

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM DE MANEIRA SIGNIFICATIVA NOS RESULTADOS DE ENSAIO DE WI DE BOND.

V.K. ALVES¹

(1) Centro de Desenvolvimento Mineral – Companhia Vale do Rio Doce – ROD.BR-262 - KM 296 STA LUZIA – MG
Vladmir.alves@cverd.com.br

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar, consolidar e documentar os estudos em laboratório para avaliar os parâmetros que tem influencia no resultado do ensaio de “Work Index” de Bond (WI) (Alves, 2005).

O trabalho foi dividido em duas fases na primeira fase foram estudados vários parâmetros que poderiam influenciar no resultado de WI e foi definido qual o melhor procedimento para realizar os ensaios no Centro de Desenvolvimento Mineral da CVRD (CDM) em Santa Luzia – MG - Brasil. Na fase 2 foi feito um estudo interlaboratorial para validar a metodologia de ensaio de WI de Bond (Bond, 1960) do CDM e certificar outros laboratórios para realizar este ensaio para a CVRD.

Na fase 1 foram feitos estudos com diferentes tipos de minérios, diferentes tipos de peneiramento, diferentes preparações de amostra, diferentes cargas de bolas e diferentes tipos de metais de construção do moinho padrão de Bond.

A conclusão do estudo foi que o tipo de aço de fabricação do moinho influência de maneira significativa os resultados.

Foram enviadas amostras para um laboratório de renome internacional. Cujos resultados foram estatisticamente iguais aos dos ensaios de WI realizados na CVRD com o moinho confeccionado com aço ASTM – A36.

Na fase 2 foi feito um estudo interlaboratorial com uma amostra de cobre entre sete laboratórios incluindo o da CVRD e foi comprovado, utilizando a norma ISO 5725-2:1994, que os resultados de WI de todos os laboratórios são estatisticamente iguais exceto um que apresentou um desvio alto nos resultados, fora da faixa de aceitação, mas com uma média próxima da média de consenso dos demais laboratórios.

PALAVRAS-CHAVE: moinho de Bond, Work Index, interlaboratorial.

ABSTRACT

The objective of this paper is to present, consolidate and document laboratory studies designed to evaluate the parameters that play a role in the results of Work Index (WI) (Bond, 1960) measurements.

This study comprehends two major stages: in the first stage several parameters that were believed to influence Bond WI test results were defined, as well as the testing procedures and test conditions to be carried out at CVRD's Mineral Development Center (CDM) in Santa Luzia, MG, Brazil, to evaluate each of the defined parameters. In the second stage an inter-laboratory study was carried out aimed at validating the methodologies implemented at the CDM and to certify other laboratories that could be used to run Bond tests for CVRD.

The first stage included different types of ores, sieving methods, sample preparation methods, ball charges and different materials for the construction of the standard Bond mill. It was concluded that the type of steel used in the construction of the mill influenced the results most significantly.

In the second stage samples were sent for measurement in internationally recognized laboratories, and the results from these tests were found to be statistically identical to the measured Bond Work Indexes measured in CVRD's ASTM-A36 steel Bond mill. Also in this stage, an inter-laboratory study including seven different laboratories around the world was carried out using a copper ore sample, and complying with norm ISO 5725-2:1994. It was found that only one of the laboratories submitted a result outside of the statistically acceptable range.

KEY-WORDS: Bond mill, Work Index, inter-laboratory.

1. INTRODUÇÃO

Visando validar a metodologia de ensaios de WI de Bond utilizada na CVRD, o Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) iniciou uma campanha de estudos com diferentes tipos de minérios, diferentes tipos de peneiramentos, diferentes preparações de amostras, diferentes cargas de bolas e moinhos confeccionados com diferentes tipos de aço (aço inox e aço ASTM -A 36).

Posteriormente foram feitos estudos com as mesmas amostras em outro laboratório de renome internacional para se validar a metodologia da CVRD.

Foi feito um estudo interlaboratorial entre sete laboratórios para se validar a metodologia de ensaio de WI do CDM e para credenciar laboratórios para realizar estes ensaios para CVRD.

1.1 Descrição dos ensaios, procedimentos, amostras e resultados.

Fase I – Avaliação de parâmetros do ensaio de WI.

Nesta etapa foram feitos estudos com diferentes tipos de minérios: minério de cobre sulfetado, minério de cobre oxidado e itabirito.

Com cada uma das amostras estudou-se: dois tipos de peneiramento: peneiramento suspenso (peneira de 8" com peneira de alívio) e peneiramento em peneira de 0,8 m de diâmetro, carga de bolas CVRD (mesma indicada na norma ABNT MB-3253) e carga de bolas 2 utilizada em outro laboratório externo (tabela I) metodologias de preparação de amostras diferentes (metodologia CVRD e metodologia utilizada no mesmo laboratório externo). Todos os ensaios foram feitos com malha de corte de 100# (150 µm). Os resultados estão apresentados nas tabelas II, III, IV e V.

Tabela I - Carga de bolas dos ensaios de WI no laboratório externo.

Diâmetro(mm)	Número de bolas
36,1	25
31,8	40
25,4	60
22,2	69
19,1	95
Total	289

Tabela II – Resultados dos ensaios de WI com dois tipos de peneiramento e moinhos fabricados com diferentes tipos de aço.

Amostra	Moinho Inox			Moinho ASMT 36			Peneiramento
	Teste 1	Teste 2	Media	Teste 1	Teste 2	Media	
Cobre Sulfetado	20.96	21.54	21.25	17.76	18.15	17.96	8" (Alívio)
	22.26	21.01	21.64	17.49	18.61	18.05	0,8 m
Cobre Oxidado	13.22	13.16	13.19	11.78	11.37	11.58	8" (Alívio)
	12.97	12.93	12.95	11.96	11.73	11.85	0,8 m
Itabirito	12.41	12.46	12.44	11.23	11.24	11.24	8" (Alívio)
	13.02	12.97	13.00	11.76	11.28	11.52	0,8 m

Analisando-se a tabela II pode-se notar que os valores de WI realizados com o moinho de inox são sempre maiores que os resultados dos ensaios realizados com o moinho de aço ASTM-A36. Para se avaliar os resultados de uma forma estatística foi utilizado o método de análise de amostras de pequenas populações t de student, cujos resultados são apresentados na tabela III. Para se utilizar um valor de sigma igual para todas as comparações foi calculado um desvio padrão médio levando-se em conta todos os ensaios realizados no CDM-CVRD e laboratório externos para fase I deste estudo, chegando-se no valor de 0,32 para o desvio padrão médio e um sigma de 0,46 para todas as comparações.

Tabela III – Resultados das análises estatísticas pelo método do t de student dos ensaios de WI da CVRD.

tc=2,92				WI Moinho de Inox		WI Moinho de ASTM-A36		
Amostra	t-student	Hipótese	Sigma	Media	Desvio Padrao	Media	Desvio Padrao	Tipo de Peneiramento
Cobre Sulfetado	7.23	Rejeitada	0.46	21.25	0.41	17.96	0.28	8" (Alívio)
	7.86	Rejeitada	0.46	21.64	0.88	18.05	0.79	0.8 m
Cobre Oxidado	3.54	Rejeitada	0.46	13.19	0.04	11.58	0.29	8" (Alívio)
	2.42	Aceita	0.46	12.95	0.03	11.85	0.16	0.8 m
Itabirito	2.63	Aceita	0.46	12.44	0.04	11.24	0.01	8" (Alívio)
	3.23	Rejeitada	0.46	13.00	0.04	11.52	0.34	0.8 m

Analisando-se a tabela III pode notar que quando comparamos os resultados de ensaios de WI com moinho de inox e de aço ASTM-A36 foram aceitas somente 2 hipóteses pelo método de t de student, indicando que os resultados são diferentes estatisticamente para maioria dos resultados.

Foram enviadas 12 amostras dos mesmos minérios para ensaio de WI em laboratório externo de renome internacional com sede no Chile, sendo que 6 amostras foram preparadas segundo o padrão de preparação de amostras deste laboratório (Ensaio 1) (Figura 1-(a)) e 6 amostras foram preparadas seguindo o padrão da CVRD (Ensaio 2) (Figura 1 (b)). Os resultados dos ensaios são apresentados na tabela IV. O laboratório externo utiliza uma carga de bolas diferente da especificada na norma ABNT MB-3253 (tabela I), já a CVRD utiliza a carga de bolas sugerida por esta norma.

Tabela IV – Resultado dos ensaios de WI realizados no laboratório externo.

Dados Ensaio de WI - Laboratório Externo							
Amostra	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Média
Cobre Sulfetado Ensaio 1	17.35	17.00	18.85	18.80	18.31	18.04	18.06
Cobre Sulfetado Ensaio 2	17.52	17.57	18.24	18.34	17.86	17.94	17.91
Itabirito Ensaio 1	12.12	12.95	11.86	12.25	11.19	11.75	12.02
Itabirito Ensaio 2	11.34	11.43	11.43	11.04	10.65	10.60	11.08
Cobre Oxidado Ensaio 1	11.56	11.53	12.07	11.97	11.92	11.96	11.84
Cobre Oxidado Ensaio 2	11.92	11.77	11.52	11.53	11.36	11.45	11.59

Foi feita uma análise estatística comparando os resultados de WI realizados no laboratório externo com preparação CVRD e com preparação do próprio laboratório, para tal também se utilizou o método de t de student. Os resultados são apresentados na tabela V.

Tabela V – Análise estatística para comparação dos resultados de ensaios de WI realizados pelo laboratório externo – preparação CVRD e preparação do próprio laboratório.

tc=2,92				WI Lab. Ext. prep própria		WI Lab. Ext. prep CVRD	
Amostra	t-student	Hipótese	Sigma	Media	Desvio Padrao	Media	Desvio Padrao
Cobre Sulfetado	0.33	Aceita	0.46	18.06	0.76	17.91	0.34
Cobre Oxidado	0.55	Aceita	0.46	11.84	0.23	11.59	0.21
Itabirito	2.06	Aceita	0.46	12.02	0.59	11.08	0.38

Analisando-se os resultados apresentados na tabela V pode-se verificar que o resultado de WI independe do tipo de preparação utilizada no ensaio (estes resultados são válidos para as preparações de amostra discutidas neste trabalho), ou seja, os resultados são estatisticamente iguais independentes do tipo de preparação da amostra.

Em seguida foi feita uma comparação dos resultados dos ensaios realizados no laboratório externo e CVRD os resultados são apresentados nas tabelas VI e VII. Para tal comparação foram utilizados somente os ensaios do laboratório externo com preparação no próprio laboratório. O tipo de peneiramento foi variado somente na CVRD, no laboratório externo foi utilizado peneirador Ro Tap.

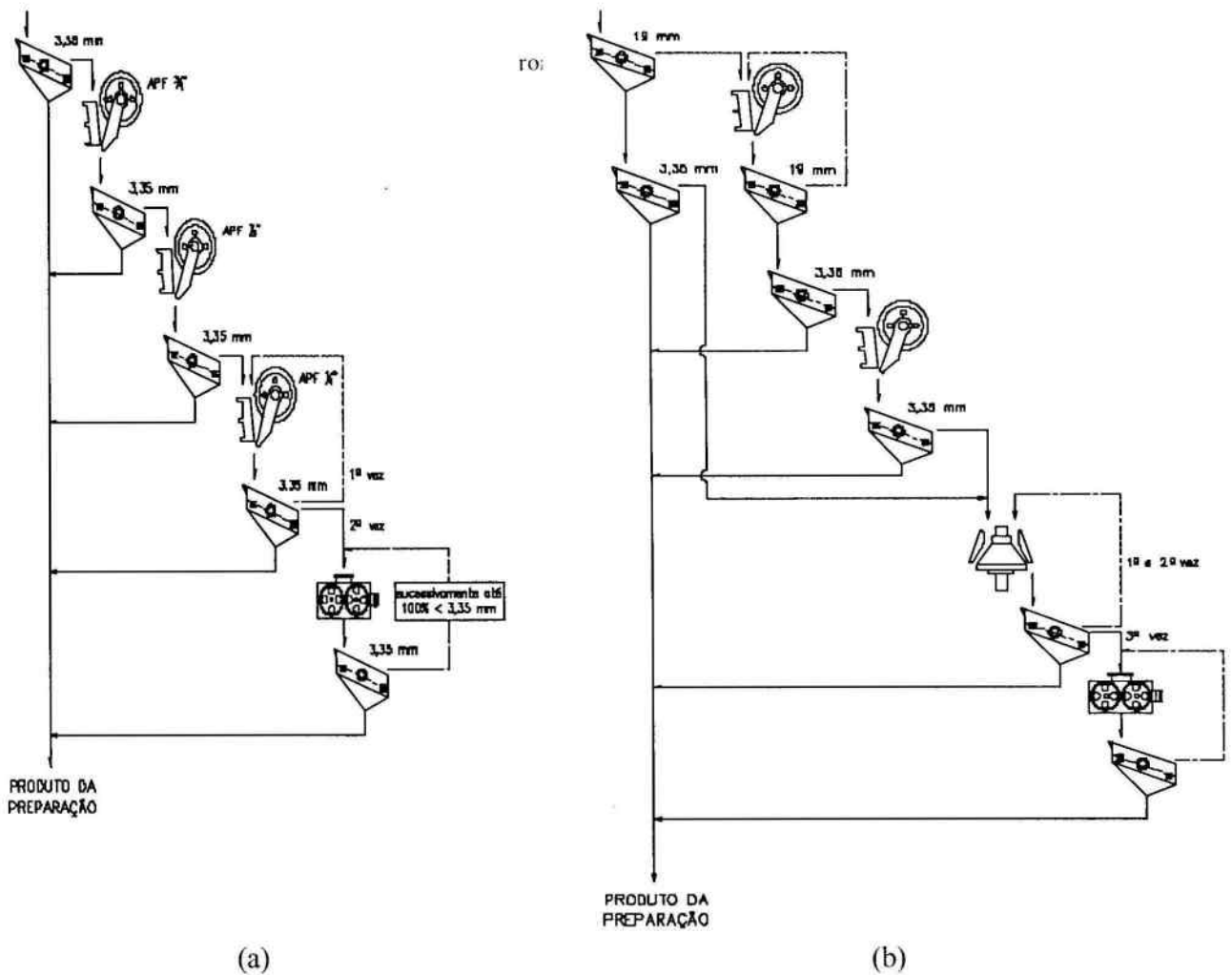


Figura 1 – Metodologia de preparação de amostras para ensaios de WI (a) Laboratório externo e (b) CDM.

Tabela VI – Análise estatística para comparação dos resultados de ensaios de WI realizados pela CVRD (Moinho de aço ASTM-A36) x laboratório externo.

tc=2,92				WI Moinho Lab. Ext.		WI Moinho de ASTM-A36		
Amostra	t-student	Hipótese	Sigma	Media	Desvio Padrao	Media	Desvio Padrao	Tipo de Peneiramento
Cobre Sulfetado	0.22	Aceita	0.46	18,06	0.76	17,96	0.28	8" (Alivio)
	0.02	Aceita	0.46	18,06	0.76	18,05	0.79	0,8 m
Cobre Oxidado	0.57	Aceita	0.46	11,84	0.23	11,58	0.29	8" (Alivio)
	0.02	Aceita	0.46	11,84	0.23	11,85	0.16	0,8 m
Itabirito	1.71	Aceita	0.46	12,02	0.59	11,24	0.01	8" (Alivio)
	1.10	Aceita	0.46	12,02	0.59	11,52	0.34	0,8 m

Tabela VII – Análise estatística para comparação dos resultados de ensaios de WI realizados pela CVRD (Moinho de aço Inox) x laboratório externo.

tc=2,92				WI Moinho Lab. Ext.		WI Moinho de Inox		
Amostra	t-student	Hipótese	Sigma	Media	Desvio Padrao	Media	Desvio Padrao	Tipo de Peneiramento
Cobre Sulfetado	7.00	Rejeitada	0.46	18,06	0.76	21,25	0.41	8" (Alivio)
	7.85	Rejeitada	0.46	18,06	0.76	21,64	0.88	0,8 m
Cobre Oxidado	2.96	Rejeitada	0.46	11,84	0.23	13,19	0.04	8" (Alivio)
	2.43	Aceita	0.46	11,84	0.23	12,95	0.03	0,8 m
Itabirito	0.92	Aceita	0.46	12,02	0.59	12,44	0.04	8" (Alivio)
	2.15	Aceita	0.46	12,02	0.59	13,00	0.04	0,8 m

Analisando-se a tabela VI pode-se notar que para os ensaios realizados com o moinho de aço ASTM-A36 todos os resultados foram aceitos estatisticamente quando comparadas com os ensaios realizados no laboratório externo. Isso significa que os ensaios de WI realizados pela CVRD no moinho de aço ASMT-A36 forneceram os mesmos resultados que os ensaios de WI realizados no laboratório externo e que a carga de bolas utilizada nos ensaios de WI no laboratório externo e na CVRD apresentam resultados de WI estatisticamente iguais. O moinho do laboratório externo também é confeccionado de aço ASTM-A36.

Analisando-se a tabela VII pode-se notar que comparando os ensaios realizados com o moinho de aço inox e os ensaios realizados no laboratório externo a metade das hipóteses foram aceitas e metade rejeitada. Indicando que algumas amostras são mais sensíveis ao tipo de aço de fabricação do moinho Bond do que outras.

XXII ENTMME / VII MSHMT – Ouro Preto-MG, novembro 2007.

Foi feita uma análise para se avaliar o efeito do peneiramento nos resultados de WI, os dados são apresentados na tabela VIII, onde o peneiramento padrão corresponde a ensaios feitos com peneira de 0,8m e o com peneira de alívio corresponde a ensaios com peneira de 8" com três peneiras de alívio.

Tabela VIII – Estudo estatístico para se avaliar a influência do tipo de peneiramento nos resultados dos ensaios de WI.

tc=2,92	Amostra	t-student	Hipotese	Sigma	WI - Peneira 8" (Alívio)		WI - Peneira 0,8 m		Moinho
					Media	Desvio Padrao	Media	Desvio Padrao	
Cobre Sulfetado		0,86	Aceita	0,46	21,25	0,41	21,64	0,88	Inox
		0,20	Aceita	0,46	17,96	0,28	18,05	0,79	ASMT-A36
Cobre Oxidado		0,53	Aceita	0,46	13,19	0,04	12,95	0,03	Inox
		0,59	Aceita	0,46	11,58	0,29	11,85	0,16	ASMT-A36
Itabirito		1,23	Aceita	0,46	12,44	0,04	13,00	0,04	Inox
		0,61	Aceita	0,46	11,24	0,01	11,52	0,34	ASMT-A36

Avaliando-se os dados da tabela VIII pode-se verificar que o tipo de peneiramento não tem influência nos resultados dos ensaios de WI.

Fase 2 - Estudo interlaboratorial

Visando se avaliar de uma maneira mais ampla o ensaio de WI da CVRD foi feito um estudo interlaboratorial, onde foi coletada uma amostra de minério de cobre sulfetado que foi quarteadas em 7 conjuntos de 10 amostras, que foram enviadas para 7 laboratórios: CDM (CVRD-Brasil), laboratório 1 (Canadá), laboratório 2 (África do Sul), laboratório 3 (Chile), laboratório 4 (Centro de pesquisa do Brasil), laboratório 5 (Universidade no Rio de Janeiro - Brasil) e laboratório 6 (Universidade em Belo Horizonte - Brasil). Foram feitos ensaios em duplicata totalizando 20 teste de WI.

Em todos os laboratórios foram feitos ensaios de WI nas amostras com malha de corte de 100# (150 micron), um resumo dos resultados estão apresentados na tabela IX. O moinho utilizado pela CVRD foi de aço ASTM – A36 e peneirador Ro Tap.

Tabela IX – Resumo dos resultados de WI do estudo interlaboratorial.

	CVRD	Laboratorio 1	Laboratório 2	Laboratório 3	Laboratório 4	Laboratório 5	Laboratório 6
Média	18.41	18.32	19.70	19.07	19.72	17.82	17.37
Desvio Padrão	0.30	0.36	0.64	0.29	0.27	0.55	0.38

Para se avaliar estatisticamente os dados foi utilizada a norma ISO 5725-2:1994, norma mundialmente utilizada para avaliação de estudos interlaboratoriais. Foi feita uma análise de consistência dos dados utilizando as estatísticas h e k de Mandel.

A estatística h de Mandel avalia se o valor da média se afasta do valor de consenso, não foi detectado nenhum problema entre os laboratórios, pois o valor de h para cada laboratório esta dentro da tolerância especificada na norma, neste caso para 7 laboratórios com 95% de confiança o valor máximo aceitável de h é 1,71 em modulo. Os valores de h para cada laboratório são apresentados na Tabela X.

Tabela X – Valores de h para os 7 laboratórios estudados

Lab.	h
CDM	-0.15
Lab. 1	-0.25
Lab. 2	1.27
Lab. 3	0.58
Lab. 4	1.30
Lab. 5	-0.81
Lab. 6	-1.30

Analisando-se a tabela X pode-se notar que a CVRD foi o laboratório que mais se aproximou da média de consenso (18,45 kWh/t).

A estatística k de Mandel mede a dispersão dos resultados de cada laboratório, neste caso para os 7 laboratórios com 20 ensaios cada, a tolerância é de 1,30 com 95% de confiança, os resultados são apresentados na tabela XI, para esta

avaliação somente o laboratório 2 obteve um valor de k de 1,52, valor fora do limite de tolerância, isto indica que este laboratório apresenta uma grande dispersão dos resultados, ou seja, maior que os demais laboratórios estudados.

Tabela XI – Valores de k para os 7 laboratórios estudados

Lab.	h
CDM	0.72
Lab. 1	0.86
Lab. 2	1.52
Lab. 3	0.68
Lab. 4	0.65
Lab. 5	1.30
Lab. 6	0.91

Analisando a tabela XI pode-se notar que os laboratórios 3 e 4 e a CVRD são os laboratórios que apresentaram a menor dispersão.

2. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Analisado-se os resultados acima pode-se concluir que:

- o moinho de aço inox tem uma tendência de gerar resultados de WI mais elevados do que o moinho fabricado por aço ASTM-A36;
- o tipo de peneiramento, carga de bolas e preparação da amostra não influencia significativamente nos resultados de WI (para as condições testadas neste estudo);
- o moinho de aço ASTM-A36 da CVRD produz resultados aceitáveis estatisticamente quando comparados com outro laboratório de renome internacional;
- alguns minerais apresentam uma maior sensibilidade ao tipo de metal de fabricação do moinho;
- os laboratórios 3, 4 e CVRD são os laboratório que apresentam a menor dispersão de resultados de ensaio de WI;
- a CVRD é o laboratório que apresenta resultado de WI mais próximo da média de consenso;
- o laboratório 2 apresenta uma alta dispersão dos resultados com um valor de k de Mandel fora da faixa de aceitação.

Recomenda-se:

- apesar do tipo de peneiramento não influenciar nos resultados de WI recomenda-se utilizar peneirador Ro-Tap, somente por ser um tipo peneiramento em que não se tem a influência do operador nesta etapa do ensaio;
- utilizar aço ASTM-A36 para fabricação de moinhos para ensaios de WI de Bond;
- sugerir que seja incluído na norma de WI de Bond o tipo de aço que o moinho deve ser fabricado, pois este parâmetro não é explicitado no artigo original de Bond e nem na norma Brasileira da ABNT (MB-3253);

3. REFERÊNCIAS

Alves V.K. (2005) Estudo para avaliação da metodologia de ensaios de WI da GADEK

Bond, F.C. (1960) British Chemical Engineering, Vol. 6, pp. 378-391, 543-548.

Norma ABNT MB-3253

Norma ISO 5725-2:1994