

RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ENERGIA NA BRITAGEM COM AUXÍLIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Patricia Bomfim das Neves ⁽¹⁾

Luis Marcelo Marques Tavares ⁽²⁾

Resumo

A britagem é a etapa responsável pelo maior consumo de energia elétrica na produção de brita para a construção civil. A redução do consumo energético da usina pelo método de tentativa-e-erro não é trivial, tendo em vista que a produção de brita é realizada em circuitos muitas vezes complexos e com limitada flexibilidade. Portanto, a simulação se torna uma importante ferramenta na avaliação de alternativas de processo, pois permite que alternativas sejam comparadas, sem qualquer perda de tempo ou produção. O presente trabalho realiza um estudo de caso da aplicação de um simulador de processos – o USIM-PAC® – e rotinas próprias do Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE na otimização de uma usina de produção de agregado graúdo para a construção civil. Simulações sugerem que o aumento da abertura dos britadores terciário e quaternário permite reduzir o consumo energético global da usina em até 5 %, com aumento da geração do produto mais nobre do circuito. Observou-se ainda que a condição do revestimento do britador exerce uma influência significativa na eficiência energética do circuito.

Palavras-chave: britagem, simulação, agregados, energia

Rationalization of Energy Usage in Crushing with the Aid of Computer Simulation

Abstract

Crushing is the stage responsible for the greatest energy consumption in the production of crushed stone. The reduction of the energy consumption in the plant by the trial-and-error method is not a trivial matter, since crushed stone production is often carried out in circuits of significant complexity and limited flexibility. Therefore, simulation is an important tool for assessing process alternatives, as it allows the comparison of alternatives, without any loss of time or production. The present work studies the application of a mineral processing plant simulator – USIM-PAC® – and appropriate routines developed at the Mineral Processing Laboratory at COPPE in the optimization of a crushed stone plant. Simulation results suggest that the increase in the closed side setting of the quaternary crusher allows reducing the overall energy consumption in the plant by up to 5%, with an increase in the production of the higher-added value stone. Further, it was observed that the wear condition of the crusher liners plays a significant role in the circuit energy usage.

Key-words: crushing, simulation, mining, aggregate, energy

I. INTRODUÇÃO

A cominuição é uma operação que utiliza muito intensamente a energia elétrica. Ela é responsável pela maior parte (até 80%) do consumo de energia no processamento de minérios e de uma parte significativa da energia consumida na fabricação de cimento, em torno de 30%.⁽¹⁾ A fim de avaliar o impacto global da cominuição, no final da década de 1970 foi realizado um estudo no qual estimou-se que em torno de 1,5% de toda a energia elétrica dos Estados Unidos era consumida em processos de cominuição. Este valor inclui a energia usada

nos processos de britagem e moagem de minérios, cimento, grãos, bem como aquela usada na produção de corpos moedores e revestimentos empregados nesses processos. Esse relatório estimou que aumentos significativos da eficiência energética da cominuição poderiam resultar em economias superiores a 20 bilhões de kWh por ano nos E.U.A.,⁽²⁾ valor esse que representa mais de 5% de todo o consumo energético anual de energia elétrica no Brasil.

⁽¹⁾ Engenheira metalúrgica, mestranda no PEMM/COPPE.

⁽²⁾ Engenheiro de minas, M.Sc., Ph.D., Professor Adjunto, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – COPPE/UFRJ. (Tavares@ufjf.br)

Infelizmente não se dispõe de estimativas confiáveis sobre o consumo de energia elétrica na cominuição no Brasil. Ainda assim, tendo em vista o nível de industrialização, a composição de sua matriz energética e a importância das indústrias mineral e cimenteira, é possível estimar que o consumo energético em operações de cominuição no Brasil também seja muito significativo. Isso sugere que mesmo uma pequena elevação na eficiência energética de um circuito de cominuição pode resultar em redução substancial da energia consumida. Isso se reveste de especial importância pela elevação do custo e pela escassez da energia elétrica em anos recentes no Brasil. A alternativa de menor custo para a redução do consumo energético na cominuição é a otimização do ajuste dos equipamentos individuais em um circuito, com o auxílio da previsão de resultados em computador. A simulação permite prever o impacto de alterações no ajuste de equipamentos individuais bem como do *layout* do circuito, sem que ocorram perdas de produção ou de tempo. Evidentemente, a precisão e a utilidade dos resultados da simulação dependem fundamentalmente da qualidade dos modelos presentes no simulador.

O presente trabalho demonstra a aplicação de um simulador comercial de processos, o USIM PAC® (BRGM, França), bem como de rotinas próprias de cálculo do consumo de energia, na otimização de um circuito de produção de rocha britada, visando reduzir o consumo de energia elétrica no processo.

2. CIRCUITO DE BRITAGEM DA PEDRA SUL MINERAÇÃO LTDA

O circuito de britagem estudado encontra-se no município de Matias Barbosa, MG. Operado desde 1999 pela Pedra Sul Mineração Ltda, o circuito tem capacidade nominal de 270 m³/h (aproximadamente 450 t/h), o que corresponde a uma produção mensal da ordem de 45.000 m³ (75.000 t) para um turno diário de 8 horas.

A rocha lavrada é um charnoquito com baixo grau de intemperismo. A lava é realizada a céu aberto e o desmonte da rocha com o auxílio de explosivos. A rocha desmontada é carregada em caminhões fora-de-estrada e

transportada até o circuito de britagem. A britagem é realizada em quatro estágios, sendo o britador de mandíbulas I208HD (Sandvik) utilizado no primeiro estágio. Nos estágios seguintes (rebritagem) britadores giratórios (S3000) e hidrocônicos (H4000 e H3000) são usados. Todos britadores da etapa de rebritagem, de fabricação da Sandvik, operam com câmara cheia, com monitoramento visual do nível da mesma por um operador situado na sala de controle, o qual é possível pelo controle da vazão de alimentação de cada britador individual. A produção de brita ainda passa por peneiramento, com a utilização de três unidades de peneiras para classificação e uma de seleção e limpeza. As peneiras utilizadas são de multi-inclinação, também chamadas de peneiras banana (Sandvik). A potência nominal instalada de todo o circuito de britagem, que inclui britadores, compressor, peneiras, alimentadores e transportadores de correia, é de 1040 kW, sendo que os britadores representam aproximadamente 60% deste total.

Os produtos da usina são a brita 2 (32 x 25 mm – usada em concreto de fundações e pisos), a brita 1 (25 x 11 mm – usada em concreto em geral, confecção de estacas pré-moldadas para fundações, drenos e base para pistas), a brita 0 (11 x 4,5 mm – usada em revestimentos de lajes pré-moldadas e em concreto) e o pó-de-pedra (usada na produção de asfalto e de blocos de cimento para alvenaria).

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu de campanhas de amostragem, seguidas de análises granulométricas das amostras e de ensaios para determinação das características de quebra de partículas em Células de Carga de Impacto (CCI). Essas informações foram usadas para a determinação das características cominutivas da rocha, bem como para a calibração dos modelos matemáticos.

Duas campanhas de amostragem foram realizadas:

- Uma primeira amostragem de todos os fluxos acessíveis do circuito foi realizada durante um período de operação normal da usina, com medida da potência do britador carregado e vazio, medida da abertura de posição fechada (APF) com o auxílio de gabaritos de chumbo;
- A segunda etapa de amostragem consistiu da retirada de amostras do produto de cada um dos britadores operando a diferentes APFs. Esses ensaios foram realizados com o intuito de fornecer subsídios para a modelagem matemática dos britadores. Após o controle da APF do britador, realizado pela variação da pressão de óleo pelo sistema *Hidroset*®, e a operação do circuito sob condições estáveis pelo intervalo de, pelo menos, dez minutos, precedia-se à parada do circuito para amostragem.

Detalhes do procedimento de amostragem realizado segundo o padrão sugerido por Napier-Munn et al.,⁽³⁾ bem como do procedimento adotado nos ensaios com a CCI, podem ser encontrados em outras publicações.^(4,5)

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos matemáticos são necessários para descrever quantitativamente o desempenho de peneiras e britadores para uso na simulação computacional.

Existem diversos métodos para descrever operações de peneiramento, todavia o simulador USIM PAC® utiliza aquele proposto por Karra.⁽⁶⁾ O modelo é baseado no conhecido procedimento para avaliação da capacidade da peneira por meio dos fatores de capacidade. Maiores detalhes sobre esse modelo podem ser encontrados em outras publicações.^(4,7)

O modelo usado para descrever a operação de britadores é baseado nas funções classificação $C(x)$ e quebra $B(x,y)$ propostas por Whiten.⁽⁸⁾ A formas funcionais usadas nessas expressões são dadas por:

$$B(x,y) = Ky^{n_1} \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1 - Ky^{n_1}) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2} \quad (1)$$

$$C(x) = \begin{cases} 0 & x \leq d_1 \\ = 1 - \left(\frac{x - d_2}{d_1 - d_2}\right)^n & d_1 \leq x \leq d_2 \\ = 1 & x \geq d_2 \end{cases} \quad (2)$$

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

sendo y o tamanho original da partícula e x o do fragmento gerado pela fratura.

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, sendo ambos diretamente influenciados pela APF do britador (Equação 3).⁽⁷⁾ No presente trabalho usou-se o valor de $n = 2,3$ na Equação 2 para todos britadores. Os parâmetros n_1 e n_2 dependem da rocha sendo britada enquanto o parâmetro K (Equação 1) também é influenciado pela condição de operação do britador. Esse modelo encontra-se disponível no simulador de processos USIM PAC®.

A previsão da energia consumida nos britadores é de importância central na simulação do circuito de britagem. Uma modificação de um modelo originalmente proposto no JKMRCC⁽³⁾ foi proposta. Esse modelo permite a previsão da energia consumida por britadores com base nas características de quebra do minério, determinadas em ensaio de quebra de partículas individuais no *Drop Weight Tester* – DWT, e da redução de tamanho do britador. O modelo foi desenvolvido por Andersen baseado no trabalho de Awachie, e é aplicado a vários tipos de britadores e fornecendo previsões bastante satisfatórias.⁽³⁾ O mesmo é baseado em:

$$P = AP_c + P_n \quad (4)$$

sendo P a potência efetivamente empregada pelo britador durante a operação, P_c a potência calculada com base em ensaios de quebra de partículas individuais no DWT, P_n a

potência utilizada pelo britador vazio e A um fator adimensional para um britador particular, obtido por regressão linear. O cálculo da potência com o ensaio no DWT (P_c) é baseado no modelo de britagem de Whiten, sendo dado por:

$$P_c = \sum_{i=1}^j E_{cst10i} C_i x_i \quad (5)$$

sendo E_{cst10i} a energia específica de cominuição para o valor predominante de t_{10} , para o tamanho i (KWh/t), j o número de intervalos de tamanho, C_i é a probabilidade de quebra do tamanho i (Equação 2), e x_i vazão mássica de material do tamanho i pelo britador. Portanto, P_c é a energia total requerida para reduzir a distribuição de tamanhos da alimentação até a distribuição de tamanho do produto, como se toda a redução se realizasse no ensaio de impacto no DWT [3].

A energia específica de cominuição (E_{csi}) para cada tamanho i pode ser obtida com base na relação entre E_{cs} , t_{10} e o tamanho de partículas, obtidas com o ensaio de impacto das partículas, sendo t_{10} a porcentagem de material passante numa abertura de 10% da maior fração da alimentação após a quebra. Assim, dadas a alimentação e a distribuição de tamanhos desejada para o produto, a relação entre E_{cs} e t_{10} para o minério pode ser obtida relacionando-se os resultados obtidos nos testes de quebra realizados na CCI (ao invés do DWT), com as seguintes equações, com parâmetros já ajustados para a rocha do presente trabalho:

$$t_{10} = 51 \left[1 - \exp\left(-0,016 \frac{E_{cs}}{E_{50}}\right) \right] \quad (6)$$

sendo, E_{cs} a energia específica de impacto empregada, dada em J/kg. E_{50} é a energia de impacto para qual metade das partículas são quebradas,⁽⁹⁾ dada por:

$$E_{50} = 63 \left[1 + \left(\frac{3,4}{d}\right)^{1,2} \right] \quad (7)$$

, com d dado em mm.

O modelo descrito pelas Equações (4-7) não se encontra disponível no simulador USIM PAC®, tendo sido implementado usando uma planilha eletrônica.

5. RESULTADOS DA AUDITORIA TÉCNICA DO CIRCUITO

Resultados detalhados da auditoria técnica do circuito podem ser encontrados em outro trabalho,⁽⁴⁾ com apenas alguns aspectos sendo analisados a seguir. A Tabela 1 apresenta um resumo das características e do desempenho de algumas peneiras no circuito. Ela demonstra que as peneiras multi-inclinação usadas apresentam elevada eficiência, apesar da elevada razão entre a vazão real de produto passante e a vazão nominal (RUA). Os valores ótimos da constante A, bem como os parâmetros usados na simulação são apresentados na Tabela 2.

6. SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

A aderência entre os resultados da simulação e os dados experimentais é verificada pela comparação entre os balanços de massas e distribuições granulométricas medidas e calculadas do circuito, conforme mostram as Figuras 2 e 3, respectivamente. A excelente correspondência, com destaque aos desvios inferiores a 5% entre o balanço de massas medidos e simulados, demonstra a elevada fidelidade da simulação.

Com o objetivo de demonstrar o potencial de aplicação da simulação foi analisado o impacto da mudança da abertura dos britadores terciário (H3000) e quaternário (H4000) no consumo energético global do circuito e na partição de produtos da usina, sendo os resultados resumidos na Tabela 3. Essa variável foi utilizada pela sua influência significativa no consumo energético na britagem.^(1,3) No cálculo do consumo energético global do circuito considerou-se arbitrariamente que os motores de todos os demais equipamentos do circuito (alimentadores, transportadores de correia e peneiras vibratórias) operam a 50% da sua potência nominal. Esse consumo energético global é, por sua vez, composto por aquele relativo ao tempo normal de operação (turno de 8 horas) – quando os consumos energéticos de todos equipamentos são considerados – acrescido ao tempo extra de operação, quando apenas parte dos equipamentos (britadores, peneiras, alimentadores e transportadores de correia) se encontram em funcionamento.

Tabela 1. Síntese das características e do desempenho de peneiras selecionadas

Modelo	Deque	Abertura (mm)	d_{50} (mm)	Imperfeição	Razão de utilização de área (RUA)	Eficiência (%)
SH 8x16	Primeiro	32	27,0	0,11	4,0	95,2
(10 e 11)	Segundo	25	15,2	0,14	4,1	94,0
SH 7x16 (16)	Primeiro	4,8	3,2	0,16	3,2	91,9

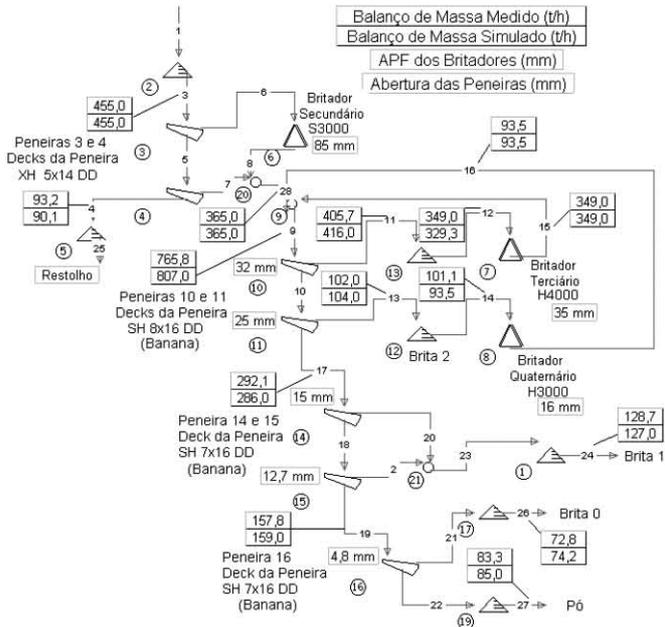


Figura 1. Fluxograma da rebitagem da Pedra Sul Mineração Ltda, apresentando a comparação entre o balanço de massas medido e simulado.

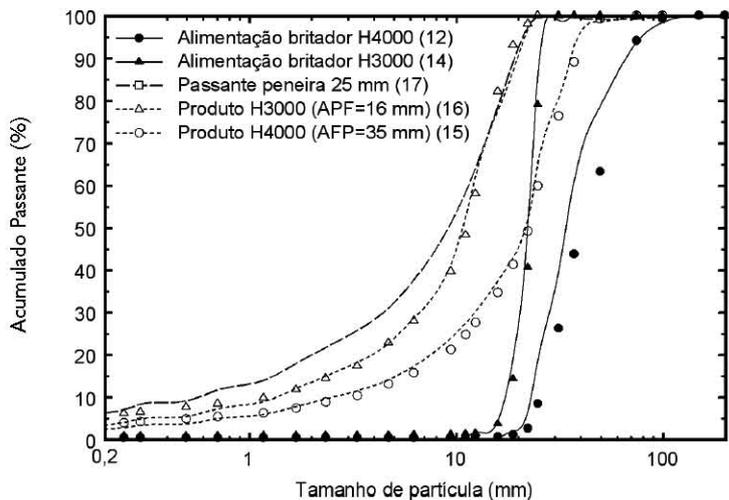


Figura 2. Comparação entre distribuições granulométricas medidas (símbolos) e simuladas (linhas) para produtos de britadores e peneira.

Tabela 2. Síntese das características e do desempenho dos britadores

Britador	APF (mm)	Potência (kW)		Eq. 1		Eqs. 3		Razão de redução	Parâm. A
		Nominal	vazio cheio	K	n_1 n_2	α β			
S3000	62	149,1	39,5 89,5	0,35	0,70 2,8	1,25	0,50	2,7	1,11
H4000	35	223,7	69,1 179,1	0,40	0,55 2,0	1,80	0,40	1,7	1,00
H3000	16	149,1	39,5 79,6	0,49	0,59 3,0	1,55	0,55	1,2	1,10

Tabela 3. Resultados da simulação do circuito a diferentes aberturas dos britadores e condições do revestimento do britador quaternário

Condição do revestimento (tipo MF) do H3000	APF (mm)		Produção (%)				Consumo energético		Tempo extra de operação (%)
	S3000	H4000	H3000	Brita I	Brita 0	P6	Global diário (kWh)	Relação com operação normal (%)	
Desgastado*	62	35	16	44,0	29,1	26,9	3412	100,0	24
Desgastado	62	30	14	41,9	30,7	27,5	3520	103,1	25
Desgastado	62	35	20	46,4	27,4	26,3	3392	99,4	24
Desgastado	62	40	16	45,1	28,3	26,6	3244	95,1	33
Desgastado	62	40	20	47,1	26,8	26,1	3224	94,6	35
Novo	62	35	16	44,5	28,7	26,8	3244	95,1	22

* Condição de operação do circuito durante a amostragem.

Com o revestimento do britador H3000 (quaternário) na condição desgastada, aumentos nas APFs dos britadores H3000 e H4000 resultaram em redução do consumo global de energia do circuito, com manutenção ou pequeno aumento do tempo extra de operação.

A influência da condição do revestimento do britador H3000 no consumo energético do circuito também é analisada na Tabela 3. Nessa simulação foram usadas informações sobre a relação entre a capacidade horária do britador e a abertura de posição fechada para a condição de operação com câmara cheia, levantadas durante a etapa de amostragem. Essa relação pode ser descrita por: Capacidade (t/h) = $a \cdot APF + b$, para $14 < APF < 22$ mm (8) sendo que para o caso do revestimento “novo”, restando aproximadamente 93% de sua vida útil, $a = 5,0$ e $b = 25$. Para o caso do revestimento desgastado, restando apenas 20% de sua vida útil, $a = 3,9$ e $b = 31$.

A Tabela 3 mostra que a capacidade significativamente mais elevada do britador quaternário com revestimentos novos pode resultar em uma redução de quase 5% do consumo energético global do circuito.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho de auditoria técnica da usina permitiu concluir que:

- as peneiras vibratórias multi-inclinação (peneiras banana) apresentaram ótimo desempenho, apesar das elevadas razões de utilização de área;
- sob condições normais de operação, as capacidades de britagem dos britadores terciário e quaternário são inferiores à sua taxa de alimentação, o que resulta em um acúmulo na sua pilha-pulmão (Figura 2). Isso implica na necessidade de operação de parte o circuito por até 24% mais de tempo para processamento desse material;
- o consumo energético específico global dos três britadores da etapa de rebitagem é de 0,89 kWh/t.

A simulação do circuito permitiu concluir que:

- o aumento da abertura do britador terciário (H4000) de 35 para 40 mm e do quaternário (H3000) de 16 para 20 mm permite uma redução em 5,4% do consumo energético global da usina e um aumento de 3,1% da proporção de brita I produzida, o qual é o produto mais nobre e de maior valor agregado;
- o uso de revestimentos novos no britador quaternário é capaz de reduzir em até 5% o consumo global de energia do circuito, com uma diminuição, ainda que pequena, no tempo extra de operação, sem qualquer alteração na partição dos produtos da usina;
- mesmo sob as condições mais severas de operação (abertura de posição fechada de 14 mm e revestimento desgastado) a potência empregada no britador quaternário não atinge 50% da potência nominal. Portanto, a substituição do motor atual de 150 kW por outro de menor potência é recomendada.

Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio financeiro do CNPq (CT-Energia) e da FINEP (CT-Mineral) à realização da pesquisa, o apoio à realização das amostragens pela Pedra Sul Mineração Ltda. e ao Eng^o. Bernardo Piquet pelas diversas sugestões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WILLS, B.A. **Mineral processing technology**: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 6.ed. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 1997.

2. HERBST, J.A. **Comminution and energy conservation**. Washington, D.C.: National Academic Press, 1981.
3. NAPIER-MUNN, T.J., MORREL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization**. Brisbane: The University of Queensland, 1996.
4. NEVES, P.B. **Otimização do processo de produção de brita utilizando a simulação computacional**. 2002. 66p. Projeto Final de Curso — Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
5. FIGUEIREDO, V., VASQUES, C.M., NEVES, P.B., TAVARES, L.M. Fragmentação de partículas de grande diâmetro por impacto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 20., Florianópolis, 2004. **Anais...** Criciúma: Desktop, 2004. v.1, p.33-40.
6. KARRA, V.P. Development of a model for predicting the screening performance of vibrating screens. **CIM Bulletin**, p. 168-171, 1979.
7. KING, R.P. Simulation: the modern cost-effective way to solve crusher circuit processing problems. **International Journal of Mineral Processing**, v. 29, n.3-4, p. 249-265, Oct. 1990.
8. WHITEN, W.J. The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF COMP. MET. MIN. IND. (título do evento por extenso), 10., Johannesburg, 1972. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1972. p. 317-323.
9. TAVARES, L.M., KING, R.P. Single-particle fracture under impact loading. **International Journal of Mineral Processing**, v. 54, n.1, p. 1-28, Jun.1998.