



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS



Monografia

**COMPARAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DO ENSAIO DE
WI BOND PARA MOINHOS DE BOLAS UTILIZANDO AMOSTRA COM
ELEVADA QUANTIDADE DE FINOS**

GIOVANNA MARIA BARBOSA SILVA

Ouro Preto
2022

Giovanna Maria Barbosa Silva

**COMPARAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DO ENSAIO DE
WI BOND PARA MOINHOS DE BOLAS UTILIZANDO AMOSTRA COM
ELEVADA QUANTIDADE DE FINOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Tratamento de Minérios
Orientador: Dr. Vladmir Kronemberger Alves

Ouro Preto
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586c Silva, Giovanna Maria Barbosa.

Comparação de diferentes metodologias do ensaio de WI Bond para moinhos de bolas utilizando amostra com elevada quantidade de finos. [manuscrito] / Giovanna Maria Barbosa Silva. - 2022.
38 f.: il.: 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 - Moagem. 2. Cominuição (Beneficiamento de minério) - Índice de trabalho. 3. Minério de ferro. 4. Moinhos e trabalhos em moinhos - Moinho de Bolas. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73:621.926.3

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giovanna Maria Barbosa Silva

Comparação de diferentes metodologias do ensaio de WI Bond para moinhos de bolas utilizando amostra com elevada quantidade de finos

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

Aprovada em 31 de outubro de 2022

Membros da banca

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

[Mestre] - Evandro Costa e Silva - (BAMIN)

[Mestre] - Marco Aurélio Soares Martins - (CEMI)

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 06/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2022, às 14:41, 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 **0438935** e o código CRC **7E98EA1F**.

À Ana Maria Barbosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus.

Aos meus pais (in memoriam) pelos ensinamentos e valores que me conduziram até aqui.

À Sônia Martins por todo amor, força e incentivos que, certamente, tiveram um grande impacto na minha formação acadêmica.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e por todo apoio.

Ao meu orientador Vladimir Kronemberger Alves pelas correções e ensinamentos que me permitiram um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

E a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu pudesse estar na reta final da graduação.

RESUMO

Com a crescente demanda por determinações do Índice de Trabalho de Bond (BWI), torna-se necessária a busca por metodologias mais eficazes e otimizadas que possam ser adotadas industrialmente. Adotando procedimentos semelhantes à norma padrão do BWI, a NB-3253, foram avaliados outros três métodos de laboratório para a previsão do BWI de uma amostra de minério de ferro com elevada quantidade de finos (mais de 20% passante na malha de teste): o método segundo a metodologia adotada pela METSO; outro seguindo a norma padrão da ABNT de forma adaptada para a amostra, onde se inicia o primeiro ciclo com zero revoluções e, o terceiro, utilizando uma amostra totalmente escalpada na malha de corte do ensaio. Os testes foram realizados em duplicata e os valores obtidos foram submetidos a um estudo estatístico para análise de amostras de pequenas populações, T-Student, onde se conclui que os métodos são iguais entre si. No entanto, quando comparados individualmente ao valor referenciado, WI operacional, o estudo indica que os métodos Metso (primeiro ciclo com 5 revoluções) e o método iniciando o primeiro ciclo com zero revoluções e o segundo ciclo com 50 revoluções, não apresentaram diferenças significativas do WI operacional para a amostra em questão; o método com a amostra totalmente escalpada apresentou diferença significativa do valor do WI operacional e, portanto, não é eficaz para a obtenção do consumo de energia na moagem do minério de ferro para a amostra estudada.

Palavras-chave: Índice de Trabalho; Moagem; Minério de Ferro.

ABSTRACT

With the increasing demand for Bond Work Index (BWI) determinations, it becomes necessary to search for more effective and optimized methodologies that can be adopted industrially. Adopting procedures similar to the BWI standard, NB-3253, three other laboratory methods were evaluated for predicting the BWI of an iron ore sample with a high amount of fines (more than 20% passing through the test mesh): the method according to the methodology adopted by METSO; another one following the standard ABNT in a way adapted for the sample, where the first cycle starts with zero revolutions; and the third one, using a sample totally scalped in the test cutting mesh. The tests were performed in duplicate and the values obtained were submitted to a statistical study for small population sample analysis, T-Student, where it is concluded that the methods are equal to each other. However, when compared individually to the referenced value, WI operational, the study indicates that the Metso methods (first cycle with 5 revolutions) and the method starting the first cycle with zero revolutions and the second cycle with 50 revolutions, did not present significant differences from the WI operational for the sample in question; the method with the sample fully scalped presented significant difference from the value of WI operational and, therefore, is not effective for obtaining the energy consumption in the grinding of iron ore for the sample studied.

Keywords: Work Index; Grinding; Iron Ore.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVO	11
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
3.1.	Sobre a medição do WI	12
3.2.	BWI em função da malha teste – MB-3253.....	12
4.	METODOLOGIA.....	14
4.1.	Moinho de Bolas – Determinação do Índice de Trabalho.....	14
4.1.1.	Teste de Hipóteses – T-Student	16
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5.1.	Teste de Hipóteses – T-Student com WI Operacional	18
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
8.	ANEXOS	26

1. INTRODUÇÃO

O *Work Index* (WI) é um número que representa todas as informações necessárias para o escalonamento do moinho de bolas e, é essa, a etapa mais intensiva energeticamente de uma planta de processamento mineral, o que caracteriza uma grande demanda de medições e aperfeiçoamento dos métodos. Ele expressa a resistência que o material tem à moagem e é dado em kWh/t.

O *Work Index* representa a energia necessária para se moer uma tonelada de uma amostra até uma distribuição granulométrica em que 80% seja passante em uma malha de 150 μ m.

Bond estabeleceu um método padrão utilizando-se um moinho carregado de bolas, estabelecido na norma ABNT MB-3253. A partir dela é possível se adequar de acordo com a especificidade de cada material analisado, utilizando-se uma ferramenta comum o moinho de bolas. Geralmente, o que difere um método do outro são os números iniciais de rotações adotadas para os ciclos, o que pode influenciar diretamente na quantidade total de revoluções, no número ciclos totais e no resultado final.

Nesse contexto, nota-se que podem haver disparidades relevantes entre a eficácia dos métodos e surge necessidade de pesquisa, visando melhorias e alternativas mais eficientes e precisas no processo de previsão de desempenho da moagem industrial.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo comparar diferentes metodologias existentes para a obtenção do *Work Index* de moinho de bolas de Bond utilizando um estudo estatístico de teste de hipóteses T-Student como ferramenta de comparação, utilizando uma amostra de minério de ferro com uma elevada quantidade de material fino.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Sobre a medição do WI

O *Work Index* de Bond (BWI) varia com a malha de teste, mas, ainda sim, pode ser obtido com bastante exatidão em diferentes malhas, se esses valores não se divergirem muito além da malha padrão (150µm). (SCHNEIDER et al., 2013)

O BWI pode ser medido em qualquer fração inicial passante na malha de teste, desde que, 100% dela seja menor que 3,35mm, pois, se em cada ciclo se moer o mínimo de amostra, com um número de rotações fracionais, a carga circulante de 250% pode ser atingida.

3.2. BWI em função da malha teste

A necessidade de otimizar o processo de moagem pelo moinho de bolas de Bond gera questões sobre o procedimento de ensaio, embora já padronizado pela norma MB-3253. Ainda há incertezas quanto ao o número de revoluções do primeiro ciclo ou quanto à escolha da malha teste e suas interferências no resultado final.

Em uma das suas inúmeras publicações, Bond e Rowland, afirmam que o BWI deve ser medido na malha teste de acordo com a granulometria desejada no produto do moinho, diferentemente do que anteriormente afirmado, de que o BWI deveria ser medido em malha teste padrão de 150µm. (DUQUE et al., 2013)

De acordo com a norma da ABNT, o número de rotações do primeiro ciclo deve variar entre 100 e 200 a depender da tenacidade da amostra. Entretanto, esse valor pode ser escolhido com base em cálculos utilizando outras variáveis conhecidas no início do ensaio, como o A80, a massa passante inicial, a massa de alimentação e malha de teste, a partir da equação 1:

$$EGPR^{0,82} = \frac{1.1 \times 44.5}{MT^{0,22} \times EBWI \times 10 \times \left(\frac{1}{\sqrt{EP80}} - \frac{1}{\sqrt{A80}} \right)} \quad \text{eq. (1)}$$

Onde,

EGPR é o valor estimado de GPR (Gramas Por Rotação) ao fim no ensaio;

GRP é obtido a partir da carga circulante igual a 250% na massa de alimentação do moinho (MA) e na fração passante inicial (FPI);

EBWI é o BWI estimado para o tipo de minério testado;

EP80 é o P80 estimado para o minério testado;

A80 é a malha que deixar passara 80 % do material na alimentação do ensaio.

E o número inicial de rotações (NIR) pode ser obtido a partir da equação 2:

$$NIR = \frac{\frac{MA}{3.5} \times (1 - FPI)}{EGPR} \quad \text{eq. (2)}$$

Onde:

NIR é o número de rotações iniciais;

MA é a massa de alimentação do moinho;

FPI é a fração passante inicial na malha de teste;

EGPR é o valor estimado de GPR (Gramas Por Rotação) ao fim no ensaio.

O uso da equação 2, quando o valor obtido é próximo do BWI medido ao fim do ensaio, sugere, praticamente, sete ciclos durante todo o procedimento. A partir da equação 2, também é possível afirmar que o BWI pode ser medido para qualquer fração inicial passante na malha teste. (DUQUE et al., 2014)

Bergstrom (1965) recomenda, quando a amostra a ser testada possui mais de 28% passante na malha de teste, o material de ser escalpado nesta malha e deve ser adicionado massa de minério passante para se ajustar a granulometria da amostra.

4. METODOLOGIA

4.1. Moinho de Bolas – Determinação do Índice de Trabalho

Foi coletada uma amostra da alimentação do circuito de moagem de uma usina localizada na região de Mariana, que foi utilizada para ensaios de moagem utilizando o moinho de bolas de WI de Bond. Foram realizadas análises de conteúdo de sólidos, de densidade e de granulometria de todos os fluxos coletados na usina, que são esses os parâmetros que possibilitam uma comparação dos resultados e auxiliam na aplicação da metodologia de Bond conforme a terceira teoria de cominuição. A amostra da alimentação nova do circuito de moagem foi usada nos ensaios de WI em bancada e as informações dos demais fluxos e condições operacionais do moinho industrial foram utilizadas para fechamento de balanço de massas e determinação do WI operacional no momento da amostragem.

Inicialmente, a amostra da alimentação nova do circuito foi submetida à britagem e peneirada a seco utilizando-se a malha de 3,35mm a fim de se minimizar a produção de finos durante a preparação da amostra para o ensaio de BWI em bancada. Com a granulometria definida, a amostra foi devidamente homogeneizada em pilha alongada e, utilizando-se uma proveta graduada, o material foi compactado até o volume de 700mL e pesado. O processo foi repetido três vezes e a média obtida entre os valores foi definida como a massa de alimentação do ensaio de BWI.

A amostra foi submetida à análise granulométrica e foi possível definir o A80, abertura da peneira onde 80% da massa da alimentação é passante. O moinho foi carregado com as bolas de acordo com a Tabela 4.1 e com a quantidade de minério que foi calculada para a alimentação e, então, iniciou-se a moagem.

Tabela 4.1: Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora

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

Mob – média dos três últimos valores da moabilidade (g/rotação).

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

Tabela 4.3: Metodologia

Metodologia	Granulometria AL	1º Ciclo	2º Ciclo
1	< 3,35 mm	0 revoluções	50 revoluções
2	< 3,35 mm	5 revoluções	Calculado pela Eq.(4)
3	< 3,35 mm e > malha de corte ensaio WI	Calculado pela Eq.(4)	Calculado pela Eq.(4)

Os ensaios foram feitos seguindo três diferentes metodologias descritas de acordo com a tabela 4.3. O número de revoluções dos ciclos seguintes, a partir do terceiro, foi obtido utilizando-se a equação 4:

$$Nr = \frac{Aar - Ma}{Mob} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

Aar – valor da massa para carga de 250%;

Ma – massa passante inicial do ciclo;

Mob –moabilidade (g/rotação).

4.1.1. Teste de Hipóteses – T-Student

Utilizando a planilha de análise estatística do software Moly-Cop Tools, foi feita uma comparação pelo método T-Student entre as três diferentes metodologias e cada uma delas foi comparada individualmente com o valor de WI operacional medido na usina, utilizando a mesma amostra ensaiada em laboratório e no fechamento de balanço de massas, a fim de se definir a eficácia em prever o consumo energético do circuito de moagem de bolas em escala industrial.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em duplicata após a moagem de minério de ferro no moinho de bolas de Bond adotando-se as diferentes metodologias com a amostra de minério de ferro, sob condições de moagem similares.

Tabela 5.1: Resultados dos Ensaios em Laboratório.

Metodologia	1º ensaio (kWh/t)	2º ensaio (kWh/t)	Média	Desvio Padrão
1	7,71	8,86	8,29	0,81
2	8,71	6,8	7,76	1,35
3	9,08	9,56	9,32	0,34

Nota-se uma grande variação nos valores obtidos nos diferentes ensaios e altos valores de desvio padrão. Nas tabelas, em anexo, é possível perceber detalhadamente os pontos divergentes em cada ensaio, variações desde o A80 e P80, à variações no número total de ciclos e no resultado final. Embora tenha havido essa disparidade nos resultados dos ensaios, estatisticamente, pelo método de análise de pequenas populações, o T-Student, não foi observado diferenças significativas entre os resultados de BWI obtidos pelas três metodologias descritas na tabela 4.3, como pode ser observado na tabela 5.2.

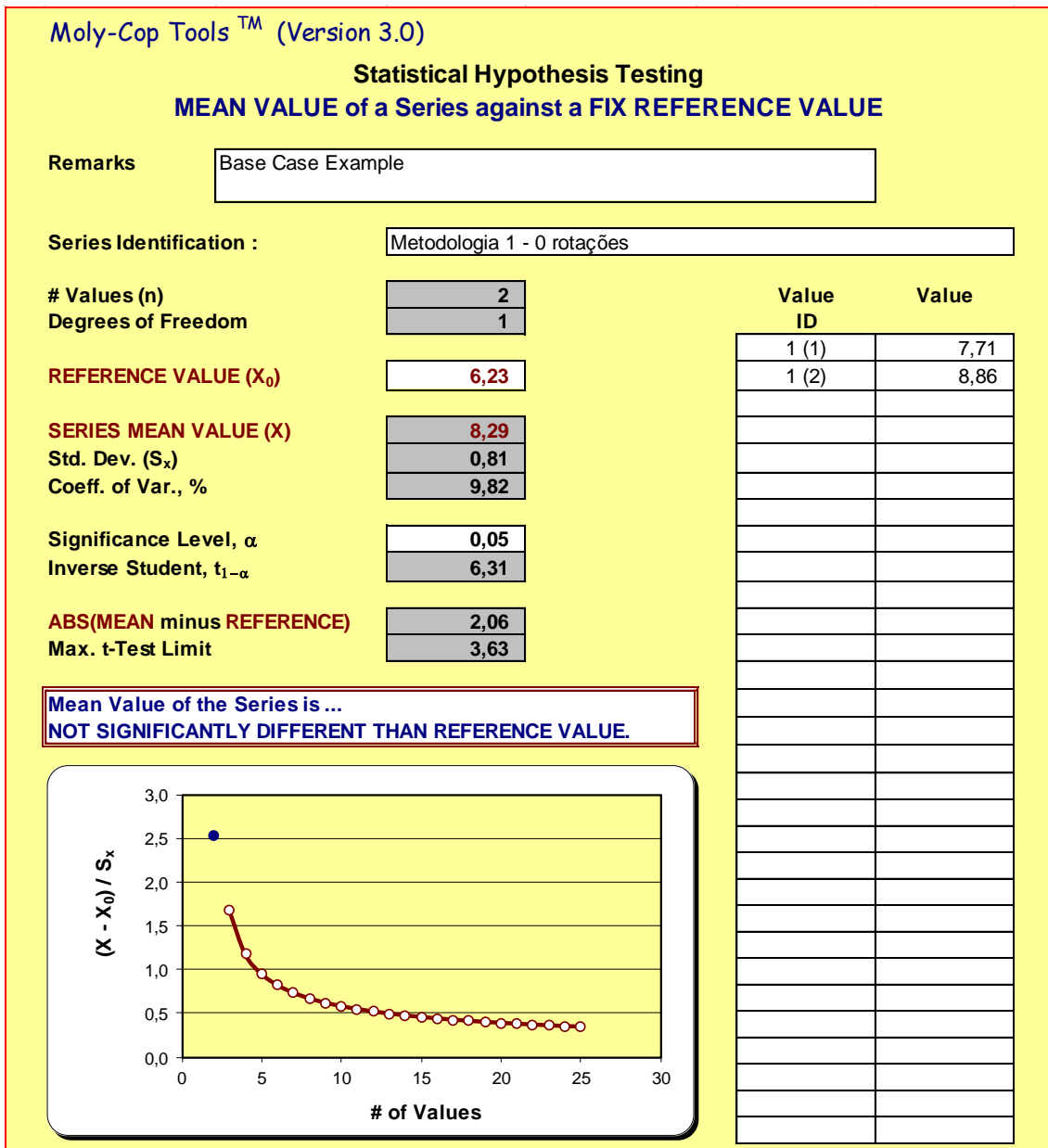
Tabela 5.3: Balanço de Massa do Circuito de Moagem Industrial

BALLBAL								
Grinding Circuit Mass Balance Estimator								
Remarks :	Base Case Example							
CIRCUIT MASS BALANCE								
<i>Configuration : DIRECT</i>								
		Fresh	Mill	Mill	Sump	Cyclone	Cyclone	Cyclone
		Feed	Feed	Discharge	Water	Feed	U'flow	O'flow
Ore, ton/hr		1125,0	4649,2	4649,2	0,0	4649,2	3524,2	1125,0
Water, m3/hr		57,6	816,1	1210,6	1376,4	2587,0	758,5	1828,5
Slurry, ton/hr		1182,6	5465,2	5859,8	1376,4	7236,2	4282,6	2953,5
Slurry, m3/hr		354,4	2042,8	2437,3	1376,4	3813,7	1688,3	2125,4
Slurry Dens., ton/m3		3,337	2,675	2,404	1,000	1,897	2,537	1,390
% Solids (by volume)		83,8	60,1	50,3	0,0	32,2	55,1	14,0
% Solids (by weight)		95,1	85,1	79,3	0,0	64,2	82,3	38,1
Particle Size Distributions (Cummulative % Passing)								
Mesh	Opening							
0	31700	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
0	19100	99,91	99,98	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
0	12700	99,00	99,76	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
0	9525	95,65	98,89	99,94	0,00	99,94	99,92	100,00
0	6350	87,98	96,71	99,61	0,00	99,61	99,49	99,98
0	4750	83,66	95,15	99,09	0,00	99,09	98,81	99,96
0	3360	77,68	93,04	98,43	0,00	98,43	97,94	99,93
0	2380	73,84	91,29	97,59	0,00	97,59	96,86	99,90
0	1680	69,72	89,02	96,31	0,00	96,31	95,18	99,85
0	1190	67,40	87,48	95,32	0,00	95,32	93,89	99,81
0	840	64,17	84,60	93,21	0,00	93,21	91,13	99,72
0	595	62,20	82,19	91,25	0,00	91,25	88,58	99,64
0	420	59,90	78,34	87,93	0,00	87,93	84,23	99,50
0	297	57,64	70,91	80,94	0,00	80,94	75,14	99,10
0	210	53,62	60,06	70,73	0,00	70,73	62,12	97,68
0	149	47,65	44,61	55,36	0,00	55,36	43,64	92,05
0	105	38,82	29,03	38,89	0,00	38,89	25,91	79,56
0	74	29,95	19,06	27,68	0,00	27,68	15,59	65,58
0	53	21,42	12,55	20,05	0,00	20,05	9,71	52,45
0	44	18,11	10,43	17,45	0,00	17,45	7,97	47,13
D80, microns		3855	489	288	0	288	359	106,4
Specific Energy Consumption :			5,24	KWH/ton (Gross)		5,04	KWH/ton (Net)	
Operational Work Index :			6,49	KWH/ton		6,23	KWH/ton	

Fonte: Moly-Cop Tools

A partir da análise estatística dos métodos foi possível observar que os ensaios dos testes 1 e 2 descritos na tabela 4.3 são estatisticamente iguais ao valor de WI Operacional, conforme as tabelas 5.4 e 5.6. No entanto, o ensaio onde a amostra foi totalmente escalpada (teste 3 da tabela 4.3), se mostrou significativamente diferente do valor do WI operacional de referência, conforme tabela 5.5.

Tabela 5.4: T-Student WI Operacional – Metodologia 1



Fonte: Moly-Cop Tools

Tabela 5.5: T-Student WI Operacional – Metodologia 2

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

Statistical Hypothesis Testing
MEAN VALUE of a Series against a FIX REFERENCE VALUE

Remarks

Series Identification :

# Values (n)	2	Value ID	Value
Degrees of Freedom	1		
REFERENCE VALUE (X_0)	6,23	2 (1)	8,71
SERIES MEAN VALUE (X)	7,76	2 (2)	6,80
Std. Dev. (S_x)	1,35		
Coeff. of Var., %	17,42		
Significance Level, α	0,05		
Inverse Student, $t_{1-\alpha}$	6,31		
ABS(MEAN minus REFERENCE)	1,53		
Max. t-Test Limit	6,03		

Mean Value of the Series is ...
NOT SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN REFERENCE VALUE.

Fonte: Moly-Cop Tools

Tabela 5.6: T-Student WI Operacional – Metodologia 3

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

Statistical Hypothesis Testing
MEAN VALUE of a Series against a FIX REFERENCE VALUE

Remarks:

Series Identification:

# Values (n)	2	Value ID	Value
Degrees of Freedom	1		
REFERENCE VALUE (X_0)	6,23	3 (1)	9,08
SERIES MEAN VALUE (\bar{X})	9,32	3 (2)	9,56
Std. Dev. (S_x)	0,34		
Coeff. of Var., %	3,64		
Significance Level, α	0,05		
Inverse Student, $t_{1-\alpha}$	6,31		
ABS(MEAN minus REFERENCE)	3,09		
Max. t-Test Limit	1,52		

Mean Value of the Series is ...
SIGNIFICANTLY DIFFERENT FROM REFERENCE VALUE.

Fonte: Moly-Cop Tools

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se que as três diferentes metodologias utilizadas para previsão do BWI, geraram resultados não divergentes entre si, avaliando-os utilizando a metodologia de T-Student através da planilha de análise estatística Moly-Cop Tools.

Embora os testes tenham apresentado similaridade de resultados entre si, há diferença quando comparados individualmente com um valor de referência, WI operacional. Os resultados dos ensaios de acordo com as metodologias 1 e 2 da tabela 4.3 se mostraram adequados para a obtenção do consumo de energia na moagem industrial para a amostra estudada. No entanto, o ensaio com a amostra totalmente escalpada não se mostrou eficaz para determinação do BWI para a amostra utilizada nos ensaios.

A medição do índice de trabalho de Bond, embora padronizada, pode ser melhorada e otimizada visando a aplicabilidade para minérios com elevada quantidade de finos, já que é um método que fornece inúmeras informações relevantes para essa etapa do processamento de minérios.

Recomenda-se realizar os ensaios em triplicata, devido ao alto desvio padrão observado na tabela 5.1, e aprofundar os estudos de metodologias em escala de bancada para previsão de consumo energético de moinhos de bolas operando como alimentação de minérios com elevada quantidade de finos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-3253: **Moinho de Bolas: Determinação do Índice de Trabalho**. Rio de Janeiro, set. 1990

METSO MINERALS. CAL-005: **Determinação de Work Index: Moinho de Bolas**. Centro de Laboratório de Testes, CLT. Ago. 1986

SCHNEIDER, C. L., BRASIL, T. F. M., MAZZINGHY, D. B., ALVES, V. K., **Sobre a medição do WI**. Em XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia, GO, out. 2013.

SCHNEIDER, C. L., ALVES, V. K., MAZZINGHY, D. B., **O WI como parâmetro para avaliação da variabilidade em projetos de plantas de moagem**. Em: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, Belo Horizonte, set. 2014.

DUQUE, T. F. M. B., SCHNEIDER, C. L., MAZZINGHY, D. B., ALVES, V. K., **BWI em função da malha teste**. HOLOS, Ano 30, Vol. 3 - Edição Especial - XXV ENTMME / VII MSHNT, nov. 2013

ALVES, V. K., MAZZINGHY, D. B., ROSA, N. A. M., MENDONÇA, M. A., MACHADO, L. C. R., OLIVEIRA, D. O. G., SOUZA, G. M., **Aplicação de método simplificado de determinação de WI na previsão de desempenho dos moinhos de bolas da usina do sossego**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 10, n. 4, p. 318-323, out./dez. 2013

SCHNEIDER, C. L., ALVES, V. K., MAZZINGHY, D. B., **Bond WI as a parameter for the evaluation of ore variability in current grinding plant design practice**. In: Proceedings on the 9th International Conference of Mineral Processing. DOLL, A., KRATCH, W., W. KURYVENHOVEN, R. (editors). Santiago, 2012, p.74.

TAVARES, M. M. L., CARVALHO, M. R., ALVES, V. K., LIMA, N., **On design of ball mills for grinding itabirite ores**. 13th ABM Iron Ore Symposium, 2012.

ALVES, V. K., FONSECA, A., REIS, L., PROCÓPIO, L., LIBERATO, E., **Método simplificado para cálculo do work index de moinhos de bolas em escala de laboratório**. XI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, set. 2010.

ALVES, V. K., SCHNEIDER, C. L., **Prediction of the Bond Work Index for Variability Analysis**. Cape Town, South Africa, Apr. 2010.

ALVES, V. K., **Estudo de avaliação dos parâmetros que influenciam de maneira significativa nos resultados de ensaio de WI de Bond**. XXII ENTMME/VII MSHMT, Ouro Preto, nov.2007.

ALVES, V. K., **Otimização de carga moedora Utilizando ferramentas de modelamento Matemático e simulação de moagem.** Belo Horizonte, jan. 2006.

DONDA, J. D., **Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas.** Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2003.

ALVES, V. K.; GALERY; PERES, A. E. C.; SCHNEIDER. **Estudo de otimização de carga de moinho utilizando tecnologia de simulação.** In: In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2004, FLORIANÓPOLIS. Anais do XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Criciúma: UNESC, 2004. v. 2. p. 227-234.

ALVES, V. K.; GONÇALVES. **Methodology For Scale Up Of Grinding And Flotation Circuits Of CVRD's New Projects.** In: Canadian Mineral Processors, 2005, Ottawa. CMP, 2005.

BERGSTROM, B. **Crushability and Grindability.** SME Mineral Processing Handbook, v.2. 1985.

8. ANEXOS

ANEXO 1 – Cálculo de WI Metodologia 1 – 1º Ensaio

ANEXO 2 - Cálculo de WI Metodologia 1 – 2º Ensaio

ANEXO 3 - Cálculo de WI Metodologia 2 – 1º Ensaio

ANEXO 4 – Cálculo de WI Metodologia 2 – 2º Ensaio

ANEXO 5 – Cálculo de WI Metodologia 3 – 1º Ensaio

ANEXO 6- Cálculo de WI Metodologia 3 – 2º Ensaio

ANEXO 1 – Cálculo de WI Metodologia 1 – 1º Ensaio

ANEXO 2 - Cálculo de WI Metodologia 1 – 2º Ensaio

ANEXO 3 - Cálculo de WI Metodologia 2 – 1º Ensaio

ANEXO 4 – Cálculo de WI Metodologia 2 – 2º Ensaio

ANEXO 5 – Cálculo de WI Metodologia 3 – 1º Ensaio

ANEXO 6- Cálculo de WI Metodologia 3 – 2º Ensaio