

COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES TESTES DE MOAGEM SAG PARA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA UNITÁRIA PARA COMINUIÇÃO DE MINÉRIOS SULFETADOS DE COBRE

P.E.C. Pereira¹, H. D. G. Turrer², A.E.C. Peres²

1 – ECM SA – Rua Rio de Janeiro, 1462. CEP 30160-041 – Belo Horizonte - MG

E-mail: pedro@ecmsa.com.br

2 – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de

Engenharia. CEP 30160-030 – Belo Horizonte, MG

Email: aceperes@demet.ufmg.br; hturrer@yahoo.com.br

RESUMO

Por ser a etapa mais cara do beneficiamento de minérios, um correto dimensionamento do circuito de moagem SAG torna-se importantíssimo para que sejam evitados gastos desnecessários de energia. Atualmente, são realizados testes para determinação da energia específica de moagem com o objetivo de se obter uma melhor avaliação dos circuitos de moagem semi-autógena. Para a moagem SAG, destacam-se os testes Drop Weight, do Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC), na Austrália, e o SPI, da MinnovEX Technologies, no Canadá. Em uma mesma amostra de minério é comum a obtenção de diferentes resultados utilizando estes testes. Este trabalho tem como objetivo comparar esses diferentes testes de moagem para determinação da energia específica de moagem do minério sulfetado de cobre das reservas de Sequeirinho e Sossego, do Projeto Sossego, de propriedade da Companhia Vale do Rio Doce, no Estado do Pará, tendo como principais relevâncias os aspectos econômicos e tecnológicos.

PALAVRAS-CHAVE: moagem SAG; energia específica; testes moagem.

1. INTRODUÇÃO

A cominuição tornou-se um campo altamente atrativo para estudos, tanto pela importância de sua função dentro de um circuito, como, principalmente, pelo fato de ser a etapa mais cara do beneficiamento de minérios.

Para determinação da energia específica de moagem de um minério e para o entendimento do comportamento do mesmo quando submetido a uma etapa de moagem, torna-se necessária a realização de testes que sejam capazes de fornecer resultados precisos, economicamente viáveis e que tenham determinada confiabilidade.

A moagem semi-autógena progrediu bastante desde a década de 70, tornando-se com o passar dos anos uma opção tecnológica mais aplicada, devido a uma maior flexibilização da operação dos moinhos SAG e também à necessidade das mineradoras de utilizar moinhos maiores, já que, moinhos de bolas e de barras, por serem menores, requerem um maior número de linhas para tratar a mesma quantidade de minério, além de consumirem uma maior quantidade de revestimentos e corpos moedores.

Há mais de 20 anos já foi ressaltado por Turner (1982) que a moagem semi-autógena havia alcançado reconhecimento mundial como meio de redução de custos de investimento e operacionais e, dessa forma, o uso destes moinhos deveria ser estudado em qualquer novo projeto.

No Brasil, a moagem semi-autógena começa agora a ser estudada, já que, aqui, ainda não é utilizada para moagem de minério de ferro. Com a mudança do cenário mineral brasileiro, causado principalmente pelo desenvolvimento de novos projetos de cobre e outros sulfetos, e a comprovada eficiência da moagem semi-autógena para minérios sulfetados, esta torna-se um campo altamente importante para estudos atuais e futuros.

2. METODOLOGIA

As amostras de minério sulfetado de cobre das reservas de Sequeirinho e Sossego da CVRD, no Estado do Pará, foram submetidas a etapas de amostragem, testes e análise de dados.

Na etapa de amostragem, realizada pela CVRD e constituída de testemunhos de sondagem, foram obtidas amostras de 6'' e de 2'', sendo que seções dessas amostras foram selecionadas para testes de bancada e algumas das amostras de 6'' foram enviadas para testes em planta piloto.

Para os testes de bancada estavam disponíveis 113 amostras de 2'' e 52 amostras de 6''. As amostras de 2'' foram subdivididas em 97 amostras representando o depósito de Sequeirinho e 16 amostras do depósito de Sossego. Similarmente, as amostras de 6'' foram divididas em 33 amostras do depósito de Sequeirinho e 19 amostras do depósito de Sossego. No total foram 130 amostras do depósito de Sequeirinho e 35 amostras do depósito de Sossego, proporcionais às massas contidas nestas reservas.

Os testes *Drop Weight* e *SPI* foram realizados em todas as 165 amostras. O Teste de Bond para determinação do Work Index (WI) foi realizado em todas as amostras de 6'' e em algumas de 2''. O Índice de Abrasão de Bond foi determinado em algumas amostras de 6'' e de 2''.

Neste estudo consideraram-se apenas os resultados de testes das amostras de 6'', visto que, nessas, um maior número de testes foi realizado, incluindo o teste de Bond para moagem de bolas em todas elas, possibilitando assim uma melhor comparação entre os mesmos.

Para as amostras de 6'', executou-se então o *Drop Weight Test*, desenvolvido pelo centro de pesquisas australiano *Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC)*, para determinação dos parâmetros **A** e **b** presentes na relação de redução necessária para definir a distribuição de quebra por impacto:

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE}) \quad (1)$$

onde E é a energia (kWh/t) para quebrar a partícula e t_{10} é o percentual passante em um décimo do tamanho da partícula original. Esses testes foram feitos com a energia aplicada na partícula variando entre 0,25 kWh/t e 2,5 kWh/t.

Realizaram-se também em todas as amostras de 6'' os testes de abrasão do JKMRC necessários para definir o parâmetro ta (definido como um décimo do parâmetro t_{10}). O parâmetro ta define a quebra proveniente da moagem por abrasão.

A seleção dos testes *Drop Weight* e *SPI* deveu-se ao fato de serem os mais adotados no caso de moagem SAG. Outros procedimentos, como o duplo pêndulo, também desenvolvido no JKMRC, não foram cogitados.

De acordo com Grandy (2002), os dados coletados oferecem ao engenheiro a flexibilidade da utilização de três métodos distintos para o cálculo dos requerimentos de cominuição, incluindo britagem primária, moagem SAG e de bolas e rebitagem de *pebbles*.

O primeiro método é através do uso do simulador JKSimMet, utilizando-se os parâmetros A , b e ta , gerados nos testes *Drop Weight*, para simulação do circuito e para determinação da distribuição granulométrica do produto do britador primário, ou seja, alimentação do moinho SAG.

O teste *SPI (SAG Power Index)*, desenvolvido pela MinnovEX Technologies, aplicado à moagem SAG, é o segundo destes métodos e é utilizado, juntamente com o teste de Bond, para o cálculo da energia específica de cominuição. Para tal, utiliza-se o software chamado CEET (*Comminution Economic Evaluation Tool*) que avalia a variabilidade de produção de um depósito para determinada potência instalada no circuito de moagem, através dos resultados *SPI* e *Wi* de Bond. O *SPI* é um índice complementar ao *Wi* de Bond e os dois índices devem ser utilizados em conjunto quando se tratar de circuito SAG/bolas. É aplicado a faixas granulométricas imediatamente mais grossas que aquelas onde o ensaio de Bond é aplicado.

Neste estudo foi feita a comparação entre os resultados dos testes *Drop Weight* e dos testes *SPI*. O objetivo foi encontrar semelhanças e diferenças entre os testes, para que uma melhor determinação da energia unitária de cominuição, no moinho SAG, possa ser feita.

Na Figura 1 tem-se a metodologia utilizada pelo JKTech (linha australiana) para determinação da energia unitária de moagem e posterior dimensionamento dos moinhos.



Figura 1 – Método para determinação da energia específica unitária e posterior dimensionamento de moinhos através da linha australiana.

A Figura 2 mostra a metodologia utilizada pela MinnovEX Technologies (linha canadense) para determinação da energia unitária e para o posterior dimensionamento dos moinhos.

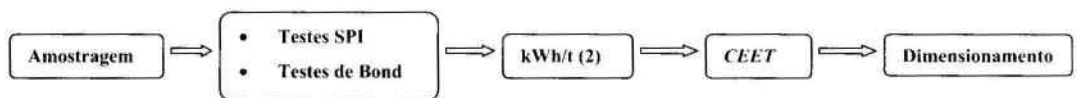


Figura 2 – Método para determinação da energia específica unitária e posterior dimensionamento de moinhos através da linha canadense.

Analisando os resultados obtidos nos dois testes, percebe-se que a energia unitária em kWh/t determinada pelo método do JKTech difere do valor encontrado através do método da MinnovEX.

Entendendo-se as diferenças e semelhanças entre os testes, é possível chegar a um valor de energia específica que garanta um dimensionamento confiável dos moinhos, independentemente do método escolhido. (Figura 3)

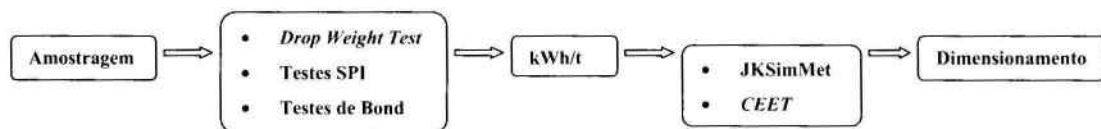


Figura 3 – Proposta deste estudo para avaliação da energia unitária para posterior dimensionamento dos moinhos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela I apresenta alguns dos resultados dos testes Drop Weight, SPI e de Bond para as 52 amostras de 6" que foram utilizadas na realização deste estudo.

Tabela I - Resumo dos ensaios de caracterização das amostras de 6" (fonte: CVRD, 2.000).

Identificação da amostra			SPI		BW _i	DWT				
Área	Furo	intervalo	minutos	kWh/t		parâmetros				kWh/t
				T80=3mm	kWh/t	A	b	A*b	ta	JKSimMet simulation
Sequeirinho	SFM 01	21,20 a 21,50	118	8,92	13,60	63,3	0,449	28,4	0,369	9,33
Sequeirinho	SFM 01	108,70 a 109,00	124	9,17	16,00	56,6	0,552	31,2	0,289	8,85
Sequeirinho	SFM 02	45,70 a 46,00	89	7,64	12,70	57,5	0,743	42,7	0,464	7,96
Sequeirinho	SFM 02	109,43 a 109,73	123	9,13	12,69	54,9	0,582	32,0	0,396	8,91
Sequeirinho	SFM 03	14,30 a 14,60	51	5,62	8,43	60,8	0,887	53,9	0,553	7,27
Sequeirinho	SFM 03	61,50 a 61,80	82	7,30	11,87	57,6	0,852	49,1	0,638	7,62
Sequeirinho	SFM 04	38,00 a 38,30	132	9,49	16,94	53,5	0,654	35,0	0,324	8,48
Sequeirinho	SFM 04	54,65 a 54,95	120	9,01	16,06	58,8	0,577	33,9	0,231	8,46
Sequeirinho	SFM 04	101,30 a 101,60	123	9,13	13,69	52,7	0,573	30,2	0,289	9,00
Sossego	SFM 05	42,40 a 42,70	59	6,09	12,37	53,2	0,934	49,7	0,903	7,77
Sossego	SFM 05	86,70 a 87,00	76	7,00	14,04	55,1	0,874	48,2	1,005	7,93
Sossego	SFM 05	115,80 a 116,10	32	4,35	10,66	57,9	1,153	66,8	0,753	6,80
Sossego	SFM 05	144,50 a 144,80	84	7,40	13,81	50,4	1,127	56,8	0,497	7,13
Sequeirinho	SFM 06	22,85 a 23,15	196	11,80	15,34	52,5	0,571	30,0	0,282	9,01
Sequeirinho	SFM 06	122,70 a 123,00	129	9,34	21,13	66,1	0,410	27,1	0,254	9,32
Sequeirinho	SFM 07	8,40 a 8,70	115	8,80	10,33	47,4	0,768	36,4	0,237	8,29
Sequeirinho	SFM 07	86,20 a 86,50	120	9,01	17,56	48,9	0,628	30,7	0,314	9,00
Sequeirinho	SFM 07	129,35 a 129,65	50	5,58	10,36	54,6	1,039	56,7	0,559	7,14
Sequeirinho	SFM 09	100,20 a 100,50	93	7,83	13,44	57,4	0,664	38,1	0,392	8,26
Sequeirinho	SFM 09	145,60 a 145,90	110	8,57	15,83	63,6	0,530	33,7	0,265	8,52
Sequeirinho	SFM 10	46,00 a 46,30	32	4,32	6,84	58,6	1,185	69,4	0,704	6,68
Sequeirinho	SFM 10	75,55 a 75,85	113	8,71	19,91	57,2	0,573	32,8	0,300	8,70

Na Figura 4 são apresentados graficamente os valores obtidos nos testes SPI e DWT (Drop Weight Test) para as amostras das cavas de Sequeirinho e Sossego.

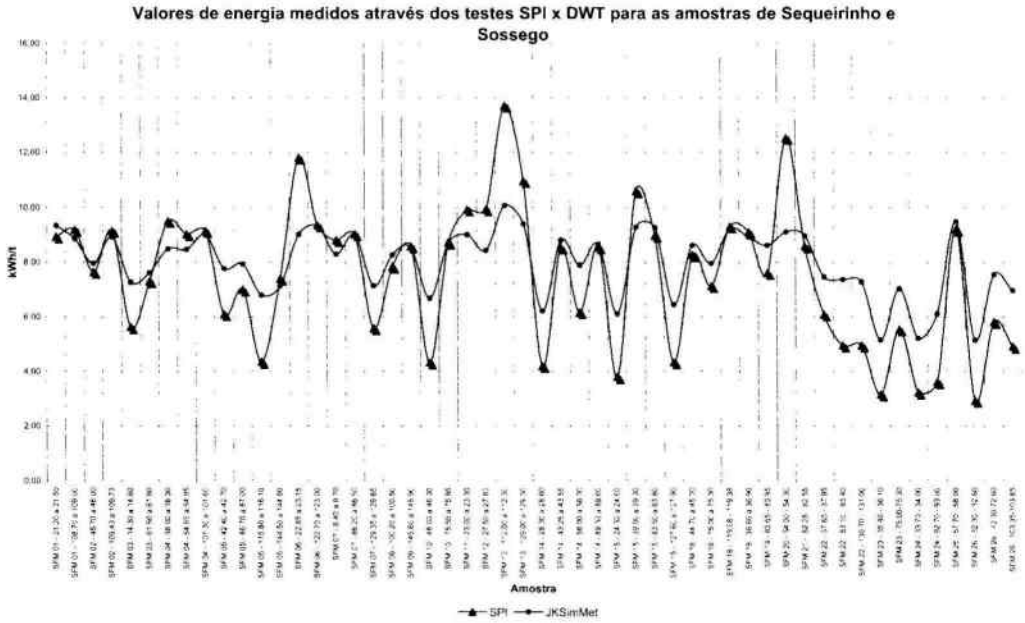


Figura 4 – Valores de energia obtidos através dos testes SPI e DWT para as amostras das cavas de Sequeirinho e Sossego.

Analisando os valores médios encontrados (SPI = Min 4,99 – Max 10,03 kWh/t, DWT = Min 6,80 – Max 9,20 kWh/t) pode-se perceber que o intervalo obtido para os valores dos testes DWT está dentro do intervalo obtido através dos testes SPI (Figura 5), mostrando assim uma menor variabilidade dos dados. Apesar do intervalo dos testes DWT ser menor, seu valor médio é maior (SPI = $7,51 \pm 2,52$ kWh/t, DWT = $8,00 \pm 1,20$ kWh/t), sendo assim mais conservador.

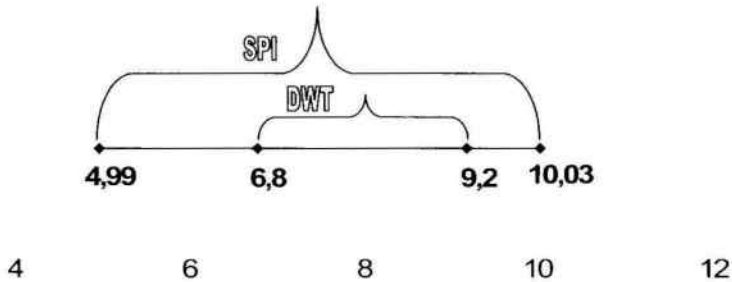


Figura 5 – Representação gráfica dos valores médios de energia obtidos nos testes SPI e DWT.

As curvas, de uma maneira geral, apresentam o mesmo perfil, sendo a curva relativa ao teste DWT mais suave, com menores amplitudes. Qualitativamente ambos os testes convergem, não havendo discrepância entre eles.

Em média, os valores obtidos através dos testes SPI foram aproximadamente 6,1% menores do que os valores obtidos através dos testes DWT. Parte dessa diferença está no fato da potência prevista pelo teste SPI ser a potência disponível na careca do moinho e a potência estimada pelo teste DWT ser a potência líquida no pinhão do motor. A perda de energia entre o que é aplicado no eixo pinhão e o que é realmente disponibilizado na careca é da ordem de 4%.

Procurou-se então avaliar se o comportamento de cada cava estaria de acordo com o total das amostras ou se existia alguma anomalia em algum dos depósitos.

Para a cava de Sossego (Figura 6), os valores médios de energia obtidos nos testes SPI e DWT foram: SPI = $6,13 \pm 2,47$ kWh/t e DWT = $7,33 \pm 1,29$ kWh/t.

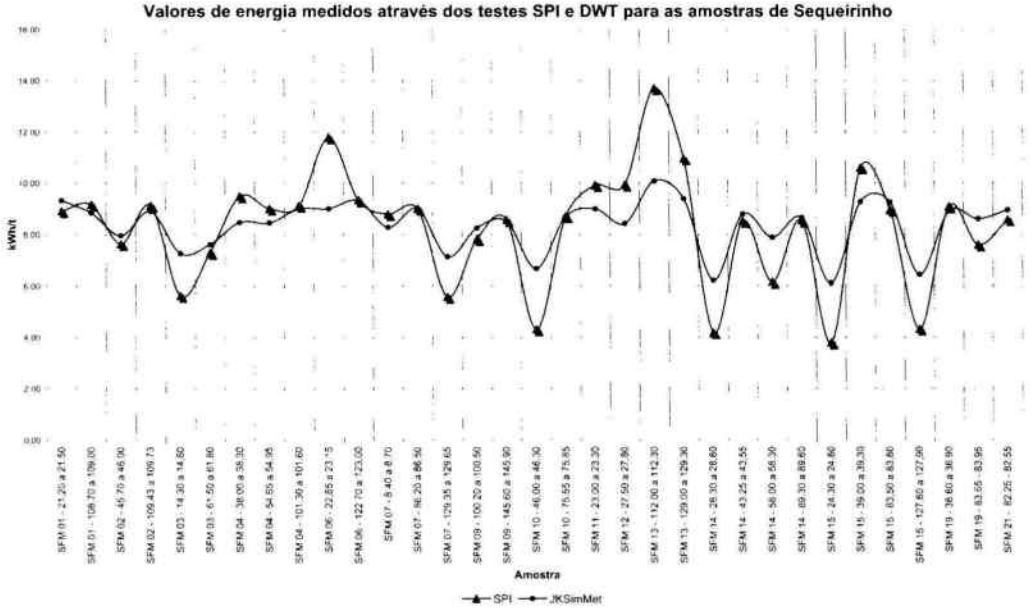


Figura 6 – Valores de energia obtidos através dos testes SPI e DWT para as amostras da cava de Sossego.

Para a cava de Sequeirinho (Figura 7), os valores médios de energia obtidos nos testes SPI e DWT foram: SPI = $8,31 \pm 2,21$ kWh/t e DWT = $8,39 \pm 0,98$ kWh/t.

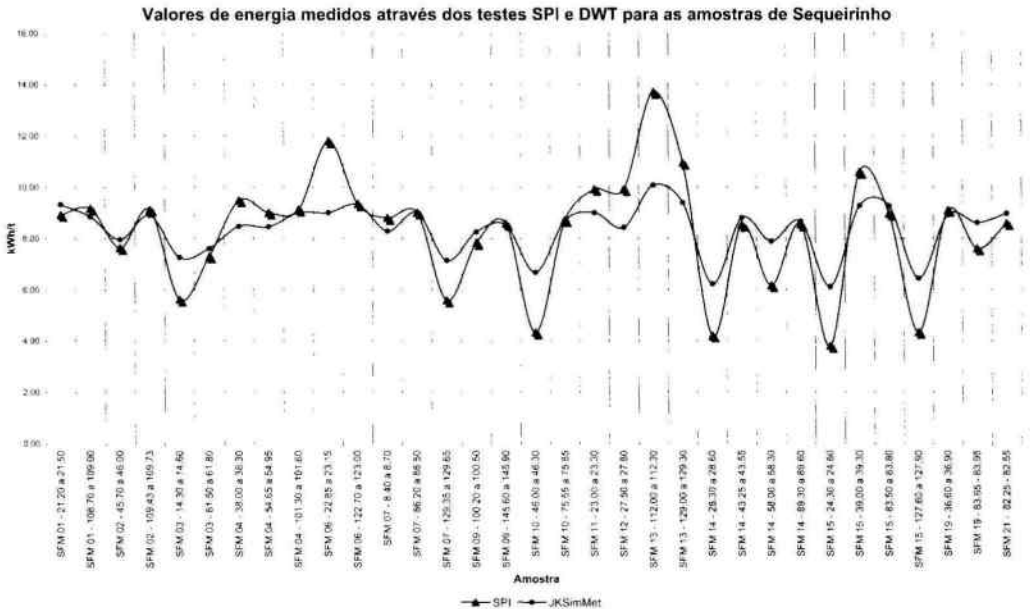


Figura 7 – Valores de energia obtidos através dos testes SPI e DWT para as amostras da cava de Sequeirinho.

Analisando os dados acima, percebe-se que as amostras provenientes da cava de Sequeirinho requerem maior energia específica para sua cominuição, ressaltando que para a cava de Sossego, foram testadas três amostras com profundidade em torno de 35 metros, ainda na zona oxidada. Os valores obtidos para essas amostras foram bem mais baixos do que os valores das zonas sulfetadas, abaixando assim a média dos valores para a cava de Sossego. Percebe-se, também, que o comportamento dos minérios das cavas é semelhante.

Um importante ponto que deve ser considerado na comparação entre os dois testes é o fato de existir uma enorme disparidade entre a quantidade de amostra necessária para a realização de um e de outro. Enquanto o DWT necessita de 70 kg de amostra para a predição da energia necessária para cominuição, o SPI requer apenas 2 kg. Este fato é extremamente relevante pois permite que, com menor quantidade de amostra, um maior número de testes possa ser realizado, sendo possível a realização de um mapeamento da mina quanto à quantidade de energia necessária para a cominuição de todo o corpo mineral.

Com o mapeamento em mãos, é possível um planejamento de lavra mais preciso, evitando surpresas futuras e possibilitando um dimensionamento que atenda às necessidades de cominuição do minério durante toda a vida da mina.

4. CONCLUSÕES

Os valores encontrados nos testes são apenas orientativos, já que ambos os testes dependem das condições de moagem adotadas. Os testes Drop Weight requerem que o operador do simulador JKSimMet tenha que assumir mais condições (tamanho dos moinhos, velocidade dos moinhos, carga de bolas, carga total etc.) do que o operador do simulador CEET.

Ambos os testes são capazes de prever a energia específica para cominuição do minério estudado, desde que as condições adotadas pelos operadores sejam parecidas com as que serão utilizadas e exigidas do novo circuito.

De posse de um estudo de dimensionamento de um circuito de cominuição feito utilizando-se as tecnologias da MinnovEX e do JKTech, a empresa mineradora contará com o que há de mais avançado e preciso neste tipo de dimensionamento, descartando incertezas quanto à essa fase do projeto.

O teste SPI requer pequena quantidade de amostra, deve ser realizado para determinação da variabilidade da energia específica ao longo do depósito mineral. Os valores encontrados serão indicativos dessa variabilidade e garantem um maior conhecimento do depósito, assegurando um melhor planejamento de lavra em todas as fases da vida da mina.

Os testes Drop Weight devem ser realizados para determinação da energia específica em pontos determinados do depósito, já que requerem de maior quantidade de amostra. Também devem ser realizados para uma comparação com os resultados dos testes SPI, de forma a observar a possível ocorrência de alguma anomalia entre os mesmos.

Diante da importância do circuito de cominuição em uma usina de beneficiamento, ambos os testes devem ser realizados. O custo para sua realização é compensado com a economia resultante do correto dimensionamento do circuito. Essa economia será notada no investimento inicial e também nos custos operacionais da usina.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Companhia Vale do Rio Doce, Estudos de Caracterização para Mmoagem – Projeto Sossego, 58 p., novembro 2000.

Dobby, G. & Starkey, J. Application of the MinnovEX SAG Power Index at five Canadian plants. In: *SAG Conference*, 2, Vancouver, Canadá, p. 345-360, 1996.

Dobby, G., Bennett, C. & Kosick, G. Advances in SAG circuit design and simulation applied to the mine block model. In: *SAG Conference*, 3, Vancouver, Canadá, p. IV221-IV234, 2001.

Grandy, G.A. Geometalurgia. In: Kvaerner, *Relatório de Auditoria do Estudo de Viabilidade Definitivo Feito para Companhia Vale do Rio Doce S/A.*, Março 2002.

JKMRC – Julius Kruttschnitt Mineral Research Center. *Mineral Comminution Circuits; Their Operation and Optimisation*. Australia, 413p., 1995.

Turner, R.R. Selection and sizing of primary autogenous and semi-autogenous grinding mill. In: *Design and Installation of comminution circuits*. AIMMPE, New York, p.474-490, 1982.