

O WI DE BOND COMO PARÂMETRO PARA AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE EM PROJETOS DE PLANTAS DE MOAGEM¹

Claudio Luiz. Schneider²
Vladmir Kronemberger Alves³
Douglas Batista Mazzinghy⁴

Resumo

Sistemas modernos de escalonamento de moinhos de bolas requerem uma série de ensaios de moagem para determinar parâmetros de modelo de balanço populacional que possam ser utilizados para prever a capacidade do circuito para qualquer tamanho de moinho de bolas, taxa de alimentação e especificação do produto. Campanhas de variabilidade do tipo que a Vale tem desenvolvido em projetos *green field* incluem centenas de amostras de alma de sondagem. Para acessar a variabilidade do corpo de minério com respeito ao circuito de moagem com bolas a partir de parâmetros de balanço populacional seriam necessárias centenas de simulações que teriam que ser executadas com um conjunto de parâmetros independentes determinados para cada amostra, sendo que cada simulação produziria um consumo de energia de moagem com o circuito operando em condições estritamente especificadas. Este tipo de trabalho seria elaborado demais e não poderia ser executado dentro do tempo disponível para o projeto. Com isso, surge a alternativa de utilizar o WI de Bond medido em cada amostra do projeto. A distribuição de WIs de Bond é, por sua vez, utilizada como um parâmetro de moabilidade, e o escalonamento do moinho utilizando técnicas de balanço populacional poderia ser executado tão somente para uma amostra que apresente um valor de WI representativo da jazida. Este procedimento é demonstrado neste artigo, com a vantagem de utilizar um procedimento simplificado para a determinação dos WI de Bond.

Palavras-chave: Variabilidade; Escalonamento; Simulação; Geometalurgia.

BOND WI AS A PARAMETER FOR THE EVALUATION OF ORE VARIABILITY IN CURRENT GRINDING PLANT DESIGN PRACTICE

Abstract

The modern scale-up systems for ball mills require a series of grinding tests to determine population balance parameters that can be used for predicting circuit capacity for any ball mill size, feed rate and product specification. The time required to run the batch grinding tests is similar to that of a Bond ball mill Work Index determination. However, the calculations involved in determining the population balance parameters are considerably more elaborated, producing a number of selection and breakage function parameters for each sample. Typical variability campaigns carried out by Vale in green field projects include hundreds of samples from drill cores. In order to assess the ore body variability with respect to ball mill grinding from population balance parameters hundreds of simulations would have to be carried out from independently determined sets of parameters, each one producing specific energy consumption under strictly specified conditions. This type of work would be too elaborated and time demanding for such a campaign and an alternative is to simply determine the Bond Work Index of each drill core sample. The distribution of Bond WI is then be used as a grindability parameter, and the population balance scale-up procedure needs to be carried out only for the sample that has the so called representative WI. This procedure is demonstrated in this paper.

Key words: Variability; Scaling-up; Simulation; Geometallurgy.

¹ Contribuição técnica ao 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, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro de Minas, Coordenador de Processamento Mineral, CETEM, Rio de Janeiro, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, Líder de grupo, Vale S.A., Santa Luzia, Brasil.

⁴ Engenheiro de Minas, Especialista, Anglo Ferrous, Belo Horizonte, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de amostra representativa não existe ao se projetar uma planta de processamento para vários anos de operação contínua. Projetos *green field* dependem, inevitavelmente, de informação que é gerada a partir de amostras de alma de sondagem, as quais por sua vez são relativamente caras de produzir. Durante a primeira fase de avaliação do projeto, antes da engenharia, é comum que se produza algo entre cem e duzentas amostras de alma de sondagem. Com base nessas amostras deve-se demonstrar a viabilidade do projeto. Isso requer estimativas precisas do capital e dos custos operacionais para a planta de processamento mineral, que por sua vez deve ser próxima do ideal para que o projeto possa avançar para a fase de engenharia. Na prática, isso significa que uma rota de processamento ideal deve ser idealizada na fase inicial de avaliação do projeto.

O desempenho da planta de processamento é de importância fundamental para a viabilidade de projetos de mineração. A maioria dos custos operacionais e de capital é devida à planta, bem como a produção, a recuperação e a qualidade do produto. Além disso, a cominuição é o principal fator de gastos de energia. Normalmente, a maior quantidade de energia é gasta no circuito de moagem com bolas, pois é onde o minério é moído fino o suficiente para liberação e os processos de concentração subsequentes. Outro fator na viabilidade do projeto é o planejamento da mina. Este é geralmente realizado a partir de um modelo de blocos para o corpo de minério, cada bloco contendo informação pertinente. O caso mais simples é o teor do minério, com a recuperação em função do teor. No entanto, os blocos podem conter uma variedade de informações, tais como a densidade, o tamanho de liberação, a recuperação esperada dos minerais de minério de interesse e os parâmetros de moagem. Este trabalho está focado nestes parâmetros de moagem. A Vale possui um sistema que exige a caracterização das propriedades de moagem de cada bloco do corpo de minério. O motivo é um critério que tem de ser cumprido para cada projeto: a planta deve ser projetada para atender 80% de todos os blocos do plano de lavra da mina. Isto significa que 20% dos blocos mais tenazes são projetados para serem misturados com os 80% dos blocos menos tenazes durante a vida útil da mina, garantindo capacidade total para 100% do corpo de minério. Esta é uma estratégia muito melhor do que basear o projeto da planta em uma única amostra que é considerada representativa ou dimensionar a planta de moagem para a amostra mais tenaz que tenha sido caracterizada.

Para dimensionar um circuito de moagem com bolas, o procedimento preferido é o modelo de escalonamento de Herbst-Fuerstenau.⁽¹⁾ Este procedimento é consideravelmente mais simples do que o modelo de escalonamento de Austin,⁽²⁾ do ponto de vista do trabalho de caracterização que é necessário, embora o procedimento de escalonamento de Austin seja mais potente em permitir simulações sob uma variedade de condições. O procedimento de caracterização de Herbst-Fuerstenau deve ser realizado sob as mesmas condições em que o moinho de bolas industrial será operado sendo limitado a uma única alternativa que, em alguns casos, pode estar excessivamente fora da condição ideal.

Tipicamente, o procedimento de Herbst-Fuerstenau requer seis parâmetros, três para a função seleção e outros três para a função quebra. Cada bloco no plano de mina poderia conter estes parâmetros, juntamente com todas as outras informações relevantes sobre a amostra de alma de sondagem correspondente. No entanto, se estamos contemplando 150 conjuntos de parâmetros de balanço populacional, um

de cada amostra, que conjunto de parâmetros definiria o critério de 80% para o projeto? Não é possível esta determinação somente pela comparação dos conjuntos de parâmetros de cada amostra. O trabalho que se torna necessário é o escalonamento de um circuito de moagem com bolas padrão com uma taxa constante de alimentação e distribuição de tamanho, e uma carga circulante fixa, bem como a especificação do produto para cada conjunto de parâmetros. Normalmente, uma carga circulante de exatamente 250% é utilizada, e a especificação do produto seria um P80 específico para o circuito, por exemplo, 106 micrômetros. O circuito seria fechado por um classificador com parâmetros de hidrociclonação típicos para uma função de classificação, e um valor de D50 seria determinado pelo P80 desejado em cada simulação. As cento e cinquenta simulações, com estes critérios satisfeitos, gerariam cento e cinquenta energias específicas de moagem que poderiam ser utilizadas para determinar, com grande certeza, a amostra com tenacidade maior que 80% das amostras da jazida e, conseqüentemente, a energia específica que atenderia a moagem de 80% da jazida. Este conjunto de parâmetros seria, então, o conjunto de escalonamento para o projeto do circuito de moagem. Embora seja muito atraente, a análise por si só seria intensa e demorada. A automação do procedimento poderia até ser possível através de software especializado, mas a determinação dos parâmetros de balanço populacional requer experiência quando o procedimento de caracterização é realizado com apenas uma granulometria da alimentação. Isso pode implicar que, em alguns casos, os parâmetros que minimizam a função objetivo para um conjunto de testes de moagem não terão, necessariamente, significado físico. Estas situações podem ser reconhecidas por um analista experiente, mas não (pelo menos até agora) por um programa de computador, ou mesmo por programas de computador bastante sofisticados. Outro problema é o procedimento de caracterização de Herbst-Fuerstenau. Atualmente, a Vale usa duas amostras de alimentação idênticas: uma para um conjunto de quatro tempos de moagem que, no maior tempo, produzirá um produto com a especificação desejada (digamos os 106 micrômetros utilizados no exemplo anterior) e outra para um teste a úmido realizado com um tempo de moagem de $\frac{3}{4}$ do maior tempo de moagem utilizado nos testes a seco. Apesar de úteis em estudos de moagem, este procedimento exige muito tempo e tem um consumo de amostras demasiado em campanhas de variabilidade.

A alternativa, que é o tema deste artigo, é a utilização do Índice de Trabalho de Bond. Aqui é importante ressaltar que o procedimento de escalonamento de Bond não é usado para substituir a metodologia de Herbst-Fuerstenau ou de Austin. Na verdade, o procedimento de escalonamento de Bond sequer é usado. Em vez disso, apenas o índice de Bond para moagem em moinhos de bola (BWI) é proposto para ser utilizado como referência da tenacidade do minério de forma a determinar a tenacidade da amostra de referência de 80%, como discutido acima.

O método padrão para a determinação do WI de Bond também é demorado e pode exigir ainda mais massa de amostra do que os outros métodos de escalonamento. No entanto, tem sido demonstrado que o WI de Bond pode ser obtido a partir de processos simplificados que requerem menos amostra e, mais importante ainda, menos tempo de laboratório. Um desses processos baseia-se na modelagem de balanço populacional e na simulação do procedimento de Bond, tal como descrito em Alves e Schneider⁽³⁾ e em Schneider e Alves.⁽⁴⁾ O método requer dois testes de moagem no moinho padrão de Bond em circuito aberto. A amostra de 700 cc é britada a 100% < 3,36 mm e a sua distribuição granulométrica completa é medida. Em seguida, a amostra é moída a seco com 100 revoluções e a distribuição

granulométrica do produto é medida. Toda a amostra retorna então para o moinho de Bond para 900 revoluções adicionais. Finalmente, a distribuição granulométrica completa do produto é medida. Os resultados são inseridos num aplicativo (BondAccel™) que estima os parâmetros de balanço populacional dos dois testes de moagem e, em seguida, simula o ensaio completo de Bond, determinando o WI de Bond da amostra. O outro processo simplificado é conhecido como o processo simplificado Anaconda, desenvolvido por Yap, Sepulveda e Jauregui.⁽⁵⁾ Este método é ainda mais atraente. Um moinho de batelada comum com uma carga de bolas arbitrária é selecionado e calibrado contra o índice de trabalho padrão medido. Os resultados do teste são obtidos através da moagem de uma massa arbitrária da amostra por um período de tempo arbitrário. Uma vez que a constante Anaconda A é determinada, o moinho e as condições de moagem são estabelecidos e devem ser sempre respeitados. Este processo é extremamente interessante porque a utilização de amostra é baixa (em comparação com o ensaio de Bond) e o tempo de execução do teste é muito curto já que o procedimento requer apenas os valores de A80 e P80 da alimentação e do produto de cada ensaio. É necessária certa preparação porque as amostras devem ser escalpadas na peneira de teste antes da moagem e o valor da constante A é válida apenas para uma peneira de teste específica. Vários valores da constante A podem ser determinados, um para cada tamanho de peneira de teste que está sendo utilizada. Este método pode não produzir valores de BWI acurados, porém está demonstrado que o método produz distribuições de BWI idênticas às distribuições de BWI medidas no ensaio padrão de Bond.

2 EXPERIMENTAL

Cento e cinquenta e oito amostras de alma de sondagem do projeto GFPA da Vale pesando cerca de um quilograma foram britadas a um tamanho máximo de 3,36 mm. A distribuição granulométrica de cada amostra foi medida e as frações menores do que 210 μ m descartadas. A fração -3,36 mm +210 μ m serviu como alimentação para o moinho de batelada Anaconda calibrado, e foi moída durante dez minutos. A distribuição granulométrica completa do produto foi então medida. Os valores da A80 e P80 foram assim determinados para todas as amostras de alma de sondagem. A densidade de cada amostra foi medida usando um picnômetro com água.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não é conveniente listar todos os resultados aqui, pois o número de amostras é grande (158). A fim de melhor ilustrar o sistema, um subconjunto com dez amostras será utilizado como exemplo. Este será tratado como o subconjunto do projeto GFPA. Os resultados do conjunto completo do WI de Bond medido são apresentados na seção seguinte, juntamente com a discussão.

3.1 Subconjunto ilustrativo do projeto GFPA

Os dados apresentados na Tabela 1 são os dados reais da campanha de variabilidade. Somente os resultados de dez amostras são mostrados em detalhe para ilustrar o procedimento proposto.

Tabela 1. Um subconjunto dos resultados do ensaio Anaconda das amostras de alma de sondagem do projeto GFPA

ID da Amostra	A80, μm	P80, μm	BWI, kWh/t	Índice
AMVM-20KG-051-GFP-GFPA	1348,3	218,7	15,02	1
AMVM-20KG-138-PFG-GFPA	1306,8	216,8	15,07	2
AMVM-20KG-030-PFG-GFPA	1289,3	215,7	15,07	3
AMVM-20KG-019-GFP-GFPA	1451,6	229,5	15,25	4
AMVM-20KG-083-GFP-GFPA	1438,9	228,9	15,26	5
AMVM-20KG-074-GFP-GFPA	1443,5	230,7	15,35	6
AMVM-20KG-017-GFP-GFPA	1186,8	212,9	15,35	7
AMVM-20KG-089-GFP-GFPA	1354,5	225,1	15,36	8
AMVM-20KG-047-GFP-GFPA	1348,3	225,2	15,49	9
AMVM-20KG-045-PFG-GFPA	1306,8	223,4	15,54	10

Os resultados mostrados na Tabela 1 são classificados em relação ao WI de Bond calculado de forma que as identificações das amostras, como apresentado na coluna ID da Amostra, estão fora de ordem. Os valores do WI de Bond são calculados a partir dos valores medidos de A80 e P80 e a constante A Anaconda do moinho de teste, que é igual a 0,6064 na peneira de teste 210 μm , de acordo com a Equação 1.

$$BWI = \frac{A}{\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{A80}}} \quad (1)$$

A Tabela 2 mostra o comprimento de alma de sondagem que produziu a amostra. Esta informação normalmente vem da equipe de exploração responsável pelo modelamento geológico da futura mina em potencial. O comprimento e a densidade da alma são utilizados como uma forma de pesar cada resultado do WI de Bond proporcionalmente ao peso da amostra que gerou a informação. A fração cumulativa em peso, que define a distribuição P_i dos valores do WI de Bond, é dada pela Equação 2.

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^i \rho_j \times L_j}{\sum_{j=1}^N \rho_j \times L_j} \quad (2)$$

Tabela 2. Propriedades da alma de sondagem e cálculo da distribuição cumulativa dos BWIs Anaconda do subconjunto amostra do projeto GFPA

ID da amostra	Densidade ρ_i , g/cc	Comprimento L_i , m	Índice	P_i , %
AMVM-20KG-051-GFP-GFPA	2,95	6,8	1	7,5
AMVM-20KG-138-PFG-GFPA	2,93	7,5	2	15,7
AMVM-20KG-030-PFG-GFPA	3,00	8,1	3	24,8
AMVM-20KG-019-GFP-GFPA	2,80	12,7	4	38,0
AMVM-20KG-083-GFP-GFPA	2,90	7,3	5	45,9
AMVM-20KG-074-GFP-GFPA	2,93	8,45	6	55,2
AMVM-20KG-017-GFP-GFPA	2,99	8,55	7	64,7
AMVM-20KG-089-GFP-GFPA	3,01	7	8	72,6
AMVM-20KG-047-GFP-GFPA	2,88	12,8	9	86,3
AMVM-20KG-045-PFG-GFPA	2,99	12,25	10	100,0

Todos os cálculos envolvidos são simples e podem ser realizados em uma planilha Excel. A determinação do BWI80 é ilustrada na Figura 1. O valor é obtido através de interpolação entre os valores do intervalo que contém $P = 80\%$, neste caso

correspondentes a P8 e P9 e os valores de BWI8 e BWI9. Para o caso do subconjunto é:

$$BWI_{80} = BWI_8 + (BWI_9 - BWI_8) \times \frac{0.8 - P_8}{P_9 - P_8} \quad (3)$$

O que resulta, para o subconjunto, $BWI_{80} = 15,43 \text{ kWh/t}$.

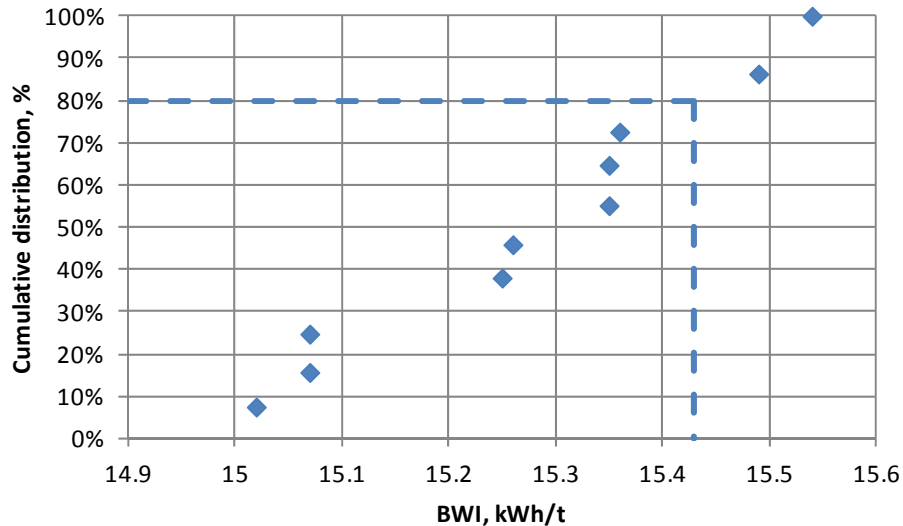


Figura 1. A distribuição do *BWI* Anaconda e o cálculo do *BWI*₈₀ para o subconjunto de amostras do projeto GFPA.

3.2 Análise da variabilidade do projeto GFPA

Os resultados mostrados na Figura 2 incluem todas as 158 amostras de alma de sondagem no projeto GFPA.

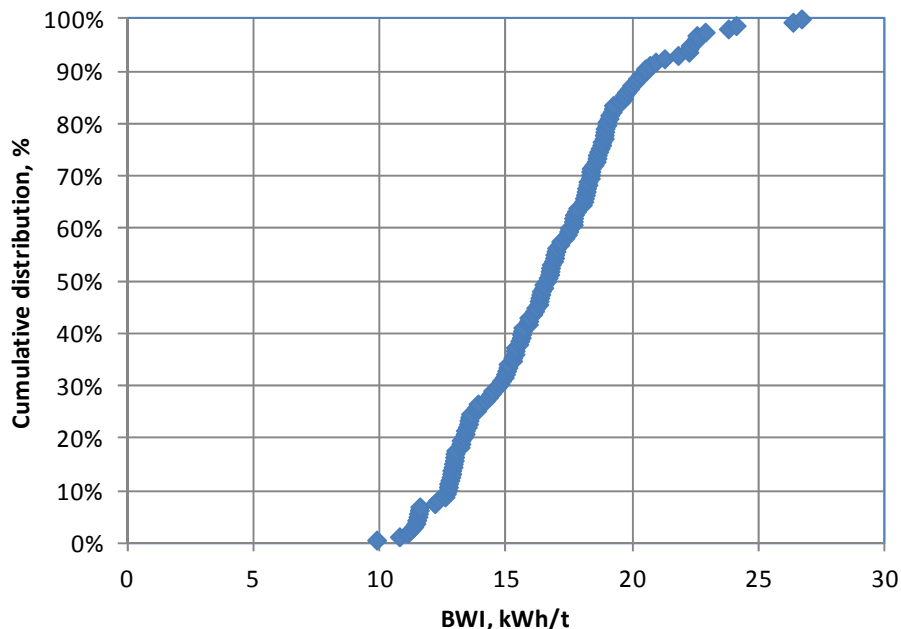


Figura 2. A campanha de variabilidade completa do *BWI* Anaconda do projeto GFPA.

Para todas as amostras do projeto, $BWI_{80} = 18,99 \text{ kWh / t}$. A interpolação na Equação 3 tem um papel muito pequeno uma vez que os intervalos da distribuição têm um período de $1/158$, que equivale a cerca de 0,6%. O valor de *BWI*₈₀ é,

portanto, muito precisamente determinado. Sua precisão depende apenas de uma questão: a distribuição do *BWI* Anaconda é igual à distribuição do *BWI* de Bond? Esta hipótese já foi comprovada, com 95% de confiança, como demonstrado por Alves e Schneider.⁽³⁾

3.3 O Procedimento de Escalonamento Proposto

A ideia subjacente é utilizar o procedimento de escalonamento de Herbst-Fuerstenau ou de Austin para dimensionar o moinho de bolas para atender 80% do corpo da jazida. No entanto, a amostra que produz um *BWI* igual ao *BWI*80 é desconhecida. A razão é que as medições Anaconda não são precisas o suficiente para substituir o procedimento de medição padrão *BWI* de Bond. Tudo o que se sabe é o valor de *BWI*80 a partir da análise acima, a qual é reconhecida como sendo acurada.

Durante a campanha de variabilidade, algumas amostras (normalmente dez) que são selecionadas de forma aleatória são caracterizadas pelo modelo de Herbst-Fuerstenau (ou Austin) e pelo *BWI* de Bond padrão. Geralmente, há tempo de sobra para executar dez desses testes, enquanto a campanha de variabilidade abrangente é executada em todas as amostras. Uma vez que o valor de *BWI*80 é determinado, pode-se escolher uma amostra deste grupo de dez amostras que tenha o *BWI* que esteja mais próximo do *BWI*80 determinado na campanha de ensaios Anaconda. Vamos chamá-la de amostra de referência. Todos os parâmetros de escalonamento da amostra de referência serão incorporados, sem alteração, na simulação do circuito de moagem, com a exceção de que o valor da função seleção específica em energia da amostra de referência deve ser corrigido por:

$$S1^{E80} = S1^{EREF} \times \frac{BW180}{BWIREF} \quad , \text{ t/kWh} \quad (4)$$

Onde $S1^{EREF}$ é o parâmetro de multiplicação da função seleção específica em energia da caracterização de Herbst-Fuerstenau da amostra de referência escolhida e $BWIREF$ é o *BWI* de Bond padrão, também medido na amostra de referência. A relação na Equação 4 permite que o circuito de moagem seja escalonado para até 80% do corpo de minério utilizando o sistema de escalonamento de Herbst-Fuerstenau que está implementado em um simulador de circuitos de moagem. Como o fator de correção na Equação 4 é adimensional, e é também uma fração de energia, o procedimento de Austin também pode ser corrigido, após a determinação, a partir da amostra de referência, da energia do moinho que é necessária para atender 80% da jazida, por meio de:

$$W80 = WREF \times \frac{BW180}{BWIREF} \quad , \text{ kW} \quad (5)$$

Onde $W80$ representa a energia do moinho que vai atender 80% do corpo de minério e $WREF$ é a energia do moinho escalonado com os parâmetros da amostra de referência.

4 CONCLUSÕES

É possível escalonar um moinho que atenda 80% do corpo de minério e, conseqüentemente, o plano de lavra, sem a necessidade de caracterizar cada amostra de alma de sondagem para o procedimento de escalonamento que será usado. Um procedimento simplificado de *BWI* pode ser usado para determinar um *BWI*80 para o projeto, e o valor pode ser aplicado para corrigir um procedimento de

escalonamento mais abrangente que seja conduzido para uma amostra de referência. A única exigência é que o processo simplificado produza uma variabilidade dos valores de BWI que sejam iguais ou muito próximos da variabilidade dos valores de BWI verdadeiros medidos utilizando o ensaio padrão de Bond. O procedimento simplificado Anaconda para a determinação de BWI é um desses procedimentos simplificados. Não há outras preocupações conhecidas neste momento.

As vantagens são enormes. Os gastos de tempo são reduzidos em uma ordem de grandeza! Os custos também são absurdamente reduzidos, já que o procedimento simplificado é mais barato e pode ser facilmente terceirizado (simples). Ainda, a demanda por massa de amostra é pelo menos uma ordem de magnitude menor.

Agradecimentos

Este projeto foi financiado com recursos do CNPq, através do CT-Mineral e pela Cia Vale, através de um projeto de cooperação científica e tecnológica com o CETEM.

REFERÊNCIAS

- 1 Herbst, J.A. & Fuerstenau, D.W. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. *International Journal of Mineral Processing*, 7, p. 1-31, 1980.
- 2 Austin, L.G., Klimpel, R.K., Luckie, P.T. *The Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*. SME-AIMME, New York, 1984.
- 3 Alves, V.K. & Schneider C.L., Prediction of the Bond Work Index for variability analysis, *Comminution '10*, Cape Town – South Africa, April 2010.
- 4 Schneider, C. L. ; Alves, V. K. . Previsão do resultado do ensaio completo de Bond a partir de parâmetros de balanço populacional medidos em simples ensaios de batelada nas condições padrão do ensaio de Bond. In: XXII ENTMMME/VII MSHMT, 2007, Ouro Preto. *Proceedings VII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology; XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, v. 1. p. 577-584, 2007.
- 5 Yap, R.F., Sepulveda, J.L. & Jauregui, R. Determination of the Bond work index using an ordinary laboratory batch mill. In: *Design, Installation of Comminution Circuits*. Mular, A.L. (Editor), SME, 1982.