

ESTUDO DE CAPACIDADE DE MOINHO DE MARTELOS

FELIPE, R.A.S.¹, GOMES, W.L.², DELBONI JR., H.³, JATOBÁ, T.L.A.⁴, ASSIS, V.M.⁵; MAGALHÃES, M.F.⁶

¹Estudante de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
rafael.felipe@usp.br

²Estudante de doutorado, Escola Politécnica da USP. wellingtonlacerdagomes@gmail.com

³Professor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. hdelboni@usp.br

⁴Estudante de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
tjatonline@gmail.com

⁵Engenheiro de processo, Anglo Gold Ashanti. vinicius.eng@gmail.com

⁶Engenheiro de processo, Anglo Gold Ashanti. mfmagalhaes@anglogoldashanti.com.br

RESUMO

O adotado para o minério de ouro de uma usina localizada no estado de Minas Gerais consiste em britagem primária em britador de mandíbulas, seguida por britagem secundária em moinho de martelos sem grelha, disposto em um circuito fechado reverso, em peneira de 19 mm. O produto deste circuito segue então para o processo de aglomeração e posterior lixiviação em pilha e subsequente extração do ouro. Atualmente, a usina encara o desafio de aumento de produção, com preferência em soluções que proponham ajustes nos equipamentos já instalados na operação, com atenção especial para o moinho de martelos, que atualmente opera em sua configuração de rotação mínima e número de martelos reduzido. O presente trabalho tem como objetivo estimar o aumento de capacidade e desempenho tangível na usina de britagem através de alteração de parâmetros de operação do moinho de martelos. Para tal avaliação, inicialmente foi estabelecido um diagnóstico atualizado e detalhado do desempenho do circuito, através da realização de amostragem completa na usina de britagem, seguida de caracterização dos fluxos amostrados através de ensaios de DWT, WI, AI e análise granulométrica, ensaios estes que serviram de base para a elaboração do modelo do circuito no simulador *JkSimMet*. Após a obtenção do modelo calibrado (caso base), foram realizadas simulações, verificando-se a possibilidade de aumento de capacidade do circuito através da variação da rotação do moinho de martelos.

PALAVRAS-CHAVE: britagem, moinho de martelos, modelagem, simulação.

ABSTRACT

The crushing process of the gold ore from a plant, located in the state of Minas Gerais consists of primary crushing in jaw crusher, followed by secondary crushing in a hammer mill without grate, arranged in a reverse closed-circuit with a 19 mm sieve. The product of this circuit then proceeds to the agglomeration process followed by heap leaching for gold extraction. Currently, the plant faces the challenge of increasing production, with preference in solutions that propose adjustments in equipment already installed in the operation, with special attention to the hammer mill, which currently operates in its configuration of minimum rotation and reduced number of hammers. The present work aims to estimate the increase of capacity and tangible performance in the crushing plant by altering the parameters of operation of

the hammer mill. For this evaluation, an up-to-date and detailed diagnosis of the performance of the circuit was established by performing a complete sampling in the crushing plant, followed by characterization of the sampled flows through DWT, WI, AI and particle size analysis. The results of those tests were the basis for the elaboration of the circuit model in the *JkSimMet* simulator. After obtaining the calibrated model (base case), simulations were carried out, verifying the possibility of increasing the capacity of the circuit by varying the rotation of the hammer mill.

KEYWORDS: crushing, hammer mill, modelling, simulation.

1. INTRODUÇÃO

Etapas de cominuição representam uma grande parcela do capital e custo operacional em uma usina de processamento mineral. Cohen (1983) estimou que os processos de cominuição podem ser responsáveis por 30% a 50% do consumo energético da usina, podendo chegar até 70% para minérios tenazes, e representam tipicamente 50% dos custos operacionais de uma mineração. Sendo assim, sua otimização está diretamente relacionada com a redução destes custos de operação.

Na usina de minério de ouro escolhida para o estudo, localizada no estado de Minas Gerais, esta etapa consiste em britagem primária em britador de mandíbulas, seguida por britagem secundária em moinho de martelos sem grelha, disposto em um circuito fechado reverso, em peneira de 19 mm. O produto deste circuito segue então para o processo de aglomeração e posterior lixiviação em pilha para subsequente extração do ouro.

Atualmente, a usina encara o desafio de aumento de produção, com preferência em soluções que proponham ajustes nos equipamentos já instalados na operação, com atenção especial para o moinho de martelos, que atualmente opera em sua configuração de rotação mínima e número de martelos reduzido.

O presente trabalho tem como objetivo estimar o aumento de capacidade e desempenho tangível na usina de britagem através de alteração de parâmetros de operação do moinho de martelos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Afim de avaliar a performance da usina, foi estabelecido um diagnóstico atualizado e detalhado do desempenho do circuito, através da realização de amostragem completa na usina de britagem, seguida de caracterização tecnológica dos fluxos amostrados através de ensaios de DWT, WI, AI e análise granulométrica. O resultado da caracterização serviu então de base para a elaboração do modelo energético do circuito no simulador *JkSimMet*.

2.1. Método

O processo de britagem pode ser descrito como uma sequência de fenômenos de classificação seguido por eventos de cominuição. Inicialmente, todo fragmento é classificado (selecionado) dentro da câmara interna de um britador. As frações muito

finas serão descarregadas diretamente, não sofrendo cominuição alguma. Fragmentos maiores serão quebrados e o produto será classificado, tornando a ser quebrado, de modo contínuo, até que seja descarregado pela abertura inferior do equipamento.

O modelo do misturador perfeito (*Perfect Mixing Model*) representa o processo de britagem, por meio de equações relativas às funções seleção e quebra, para a condição de equilíbrio. A Figura 1 apresenta, em forma de diagrama, as interações acima descritas.

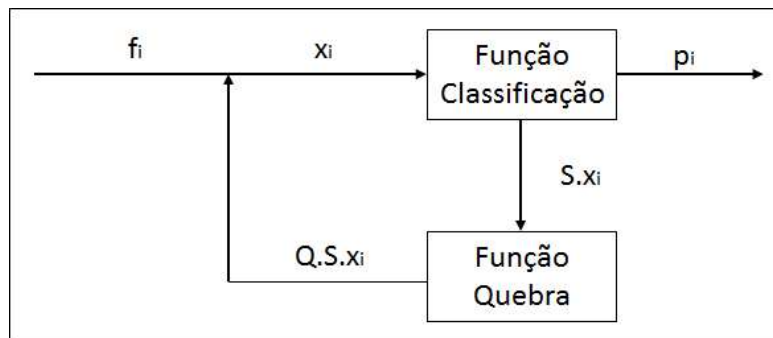


Figura 1. Representação esquemática modelo Whiten-Andersen
Fonte: Adaptado de NAPIER-MUNN e, al.,1996

O balanço de massas do fluxo acima é quantificado da seguinte forma:

$$x_i = f_i + Q.S.x_i \quad (1)$$

e

$$x_i = p_i + S.x_i \quad (2)$$

Onde,

x_i = matriz que representa a massa de cada fração granulométrica no interior da câmara do britador;

f_i = matriz que representa a distribuição granulométrica da alimentação do britador;

p_i = matriz que representa a distribuição granulométrica do produto do britador;

S = função seleção, matriz diagonal que contém a proporção de cada fração granulométrica que será cominuída;

Q = função quebra, matriz triangular contendo a distribuição granulométrica de cada fração granulométrica após um evento de cominuição;

Combinando-se as equações (1) e (2) e considerando I como sendo a matriz identidade, chega-se ao modelo de Whiten-Andersen para a operação de britadores, cuja relação principal é a que segue (Whiten e White, 1979):

$$p_i = (I - S). (I - Q.S)^{-1}.f_i \quad (3)$$

A representação matricial do modelo é bastante conveniente, uma vez que os fluxos de entrada e saída dos equipamentos são expressos em forma vetorial e as propriedades do material e do equipamento definidas em função dos tamanhos médios de cada intervalo granulométrico.

A fragmentação em britadores é, convenientemente representada por meio do parâmetro t_{10} , sendo que este é determinado por meio do ensaio DWT, que visa determinar os parâmetros descritivos da função paramétrica entre a energia aplicada e a fragmentação resultante (Bergerman, 2009), mostrada a seguir na equação (4) (Napier-Munn, 1996).

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) \quad (4)$$

Onde,

t_{10} = Porcentagem passante na malha igual a 10% do tamanho original do fragmento;

E_{cs} = Energia específica aplicada ao fragmento de minério (kWh/t);

A, b = Parâmetros dependentes da resistência à fragmentação do minério (determinados pelo ensaio DWT).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios de caracterização tecnológica já mencionados, foi possível a obtenção de um caso base. A partir de tal, foram realizadas simulações do aumento de rotação do moinho de martelos, através de regressão da equação (4), relacionando a fragmentação ao aumento de energia específica de impacto causada pelo aumento da velocidade de rotação dos martelos.

3.1. Caso Base

A Tabela 1, a seguir, apresenta as principais dimensões e condições operacionais dos equipamentos do circuito de britagem obtidos para o Caso Base.

Tabela 1. Dimensões e condições operacionais dos equipamentos do circuito de britagem

Britador Secundário		Parâmetros	Peneira
Fabricante	Faço	Fabricante	Faço
Modelo	Mandíbula - 8050	Modelo	N.I.*
APF (mm)	88,9	Largura (m)	1,86
Britador Secundário		Comprimento (m)	4,30
Fabricante	Faço	Abertura do Primeiro Deck (mm)	25,4
Modelo	Martelo - 75100	Formato da Abertura do Primeiro Deck	Quadrado
Abertura da Grelha (mm)	N.I.* (5 - 15)	Abertura do Segundo Deck (mm)	19,1
Rotação (rpm)	890	Formato da Abertura do Segundo Deck	Quadrado
Número de Martelos	N.I.* (2 ou 4)	*N.I.: Não informado	

A Figura 2, a seguir, apresenta o fluxograma e o sumário do balanço de massas global obtido no estabelecimento do Caso Base para o circuito de britagem.

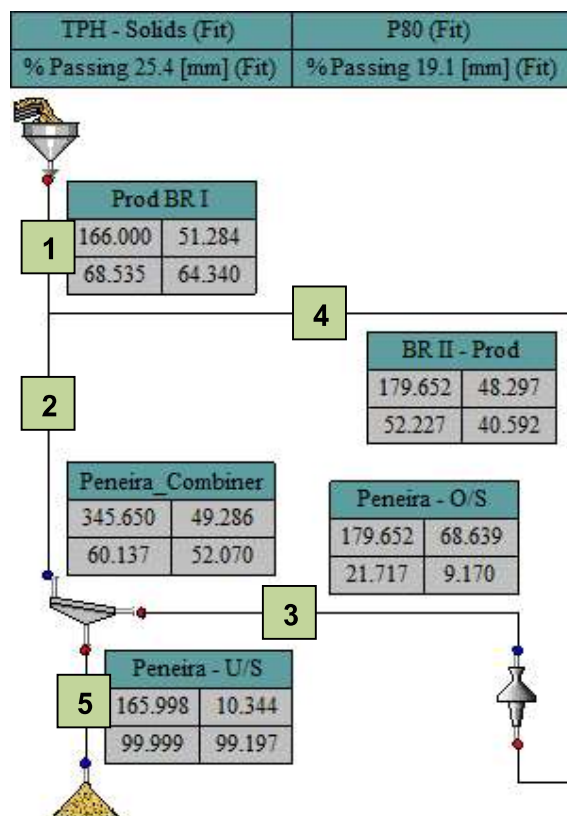


Figura 2. Fluxograma de processo do circuito de britagem – Caso Base.

Destacam-se também na Figura 2 os pontos de amostragem selecionados para o estudo:

1. Produto da britagem primária;
2. Alimentação da peneira;
3. *Oversize* combinado da peneira;
4. Produto do moinho de martelos;
5. *Undersize* da peneira;

A amostragem do circuito foi realizada através de parada total da usina, com a coleta de aproximadamente 200 kg de amostra por ponto. Através desta amostragem, foi possível realizar a caracterização tecnológica do minério e o cálculo de índices de desempenho referentes à britagem, conforme exposto na Tabela 2.

Tabela 2. Desempenho do circuito de britagem – Caso Base.

Variáveis	Circuito de Britagem
Vazão de Sólidos Nova (t/h)	166
Vazão de Sólidos BR II (t/h)	185
F ₈₀ (mm) - Prod BR I	56.8
F ₈₀ (mm) - BR II	75.7
P ₈₀ (mm) - Undersize Peneira	10.3
P ₈₀ (mm) - BR II	44.3
Relação de Redução - Circuito	5.5
Relação de Redução - Britador	1.7
Carga Circulante (%)	112
WI (kWh/t)	9.3
AI	0.092

A partir dos ensaios de DWT, foi obtida a curva de fragmentação do minério estudado (curva t_{10} vs E_{cs}) conforme pode-se observar na Figura 3.

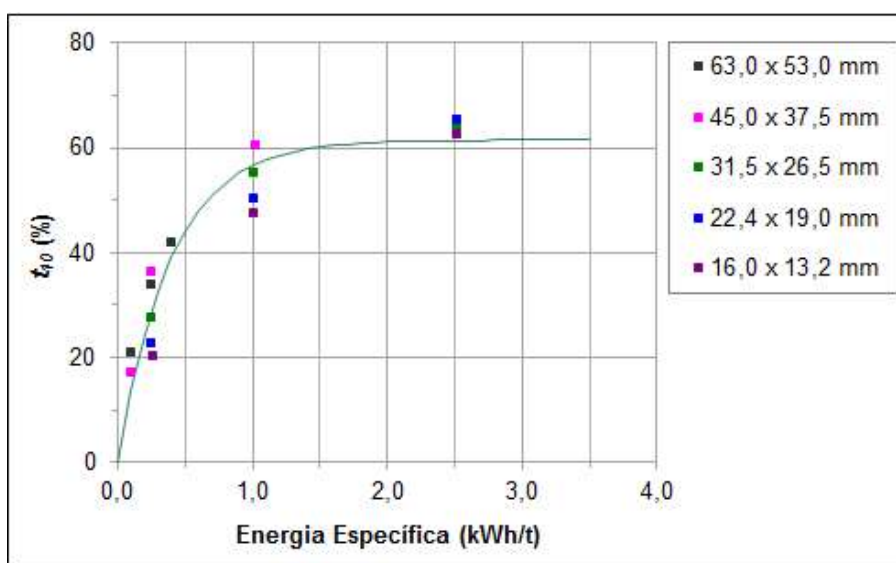


Figura 3. Curva t_{10} vs energia específica

3.2. Simulações

A partir das seguintes premissas, foi desenvolvido o modelo proposto no presente estudo:

- O caso base simulado apresentou um valor de t_{10} igual a 5,851.
- Observa-se um comportamento linear da relação t_{10} vs E_{cs} para valores de t_{10} variando entre 0 e 40 (Figura 3).
- Um aumento na velocidade de rotação dos martelos implica em um aumento na energia cinética dos mesmos.

Propõe-se então a seguinte relação para o moinho de martelos:

$$E_{CSsim} = E_{CSasobase} * (n_{sim}/n_{casobase}) * 0,9 \quad (5)$$

Onde,

n_{sim}	=	rotação simulada (rpm)
$n_{casobase}$	=	rotação do Caso Base (rpm)
0,9	=	fator adotado para eventuais perdas do processo

A partir do novo valor de E_{CS} , obteve-se um novo valor de t_{10} e foi realizada a simulação do desempenho do circuito no simulador *JkSimMet*, utilizando o modelo proposto por Whiten-Andersen descrito na seção 2. Este processo foi realizado para rotações variando de 1000 a 1600 rpm, com intervalo de 100 rpm entre cada simulação. Os valores utilizados para as simulações podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Cenários Simulados

Cenário	Rotação (rpm)	Multiplicador de E_{CS}	E_{CS}	t_{10}
Caso Base	900	-	0.0395	5.851
Cenário I	1000	1.235	0.0478	7.013201
Cenário II	1100	1.494	0.0571	8.269525
Cenário III	1200	1.778	0.0672	9.612293
Cenário IV	1300	2.086	0.0781	11.03344
Cenário V	1400	2.420	0.0900	12.5246
Cenário VI	1500	2.778	0.1027	14.07719
Cenário VII	1600	3.160	0.1163	15.68247

Os resultados obtidos nas simulações podem ser observados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Sumário de resultados dos cenários simulados para aumento de capacidade do circuito de britagem

Cenários	Rotação do moinho de martelos* (rpm)	Vazão de alimentação nova de sólidos - base seca (t/h)	Carga circulante (%)	Vazão de alimentação de sólidos do britador de martelos - base seca (t/h)	Vazão de alimentação de sólidos da peneira - base seca (t/h)	Eficiência de peneiramento em 19,1 mm (%)	Alimentação do britador de martelos		Produto do britador de martelos		Relação de redução do britador de martelos	P ₈₀ do produto final (mm)
							F ₈₀ (mm)	% Passante em 19,1 mm	P ₈₀ (mm)	% Passante em 19,1 mm		
Caso Base	900	166	108	180	346	91	68,6	9,17	48,3	40,6	1,4	10,3
Cenário I	1000	178	101	180	358	91	69,0	10,9	46,5	44,6	1,5	10,0
Cenário II	1100	188	96	180	368	90	69,2	12,7	44,6	48,3	1,6	9,76
Cenário III	1200	197	91	180	377	89	69,4	14,6	42,7	51,9	1,6	9,51
Cenário IV	1300	205	88	180	385	88	69,5	16,4	40,9	55,1	1,7	9,19
Cenário V	1400	210	86	180	390	87	69,5	18,2	39,0	58,1	1,8	8,90
Cenário VI	1500	215	84	180	395	86	69,5	19,9	37,3	60,7	1,9	8,62
Cenário VII	1600	218	83	180	398	86	69,4	21,6	35,6	63,1	1,9	8,38

*Conforme manual do fabricante "Manual de Britagem Metso - 5ª Edição 2005" o intervalo de rotação do moinho de martelos 75100 HD é de 900 a 1600 rpm

Para avaliar o desempenho da etapa de peneiramento foi calculada a eficiência da mesma segundo a equação (5) a seguir.

$$\varepsilon_{\text{Peneiramento}} = 100 \times \left(\frac{Q_{US} \times \%P_{US, \text{Abertura}}}{\text{Abertura}} \right)$$

Onde Q_{US} e Q_{Alim} são as vazões de undersize e alimentação, respectivamente, e %P_{USabertura} é a porcentagem passante do undersize na malha de abertura e %P_{AlimAbertura} é a porcentagem passante da alimentação na malha de abertura.

Os resultados dos cenários simulados apresentados na Tabela 4 indicam que o circuito de britagem tem oportunidade de aumento da capacidade produtiva mediante o aumento da rotação do moinho de martelos. O aumento da rotação de 900 rpm (mínima do equipamento) para 1.600 rpm (máxima do equipamento) promove o aumento da produção de 166 t/h para 218 t/h – base seca (aumento de 31%).

4. CONCLUSÕES

Verifica-se que o aumento da rotação do moinho de martelos promove uma maior fragmentação do material processado, como resultado há uma redução da carga circulante e, portanto, oportunidade do aumento da vazão de alimentação nova de sólidos.

É importante destacar que com a maior rotação do moinho de martelos e, por conseguinte, maior fragmentação do material processado, o produto final britado (undersize da peneira) torna-se mais fino, como pode ser observado na última coluna da Tabela 4. Em vista disto deve-se considerar o impacto que uma maior quantidade de finos acarretará nos processos subsequentes de aglomeração e lixiviação em pilha.

Observa-se como possibilidade futura de estudo a determinação da faixa de variação de rotação onde o modelo proposto é válido. Estudos futuros incluindo ensaios de bancada em moinho de martelo laboratorial são planejados para a validação da robustez do modelo.

Destaca-se que a validação final dos resultados simulados depende de uma implementação da solução proposta na usina ou da validação do modelo através dos testes de laboratório citados.

5. REFERÊNCIAS

BERGERMAN, M. G. Modelagem e Simulação do Circuito de Moagem de Sossego. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. 207 p.

COHEN, H. E. Energy Usage In Mineral Processing. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C, London, 1983. v. 92, p. 160-163.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. Mineral Comminution Circuits: their operation and optimization. Queensland (JKMRC), 1996. 413 p.

WHITEN, W.J., WHITE, M.E., Modeling And Simulation Of High Tonnage Crushing Plants. In: Proceedings of the 12th International Mineral Processing Congress, Sao Paulo, Brasil, 1979. p. 148–158.