75	1912,79
25	1517,1

Planilha para cálculo de massa para 700 ml - misturas					
Volume (mL)	Amostra	%	Densidade Aparente	Massa (g)	Volume
700	A1	0	2,73	0,00	0
	A2	100	2,17	1517,10	700
				1517,10	700

Ciclos		
Massa Reposição	Amostra	Massa (g)
32,00	A1	0,00
	A2	32,00

Peso 700 mL amostra pura	
0	1912,79
100	1517,1

Anexo 3 – Análises Granulométricas

Teste 1					
Malha #	Abertura(μm)	Massa(g)	% retida simples	% retida acumulada	% acumulada
6	3350	2,39	0,81	0,81	99,19
8	2360	49,39	16,68	17,48	82,52
10	1700	50,65	17,10	34,59	65,41
14	1180	29,9	10,10	44,68	55,32
20	850	46,98	15,86	60,55	39,45
28	601	9,93	3,35	63,90	36,10
35	425	18,94	6,40	70,30	29,70
48	300	6,89	2,33	72,62	27,38
65	212	14,22	4,80	77,43	22,57
100	150	25,59	8,64	86,07	13,93
150	106	10,24	3,46	89,53	10,47
200	75	3,53	1,19	90,72	9,28
270	53	9,58	3,23	93,95	6,05
400	38	5,9	1,99	95,94	4,06
-400	-38	12,01	4,06	100,00	0,00
Total		296,14	100,00	-	-

Teste 2					
Malha #	Abertura(μm)	Massa(g)	% retida simples	% retida acumulada	% acumulada
6	3350	0,93	0,36	0,36	99,64
8	2360	33,43	11,29	13,26	86,74
10	1700	47,61	16,08	31,63	68,37
14	1180	27,73	9,36	42,33	57,67
20	850	32,9	11,11	55,03	44,97
28	601	12,05	4,07	59,68	40,32
35	425	8,83	2,98	63,09	36,91
48	300	10,96	3,70	67,32	32,68
65	212	6,5	2,19	69,83	30,17
100	150	6,28	2,12	72,25	27,75
150	106	7,99	2,70	75,33	24,67
200	75	14,47	4,89	80,92	19,08
270	53	16,35	5,52	87,23	12,77
400	38	15,77	5,33	93,31	6,69
-400	-38	17,33	5,85	100,00	0,00
Total		259,13	100,00	-	-

Teste 3					
Malha #	Abertura(μm)	Massa(g)	% retida simples	% retida acumulada	% acumulada
6	3350	1,85	0,71	0,71	99,29
8	2360	38,95	15,03	15,75	84,25
10	1700	48,56	18,74	34,49	65,51
14	1180	28,64	11,05	45,55	54,45
20	850	29,89	11,54	57,08	42,92
28	601	18,75	7,24	64,32	35,68
35	425	3,97	1,53	65,85	34,15
48	300	12,93	4,99	70,84	29,16
65	212	3,59	1,39	72,23	27,77
100	150	7,49	2,89	75,12	24,88
150	106	7,01	2,71	77,83	22,17
200	75	7,22	2,79	80,61	19,39
270	53	16,59	6,40	87,02	12,98
400	38	22,56	8,71	95,72	4,28
-400	-38	11,08	4,28	100,00	0,00
Total		259,08	100,00	-	-

Teste 4					
Malha #	Abertura(μm)	Massa(g)	% retida simples	% retida acumulada	% acumulada
6	3350	3,3	1,27	1,27	98,73
8	2360	39,44	15,20	16,47	83,53
10	1700	48,58	18,72	35,20	64,80
14	1180	30,21	11,64	46,84	53,16
20	850	30,84	11,89	58,73	41,27
28	601	21,25	8,19	66,92	33,08
35	425	5,68	2,19	69,11	30,89
48	300	11,8	4,55	73,66	26,34
65	212	7,02	2,71	76,36	23,64
100	150	4,66	1,80	78,16	21,84
150	106	6,45	2,49	80,65	19,35
200	75	6,66	2,57	83,21	16,79
270	53	22,45	8,65	91,87	8,13
400	38	11,82	4,56	96,42	3,58
-400	-38	9,28	3,58	100,00	0,00
Total		259,44	100,00	-	-

Teste 5					
Malha #	Abertura(μm)	Massa(g)	% retida simples	% retida acumulada	% acumulada
6	3350	2,85	1,12	1,12	98,88
8	2360	46,87	18,41	19,53	80,47
10	1700	53,72	21,10	40,63	59,37
14	1180	30,92	12,15	52,78	47,22
20	850	35,17	13,82	66,59	33,41
28	601	17,88	7,02	73,62	26,38
35	425	9,27	3,64	77,26	22,74
48	300	6,53	2,57	79,82	20,18
65	212	3,85	1,51	81,34	18,66
100	150	5,28	2,07	83,41	16,59
150	106	3,59	1,41	84,82	15,18
200	75	4,98	1,96	86,78	13,22
270	53	3,82	1,50	88,28	11,72
400	38	16,53	6,49	94,77	5,23
-400	-38	13,31	5,23	100,00	0,00
Total		254,57	100,00	-	-

Anexo 4 – Capturas de telas dos ensaios de BWI software VKABWI

VKABWI

Principal Arquivo

Universidade Federal de Ouro Preto - Departamento de Engenharia de Minas

Dados de Entrada

Malha	Abertura	Massa	(g)
#	microns	Alimentação	Produto
6	3360	2.85	0.00
8	2380	46.87	0.00
10	1680	53.72	0.00
14	1190	30.92	0.00
20	840	35.17	0.00
28	590	17.88	0.00
35	420	9.27	0.00
48	297	6.53	0.00
65	210	3.85	0.00
100	149	5.28	0.00
150	105	3.59	64.80
200	74	4.98	35.52
270	53	3.82	58.56
400	38	16.53	74.23
Fundo	-38	13.31	33.68
Total	#####	254.57	266.79

Massa	700 mL
Massa 1 (g)	1903.64
Massa 2 (g)	1808.74
Massa 3 (g)	2026.00

Massa Ensaio M (g) Calcular Massa

Malha de corte (microns)

Aar (g) (CC 250%)

Granulometria

WI	7.71	kWh/t
WI	7.01	kWh/st
F80	2364	microns
P80	113	microns

Calcular WI

Malha	Abertura	Passante	(%)
#	microns	Aliment.	Produto
6	3360	98.88	100.00
8	2380	80.47	100.00
10	1680	59.37	100.00
14	1190	47.22	100.00
20	840	33.41	100.00
28	590	26.38	100.00
35	420	22.74	100.00
48	297	20.18	100.00
65	210	18.66	100.00
100	149	16.59	100.00
150	105	15.18	75.71
200	74	13.22	62.40
270	53	11.72	40.45
400	38	5.23	12.62

Calcular Ciclos

Ciclos	N rotações	M pass i(g)	M retida(g)	M pass(g)	Pass liq(g)	Desvio (g)	Mob	CC (%)
1	100	317.31	1319.71	593.08	275.77	-46.57	2.758	223
2	162	98.39	1251.53	661.26	562.88	-114.75	3.464	189
3	126	109.70	1338.45	574.34	464.65	-27.83	3.685	233
4	122	95.28	1397.12	515.67	420.40	30.84	3.433	271
5	134	85.54	1393.18	519.61	434.07	26.90	3.232	268
6	142	86.20	1303.20	609.59	523.40	-63.08	3.675	214
7	121	101.12	1414.99	497.80	396.68	48.71	3.273	284

UFOP

Dados de Entrada

Malha	Abertura	Massa	(g)
#	microns	Alimentação	Produto
6	3360	2.39	0.00
8	2380	49.39	0.00
10	1680	50.65	0.00
14	1190	29.90	0.00
20	840	46.98	0.00
28	590	9.93	0.00
35	420	18.94	0.00
48	297	6.89	0.00
65	210	14.22	0.00
100	149	25.59	0.00
150	105	10.24	35.99
200	74	3.53	24.17
270	53	9.58	23.09
400	38	5.90	38.18
Fundo	-38	12.01	80.23
Total	#####	296.14	201.66

Massa	700 mL
Massa 1 (g)	1519.46
Massa 2 (g)	1509.21
Massa 3 (g)	1522.62

Massa Ensaio M (g)

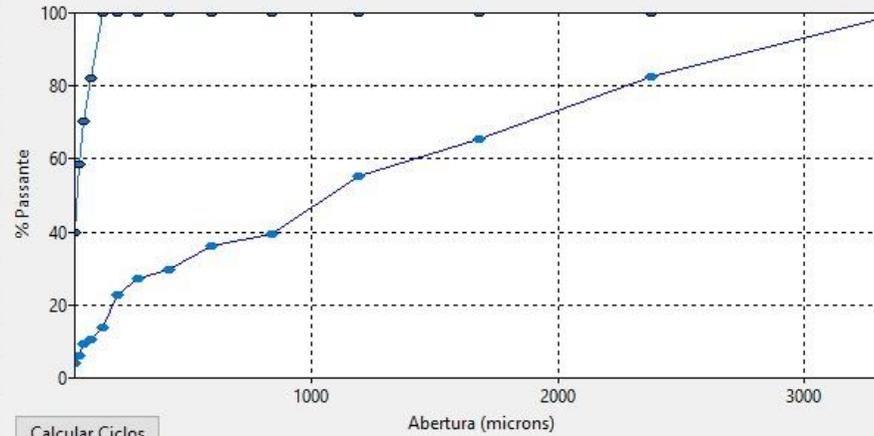
Malha de corte (microns)

Aar (g) (CC 250%)

Calcular Massa

Universidade Federal de Ouro Preto - Departamento de Engenharia de Minas

Granulometria



Calcular Ciclos

Ciclos	N rotações	M pass i(g)	M retida(g)	M pass(g)	Pass líq(g)	Desvio (g)	Mob	CC (%)
1	100	211.37	682.34	834.76	623.39	-401.30	6.234	82
2	51	116.30	967.31	549.79	433.48	-116.33	8.520	176
3	42	76.60	1112.32	404.78	328.18	28.68	7.836	275
4	48	56.40	1134.41	382.69	326.29	50.77	6.781	296
5	56	53.32	1115.84	401.26	347.94	32.20	6.206	278
6	61	55.91	1094.92	422.18	366.27	11.28	6.021	259
7	62	58.82	1067.43	449.67	390.85	-16.21	6.281	237
8	59	62.65	1071.35	445.75	383.10	-12.29	6.490	240
9	57	62.10	1103.23	413.87	351.76	19.59	6.147	267

WI	4.30	kWh/t
WI	3.91	kWh/st
F80	2272	microns
P80	99	microns

Calcular WI

Malha	Abertura	Passante	(%)
#	microns	Aliment.	Produto
6	3360	99.19	100.00
8	2380	82.52	100.00
10	1680	65.41	100.00
14	1190	55.32	100.00
20	840	39.45	100.00
28	590	36.10	100.00
35	420	29.70	100.00
48	297	27.38	100.00
65	210	22.57	100.00
100	149	13.93	100.00
150	105	10.47	82.15
200	74	9.28	70.17
270	53	6.05	58.72
400	38	4.06	39.78



UFOP