

## PREVISÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE BRITADORES

Neves, P.B.<sup>1</sup>; Tavares, L.M.M.<sup>2</sup>

1 – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Cx.

Postal 68505 – 21949-900 – Rio de Janeiro – RJ. pat@metalmat.ufrj.br

2 – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Cx.

Postal 68505 – 21949-900 – Rio de Janeiro – RJ. tavares@ufrj.br

Britadores são responsáveis por uma parcela significativa do consumo energético em circuitos de processamento mineral. A previsão do seu consumo de energia é de fundamental importância tanto na otimização de circuitos em operação quanto no projeto de novas instalações industriais. O presente trabalho analisa criticamente as diferentes metodologias usadas, como aquelas propostas por Bond e Andersen. É proposta uma modificação da metodologia proposta por Awachic e Andersen, por meio do uso de informações de quebra de partículas individuais na célula de carga de impacto. O modelo é validado a partir de resultados de britagem de diversos britadores cônicos operando em circuitos industriais de produção de brita.

**Palavras-chave:** britagem, energia, simulação

**Áreas temáticas:** cominuição, simulação de processos

## INTRODUÇÃO

A cominuição é a atividade responsável pela maior parte do consumo de energia no processamento de minérios e de uma parte significativa da energia consumida na fabricação de cimento (aproximadamente 30%) (Wills, 1997). Um estudo realizado no final da década de 1970 estimou que cerca de 1,5% de toda a energia elétrica do país era usada (direta ou indiretamente) em processos de cominuição. Este mesmo estudo avaliou que aumentos significativos da eficiência energética na cominuição poderiam resultar em economias superiores a 20 bilhões de kWh por ano nos Estados Unidos (Herbst, 1981). Esse grande consumo energético na cominuição sugere que uma pequena elevação na eficiência energética de um circuito de cominuição pode resultar em uma redução considerável de energia (Morrell et al., 1992). A alternativa de menor custo para a redução do consumo energético na cominuição é a otimização do ajuste dos equipamentos individuais em um circuito.

Métodos tradicionais usados na previsão do consumo de energia, baseados nas teorias de Rittinger, Kick e Bond (as “leis da cominuição”) (King, 2001), não podem ser usados indiscriminadamente e nem são de aplicação geral, uma vez que cada uma delas melhor se aplica a um dado intervalo de tamanhos. Entretanto, a maior limitação destas várias teorias está ligada ao fato que, na prática, a maior parte da energia usada na cominuição é dissipada na forma de calor e de deformação plástica, e não realiza nenhum trabalho útil. Ainda assim, existem diversos exemplos de aplicação das leis de cominuição na previsão do consumo energético de britadores (King, 1990).

Uma alternativa interessante às “leis da cominuição” é a determinação direta da relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante, a partir de ensaios de quebra de partículas individuais. Essa é a base do modelo desenvolvido por Andersen (1988), baseado no modelo matemático da britagem de Whiten. Andersen desenvolveu um modelo que permite a previsão da energia consumida por britadores com base no conhecimento de características de quebra do minério e da sua redução de tamanho durante a britagem. Essas características de quebra são determinadas a partir de ensaios de impacto realizados em laboratório, utilizando um pêndulo duplo ou, mais recentemente, o *drop-weight tester* (Napier-Munn et al., 1996).

Mais recentemente, modelos mecânicos de britadores cônicos e giratórios têm sido desenvolvidos com o objetivo de descrever em detalhe o fluxo e a quebra de partículas no interior da câmara do britador, permitindo prever a influência de diversas variáveis de projeto e operação na distribuição granulométrica do produto (Evertsson, 1998). Carvalho (2003) modificou esse modelo, utilizando informações de quebra de partículas individuais, tornando possível a sua utilização na previsão do consumo energético.

O presente trabalho utiliza uma metodologia baseada naquela proposta por Awachic e Andersen para o cálculo do consumo energético de britadores, através do uso de informações de quebra de partículas individuais na célula de carga de impacto. Para validação do modelo são usados resultados de cominuição em britadores cônicos operando em três circuitos industriais de produção de brita para a construção civil.

## DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A descrição clássica da britagem por compressão (realizada em britadores giratórios, cônicos e de mandíbulas) é realizada com base nos ciclos de quebra e classificação que se repetem durante a passagem das partículas através da câmara de britagem. Essa formulação, proposta originalmente por William Whiten (Napier-

Munn et al., 1996), é mais convenientemente representada por (King, 2001)

$$x_i = \frac{1}{1 - c_i b_{ii}} \left( p_i^f + \sum_{j=1}^{i-1} C_j x_j b_{ij} \right) \quad \text{e} \quad p_i = (1 - C_i) x_i, \quad (1)$$

cujo caráter recursivo torna fácil a sua implementação computacional.

Além da distribuição granulométrica da alimentação  $p_i^f$ , a previsão de resultados de britagem (Equações 1) requer o conhecimento das matrizes  $b_{ij}$  e  $C_j$ , as quais representam a funções quebra e classificação, respectivamente. Uma forma funcional freqüentemente usada na determinação da função classificação é dada por (King, 2001)

$$\begin{aligned} C_i = C(d_i) &= 0,0 && \text{para } d_i < d_1 \\ &= 1,0 - \left( \frac{d_i - d_2}{d_1 - d_2} \right)^n && \text{para } d_1 < d_i < d_2 \\ &= 1,0 && \text{para } d_i > d_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Na Equação 2,  $d_1$  representa o menor tamanho de partícula que o britador pode comprimir e, portanto quebrar, enquanto  $d_2$  representa a maior partícula que pode passar através do britador no instante de maior abertura do ciclo. Os tamanhos,  $d_1$  e  $d_2$ , são diretamente influenciados pela abertura de posição fechada do britador (APF). King (1990) sugere as seguintes aproximações para  $d_1$  e  $d_2$ :

$$d_1 = \beta \text{ APF} \quad \text{e} \quad d_2 = \gamma \text{ APF} \quad (3)$$

Os parâmetros  $\gamma$  e  $\beta$  nas Equações (3) são determinados a partir de resultados industriais de britagem. No presente trabalho usou-se o valor de  $n = 2,3$  para todos britadores (Napier-Munn et al., 1996).

Diferentes formas funcionais têm sido utilizadas no cálculo da função quebra. Enquanto a equação de Austin com três parâmetros é a mais freqüentemente usada (King, 1990), pesquisadores do *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC) (Napier-Munn et al., 1996) têm preferido interpolar os dados de quebra de partículas por Splines cúbicas. No presente trabalho propõem-se descrever a função quebra na forma normalizável a partir da função de Rosin-Rammler truncada, dada por (King, 2001)

$$B_{ij} = B(D_i; d_j) = 1 - (1 - t_{10j}) \left( \frac{9}{d_j/D_i - 1} \right)^9 \quad (4)$$

sendo  $d_j = (D_j D_{j+1})^{0,5}$ ,  $D_j$  são as aberturas das peneiras e  $\alpha$  é um parâmetro que requer ajuste a partir de dados experimentais de quebra de partículas individuais. Os valores de  $b_{ij}$  podem ser obtidos a partir da função quebra acumulada por

$$b_{ij} = B(D_{i-1}; d_j) - B(D_i; d_j) \quad \text{e} \quad b_{jj} = 1 - B(D_j; d_j) \quad (5)$$

O parâmetro  $t_{10}$  para cada classe de tamanhos  $j$  pode ser determinado a partir de resultados de ensaios de quebra na célula de carga de impacto (Tavares e King, 1998). O valor de  $t_{10}$  depende do material, da energia de impacto aplicada e do tamanho de partícula, podendo ser descrito por

$$t_{10j} = t_{10, \text{máx}} \left[ 1 - \exp(-\eta E_{cs} / E_{50j}) \right] \quad (6)$$

sendo,  $E_{cs}$  a energia específica de impacto aplicada.  $E_{50}$  é a energia de fratura mediana, que representa a energia de impacto na qual metade das partículas sofrem ruptura, sendo dada por (Tavares e King, 1998)

$$E_{50j} = E_{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{d_0}{d_j} \right)^{\phi} \right] \quad (7)$$

A previsão do consumo energético de cada britador das usinas foi realizada a partir da modificação no modelo usado pelo JKMRC. O modelo, desenvolvido por Andersen (1988), é aplicado a vários tipos de britadores, fornecendo previsões bastante satisfatórias (Morrel et al., 1992). O mesmo é baseado na expressão

$$P = AP_c + P_n \quad (8)$$

sendo  $P$  a potência efetivamente empregada pelo britador durante a operação,  $P_c$  a potência calculada com base em ensaios com partículas individuais,  $P_n$  a potência utilizada pelo britador vazio e  $A$  um fator adimensional para um britador particular, obtido por regressão linear, que tipicamente varia de 1,2 a 1,5 (Napier-Munn et al., 1996).

O cálculo da potência com o teste com a célula de carga de impacto,  $P_c$ , é baseado em

$$P_c = \sum_{i=1}^j E_{cst10i} C_i x_i \quad (9)$$

sendo que  $E_{cst10}$  é a energia específica de cominuição para o valor predominante de  $t_{10}$  para o tamanho  $i$  (kWh/t),  $j$  é o número de intervalos de tamanho e  $x_i$  é vazão mássica (em t/h) do tamanho  $i$  através da câmara de britagem (Equações 1). Portanto,  $P_c$  é a energia total requerida para reduzir a distribuição de tamanhos da alimentação até a distribuição do produto, caso toda a redução se realizasse no teste de quebra (Napier-Munn et al., 1996).

A energia específica de cominuição,  $E_{cst}$ , relativa para cada tamanho  $i$ , pode ser obtida com base em descrições de fratura do minério, ou seja, relações  $E_{cst} - t_{10}$ , obtidas com o teste de quebra, sendo  $t_{10}$  a porcentagem de material passante numa abertura de 10% da maior fração da alimentação após a quebra (Napier-Munn et al., 1996).

## EXPERIMENTAL

### Caracterização da fragmentação por impacto

Amostras provenientes de três mineradoras de brita – Pedra Sul Mineração (granito/charnokito), Pedreira Vigné (sienito) e Pedreira Santa Luzia (gneisse) – foram coletadas. As características de fratura e fragmentação de partículas individuais (relação entre energia de impacto e fragmentação e energias de fratura) foram determinadas com o auxílio da célula de carga de impacto (Tavares e King, 1998; Pereira et al., 2004).

A preparação das amostras para os ensaios consistiu da separação de frações estreitas de tamanhos por peneiramento. Dez frações de tamanhos, correspondentes a tamanhos desde 106 até 2,36 mm, foram preparadas. Amostras contendo de trinta a cem partículas foram submetidas a impactos a diferentes níveis de energia na célula de carga, que variaram desde 0,1 até 2,5 kWh/t. Esses níveis de energia eram controlados pela escolha da combinação adequada de altura de queda e peso de impactor. Imediatamente após os ensaios, os fragmentos de cada amostra eram analisados por peneiramento híbrido (úmido/seco) em um peneirador RO-TAP<sup>®</sup> pelo período de 10 minutos. Amostras de frações selecionadas também foram submetidas a ensaios nas células de carga de impacto a fim de determinar a distribuição de energias de fratura.

## Amostragem em circuitos de britagem

Amostragens dos fluxos da alimentação e produto de diferentes tipos de britadores cônicos e giratórios foram realizadas nas usinas industriais da Pedra Sul Mineração Ltda (Matias Barbosa, MG), Pedreira Vigné Ltda (Nova Iguaçu, RJ) e Pedreira Santa Luzia Ltda (Itaguaí, RJ), com os britadores operando a diferentes aberturas de posição fechada (APF). O procedimento sugerido por Napier-Munn et al. (1996) foi adotado na coletas, o qual consistiu em medir uma extensão de 5 m de correia para retirada do material maior que 75 mm, seguido de coleta integral do material contido em 2 m de correia.

Amostras para análise foram compostas a partir das coletas realizadas em duplicada desses fluxos no circuito. Após o controle da APF do britador, realizada pela variação da pressão de óleo do britador (na disponibilidade do sistema *Hidroset*<sup>®</sup>) e a operação do circuito sob condições estáveis pelo intervalo de, pelo menos, dez minutos, precedia-se à parada do circuito. Durante o período de operação normal era medida precisamente a potência de trabalho do motor do britador. Durante a parada era medida a abertura de posição fechada do britador pela inserção de gabaritos de chumbo dentro da câmara dos britadores vazios. Maiores detalhes sobre o procedimento adotado nessas amostragens podem ser encontrados em outras publicações (Neves e Tavares; 2003). Em todos os casos, as amostragens dos britadores eram realizadas enquanto o britador operava com câmara cheia.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

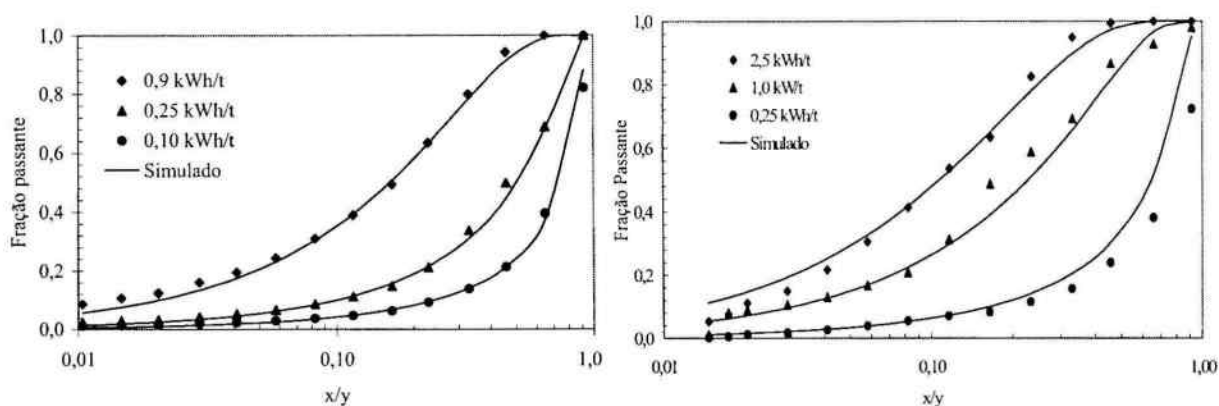
### Caracterização dos materiais

A síntese dos parâmetros de quebra dos materiais estudados é apresentada na Tabela 1. O granito se destaca por apresentar a maior resistência e o gneisse pela menor. Por outro lado, o sienito se caracteriza por apresentar um efeito significativo do tamanho de partícula na resistência, o que a torna menos resistente que o granito para tamanhos de partícula inferiores a, aproximadamente, 22 mm.

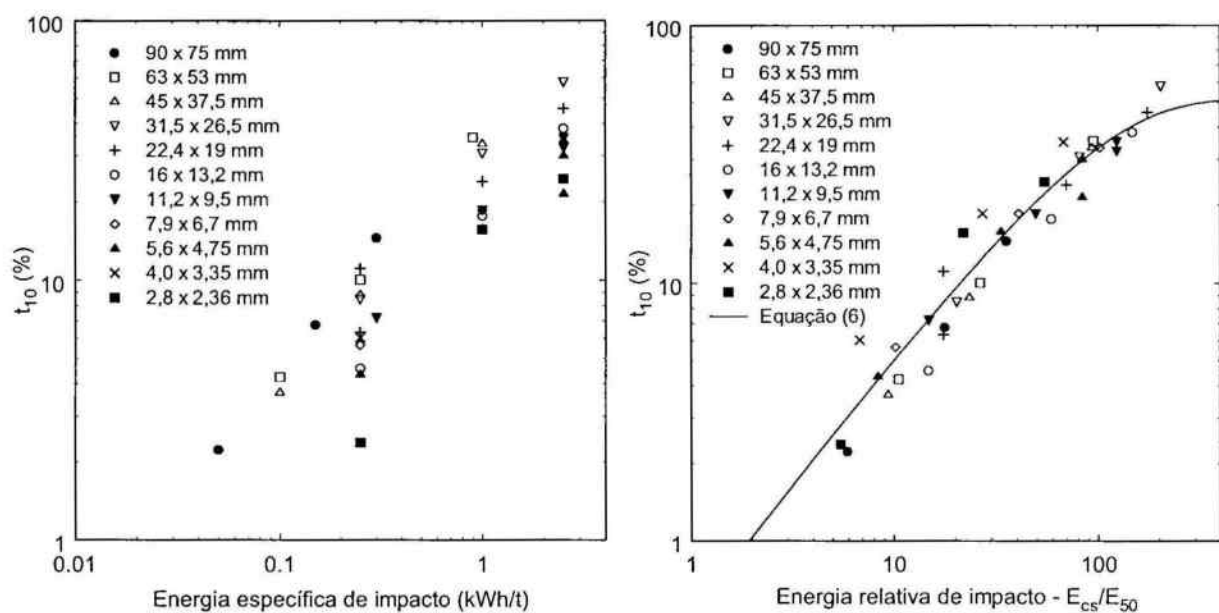
**Tabela 1** – Parâmetros das Equações 4, 6 e 7 para os materiais estudados

Material	$t_{10,max}$ (%)	$\eta$	$E_{\infty}$ (J/kg)	$d_0$ (mm)	$\phi$	$\alpha$
Granito	50,9	0,0105	44,6	2,0	1,15	0,82
Sienito	52,1	0,0085	26,8	12,5	0,71	0,85
Gneisse	56,2	0,0103	18,4	2,9	2,00	0,71

A Figura 1 apresenta o ajuste da função quebra para a amostra de granito com as diferentes energias de impacto utilizadas. Pode-se observar a boa correspondência entre os valores medidos e simulados, o que demonstra a capacidade da função de Rosin-Rammler truncada (Eq. 4) de representar resultados de fragmentação de partículas. A Figura 2 ilustra a relação entre a energia específica de impacto e a fragmentação para a amostra de sienito, demonstrando que um efeito significativo do tamanho de partícula. Esses resultados são normalizados, a partir da medida da energia de fratura de partículas, resultando em uma melhor representação da fragmentação de partículas de diferentes tamanhos. Uma análise mais detalhada desses resultados será objeto de uma publicação futura.



**Figura 1** – Comparação entre a função quebra medida e a simulada para as frações 63 x 53 mm (esquerda) e 2,83 x 2,36 mm (direita) para o granito



**Figura 2** – Relação entre  $t_{10}$  e  $E_{cs}$  (esquerda) e  $t_{10}$  e  $E_{cs}/E_{50}$  (direita) para a amostra de sicnito

### Avaliação do consumo energético dos britadores

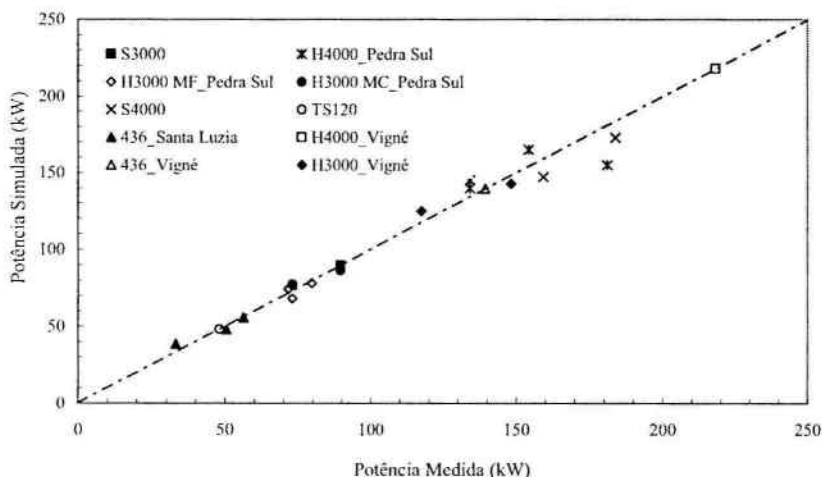
A Tabela 2 apresenta uma síntese dos dados de potência dos diferentes britadores analisados, assim como o ajuste do parâmetro  $A$  (Equação 11), obtido por regressão linear, e os parâmetros da função classificação (Eq. 3). Pode-se observar que os valores do parâmetro  $A$  variaram em um intervalo mais amplo de valores que aqueles reportados por Napier-Munn et al. (1996).

Os britadores foram caracterizados por meio do cálculo do consumo energético utilizando-se o modelo proposto. A Figura 3 compara os valores de potência medidos e os calculados para os britadores, observando-se a ótima correspondência entre os mesmos. É importante destacar que foram feitas medidas para os britadores operando com diferentes aberturas de posição fechada (APF), e para o H3000 (britador terciário) da Pedral Sul operando com

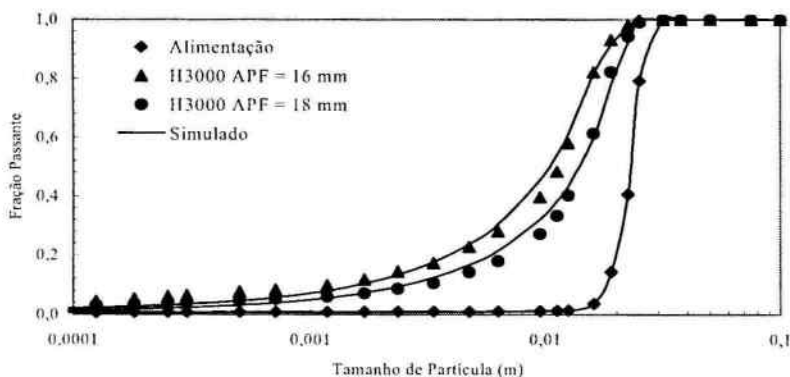
dois tipos diferentes de revestimento, e o modelo descreveu adequadamente ambas condições de operação. Por fim, a Figura 4 compara as análises granulométricas para os produtos do britador operando a diferentes APFs – calculadas a partir do modelo proposto neste trabalho – às análises granulométricas medida, mostrando boa correspondência.

**Tabela 2** – Dados de potência e ajuste dos parâmetros dos britadores

Usina	Britador	Potência nominal (kW)	Potência vazio (kW)	$A$	$\gamma$	$\beta$
Pedra Sul (granito)	S3000	149,1	39,5	0,99	1,68	0,53
	H4000	223,7	69,1	1,24	1,80	0,50
	H3000 MF	149,1	39,6	1,57	1,69	0,91
	H3000 MC	149,1	50,4	1,86	1,35	0,35
Vigné (sienito)	H4000	186,4	55,9	2,36	1,95	0,95
	436	93,2	69,9	1,44	1,90	0,98
	H3000	149,1	55,9	1,79	1,95	0,95
Santa Luzia (gnaisse)	S4000	186,4	24,5	1,66	1,90	0,90
	TS120	167,8	22,9	1,15	1,60	0,90
	436	167,8	24,1	1,28	1,68	0,70



**Figura 3** – Comparação entre a potência medida e a calculada para os diferentes britadores das usinas estudadas



**Figura 4** – Comparação entre análise granulométrica e calculada pelo modelo para britador quaternário (H3000) da Pedra Sul Mineração (granito).



## CONCLUSÕES

A função Rosin-Rammler truncada foi capaz de descrever adequadamente os resultados de quebra de partículas individuais na célula de carga de impacto. Para um dos materiais estudados (sienito) foi observado um efeito significativo do tamanho de partícula na resistência, o que resultaria em discrepâncias significativas caso esse efeito não fosse considerado na simulação do britador.

A utilização do modelo de Andersen modificado permitiu descrever com precisão resultados de britagem obtidos em diversos britadores em operação em três usinas industriais de produção de brita.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FINEP (CT-Mineral), CNPq (CT-Energ) e FAPERJ à realização desse trabalho. Os autores também agradecem ao CNPq pelas bolsas concedidas, ao pessoal técnico das empresas Pedra Sul Mineração Ltda, Pedreira Santa Luzia Ltda e Pedreira Vigné Ltda pelo apoio à realização desse trabalho, bem como ao Eng<sup>o</sup>. Bernardo Piquet pelas valiosas discussões e sugestões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, J.S., Development of a cone crusher model, Dissertação de Mestrado, University of Queensland, 1988.
- CARVALHO, E.A., Modelagem do britador cônico a partir de estudos de quebra de partículas individuais e em leitos, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, 2003.
- EVERTSSON, C.M., Miner. Eng., vol. 11, 215-231, 1998.
- HERBST, J.A., Comminution and energy conservation, Department of Energy, National Advisory Board, Committee on Comminution and Energy Consumption, National Academic Press, Washington, D.C., 1981.
- KING, R.P., Int. J. Miner. Process., vol. 29, 249-265, 1990.
- KING, R.P., Modeling and simulation of mineral processing systems, 1<sup>a</sup> edição, Butterworth-Heinemann, 2001.
- MORRELL, S.; NAPIER-MUNN, T.J.; ANDERSEN, J., The prediction of power draw in comminution machines, Comminution: Theory and Practice (S. K. Kawatra, ed.), SME, pp.233-247, 1992.
- NAPIER-MUNN, T.J.; MORRELL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T., Mineral comminution circuits: their operation and optimization, vol. 2, The University of Queensland, 1996.
- NEVES, P.B.; TAVARES, L.M.M., Racionalização do uso de energia na britagem com auxílio da simulação computacional, 58<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, pp. 209-219, 2003.
- PEREIRA, V.F, VASQUES, C.M., TAVARES, L.M.M., Fragmentação de partículas de grande diâmetro por impacto, XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis (no prelo), 2004.
- TAVARES, L.M.M.; KING, R.P., Int. J. Min. Process., vol. 54, 1-28, 1998.
- WILLS, B.A., Mineral Processing Technology, 7<sup>a</sup> edição, Butterworth-Heinemann, 1997.