

AVALIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE CORPOS MOEDORES NA USINA DA JACOBINA MINERAÇÃO E COMÉRCIO

DE JESUS, E.B.¹, DE ANDRADE LIMA, L.R.P.², ALVES JUNIOR, E.A.³

¹Universidade Federal da Bahia. E-mail: ebjesus@ufba.br

²Universidade Federal da Bahia. E-mail: lelo@ufba.br

³Yamana Gold. E-mail: edvaldo.junior@yamana.com

RESUMO

A moagem da planta de beneficiamento da Jacobina Mineração e Comércio foi avaliada neste estudo. Através de campanhas de amostragem das bolas no interior dos moinhos foi possível verificar o comportamento da curva de distribuição granulométrica da carga de bolas em relação à distribuição de referência de Bond. Foi constatado, para ambos os moinhos, que as distribuições apresentam predominância de bolas com diâmetro médio inferior a 45,94 mm. Foi verificado que a taxa de desgaste dos corpos moedores de uma liga especial (com 16,66%Cr, 0,41%Mn, 0,13%Ni e 0,05%V), nos moinhos industriais é de 2,73 kg/t, o que é superior a taxa de consumo ou reposição de corpos moedores praticados na planta quando opera com bolas com composição convencional.

PALAVRAS-CHAVE: moagem; moinho de bolas; consumo de bolas; minério de ouro.

ABSTRACT

The grinding mill of the Jacobina Mineração e Comércio plant was evaluated. Sampling campaigns were performed to collect balls inside the two ball mills and the size distribution of the balls were measured and related with the equilibrium distribution suggested by Bond. It was found that the both ball mills three was a prevalence of balls smaller than 45.94 mm. It was also found that for balls of a special alloy (composed by 16.66%Cr, 0.41%Mn, 0.13%Ni e 0.05%V) the consumption rate was 2.73 kg/t, which is higher that the conventional balls already in use in the plant.

KEYWORDS: grinding; ball mill; ball wear; gold ore.

1. INTRODUÇÃO

Os custos das operações mineiras podem ser divididos entre extração, cominuição e separação. Os processos de cominuição representam uma importante parcela do custo total de uma usina e pode ser dividido entre custos energéticos e custos com desgaste de revestimentos e corpos moedores (Radziszewski, 2000). O consumo de metais na usina de beneficiamento da Jacobina Mineração e Comércio corresponde a 50% dos custos operacionais, dos quais, 70% estão relacionados ao consumo de corpos moedores. Neste trabalho foi feita uma avaliação do consumo de bolas que estavam sendo considerada para substituir as bolas convencionais e da distribuição do tamanho das bolas encontradas neste circuito.

A planta de beneficiamento da Jacobina Mineração e Comércio tem dois circuitos fechados de moagem classificação que trabalham em paralelo, como mostra a Figura 1. O moinho 1 tem 3,81 m de diâmetro por 6,71 m de comprimento, é acionado por um motor de 1342 kW, apresenta capacidade de produção de 2400 t/dia e usa uma carga de bolas estimada em 100 toneladas. O moinho 2 tem 4,88 m de diâmetro por 9,14 m de comprimento, é acionado por dois motores de 1.342 kW cada, apresenta capacidade de produção de 5040 t/dia e usa uma carga de bolas estimada em 210 toneladas. Os moinhos são alimentados por um minério predominantemente composto por quartzito com F_{80} de 12,5 mm. O *work-index* operacional de circuito é de 13 kW/t. Os moinhos operam com grau de enchimento aproximado de 30% e 75% da velocidade crítica. O objetivo do circuito de moagem é reduzir o tamanho do minério até um P_{80} abaixo de 0,105 mm.



Figura 1. Circuito de moagem da JMC mostrando os moinhos 1 (direita) e 2 (esquerda).

O desgaste dos corpos moedores é influenciado por uma série de parâmetros operacionais, pelas características físicas do minério e pelas características metalúrgicas dos corpos moedores. A redução do consumo específico de corpos moedores e o aumento da capacidade de moagem estão

diretamente relacionadas com a manutenção do equilíbrio da carga de bolas. A estratégia de reposição de corpos moedores mais utilizada atualmente nas usinas de beneficiamento de minérios é a do mono-tamanho. Bolas de único tamanho são adicionadas a uma taxa constante de reposição em função de parâmetros operacionais tais como tempo de moagem ou massa de minério processado. Às vezes, porém, são utilizadas bolas de reposição de dois ou mais diâmetros (Beraldo, 1987).

Segundo Reis *et al.* (1984) quando um moinho funciona um determinado tempo com uma dada reposição de bolas, mantendo-se normal o tamanho de corpos moedores na saída do moinho, ocorre um equilíbrio na distribuição granulométrica da carga dos corpos o qual continua indefinidamente. Nesta situação, a distribuição da carga de bolas segue a distribuição de referência sugerida por Bond. A Equação 1 descreve a relação entre a frequência acumulada passante F e o diâmetro dos corpos moedores (D), onde D_{Max} é o maior tamanho das bolas de reposição (Austin e Klimpel, 1985).

$$F = \left(\frac{D}{D_{Max}} \right)^{3,8} \quad (1)$$

Uma abordagem complementar à manutenção da carga de equilíbrio é a verificação da cinética de desaparecimento dos corpos moedores. O estudo cinético pode ser realizado em escala laboratorial ou escala industrial através de ensaios com bolas marcadas. Um modelo simplificado, mas aceito para caracterizar a cinética de consumo de corpos moedores em moinhos rotativos é a lei do desgaste linear, segundo a qual a taxa ou a velocidade de consumo do corpo moedor é diretamente proporcional à sua área superficial exposta aos diversos mecanismos de desgaste Equação 2 (Cassola *et al.*, 2006; Austin e Klimpel, 1985).

$$\frac{dm_b}{dt} = -k_m A_b \quad (2)$$

Onde, m_b é a massa da bola em g, k_m é a constante de desgaste de massa em g/(h mm²) e A_b é a área superficial das bolas em mm².

A simplificação da equação 2 para o caso da esfera permite obter a Equação 3, que dá a redução do diâmetro das bolas com o tempo, no caso de desgaste linear. Nota-se que neste caso um filme de igual espessura desgasta em igual tempo em todas as bolas no interior do moinho, desde que as mesmas guardem a característica esférica inicial.

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{3k_m}{\rho} = -k_d \quad (3)$$

Onde, D é o diâmetro da bola em mm, ρ é a massa específica das bolas e k_d é a constante de desgaste em mm/h.

2. METODOLOGIA

2.1. Verificação da carga de equilíbrio

A avaliação da distribuição da carga de bolas dos moinhos foi realizada, através de uma campanha de amostragem de bolas no interior dos mesmos. Para auxiliar a retirada e evitar a descaracterização

da amostra, foi utilizado um gabarito na forma cilíndrica com 570 mm de diâmetro que foi posicionado no local da amostragem. Este gabarito direcionava a retirada das bolas localizadas em seu interior (Figura 2a). As amostras foram recolhidas na linha do eixo central, ao longo do comprimento, em dois pontos do moinho 1 e três pontos do moinho 2.

As bolas foram submetidas à classificação por tamanho ao longo de 8 classes mediante a utilização de um gabarito confeccionado para este fim (Figura 2b). Os intervalos de classe foram definidos como a metade da diferença de dois diâmetros comerciais consecutivos apresentando amplitude de 6,35 mm. O limite inferior da primeira classe foi definido como o diâmetro teórico de reposição da maior bola fornecida pelo fabricante 73,60 mm, e o diâmetro superior da última classe 38,1 mm, tamanho a partir do qual o número de bolas defeituosas predomina em relação às bolas com formato esférico original.

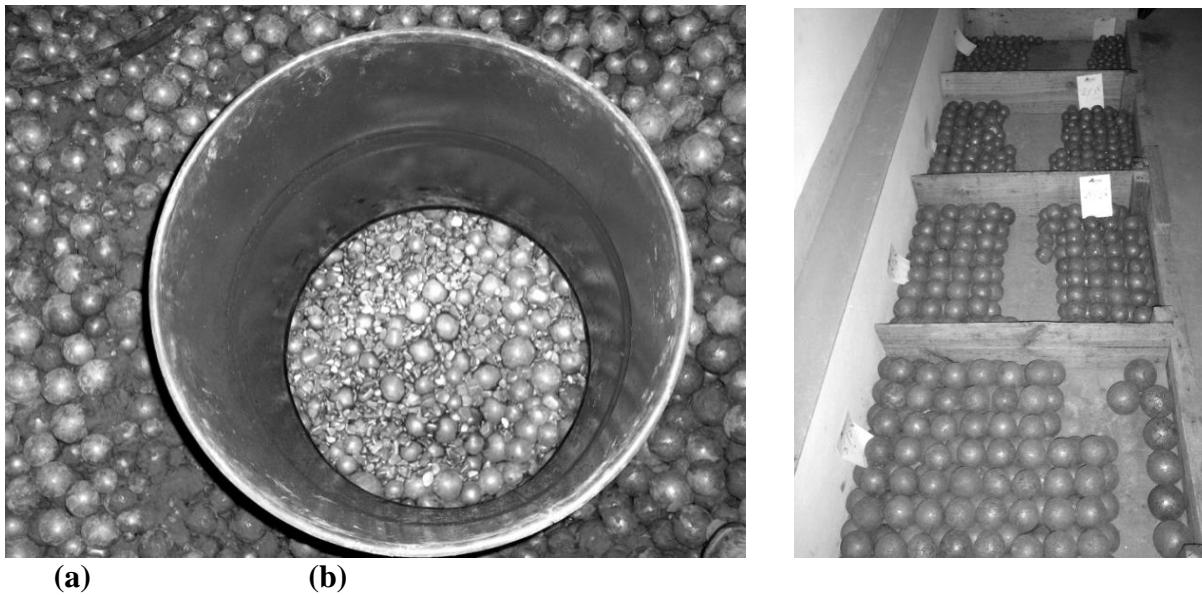


Figura 2. Procedimento de amostragem (a) e de classificação por tamanho (b) dos corpos moedores.

2.2. Taxa de desgaste de corpos moedores

A taxa de desgaste de uma amostra de bolas de liga especial que estava sendo considerada para repor as bolas originais foi avaliada através de ensaio industrial com bolas marcadas. O ensaio consistiu da introdução simultânea de 270 bolas, no moinho do circuito 1, com dois furos perpendiculares de 4 mm de diâmetro e 15 mm de profundidade. As bolas foram previamente pesadas e seu diâmetro calculado mediante a utilização da massa específica fornecida pelo fabricante. Durante o período de realização do ensaio, parâmetros operacionais como, quantidade de minério processado, energia fornecida e tempo de funcionamento do moinho foram monitorados.

As bolas de liga especial utilizadas no ensaio foram submetidas à análise para a determinação dos componentes principais da liga através da fluorescência de raios-X. O mesmo procedimento de análise foi empregado para a identificação da composição da liga das bolas originalmente utilizadas na usina.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Verificação da carga de equilíbrio

A quantidade de bolas obtidas na campanha de amostragem dos moinhos bem como os valores das frequências simples em massa, para cada faixa de tamanho, está apresentada na Tabela I. Para fins de cálculo da frequência simples de cada classe, em relação à massa total, o diâmetro de cada bola foi elevado ao cubo, uma vez que sua massa é proporcional à terceira potência do diâmetro. Dividiu-se então a somatória dos cubos dos diâmetros de cada classe pela somatória dos cubos de todos os diâmetros, obtendo-se a frequência simples de cada classe.

Tabela I. Distribuição da carga de bolas nos moinhos 1 e 2.

Limite de Classe (mm)		Moinho 1		Moinho 2	
Superior	Inferior	n_0	f_i	n_0	f_i
76,20	69,85	116	34,70	121	33,38
69,85	63,50	80	18,22	97	20,37
63,50	57,15	86	14,50	72	11,20
57,15	50,80	105	12,68	117	13,03
50,80	44,45	134	11,12	145	11,10
44,45	38,10	120	6,48	109	5,43
38,10	-	70	2,29	182	5,49
Total		711	100	843	100

A Figura 3 apresenta a curva de distribuição real e os pontos relativos à distribuição da carga de bolas dos moinhos. Para a construção das curvas não foram utilizados os dados da última classe em virtude das excessivas deformações observadas.

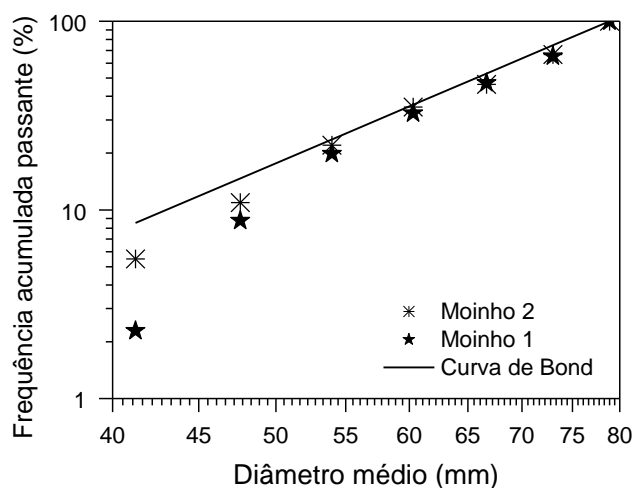


Figura 3. Distribuição da carga de bolas.

No momento da amostragem, a distribuição da carga de bolas de ambos os moinhos encontravam-se distorcida em relação à distribuição de referência, sugerida por Bond, com pior situação observada no moinho 1. Os pontos da distribuição da carga dos moinhos estão deslocados para a direita, abaixo da curva teórica, indicando que a taxa de reposição das bolas é superior a sua taxa de desgaste. Portanto, a continuidade da reposição das bolas nesta taxa atual, afastará ainda mais as distribuições das cargas de bolas à curva padrão. Constata-se ainda, em ambos os gráficos, que há uma maior participação de bolas nas faixas com diâmetro médio menores. Esta observação é

justificada pela estratégia de reposição de bolas, do período anterior a realização da campanha, que utilizava dois tamanhos de bolas na reposição 78,90 mm e 50,80 mm o que proporciona um aumento da quantidade de bolas abaixo de 50,80 mm. Nota-se que o ajuste da curva real à teórica pode ser obtido com a interrupção das reposições das bolas de diâmetro 50,80 mm. A quantidade excedente de bolas abaixo deste diâmetro seria reduzida gradativamente. Ao atingir o equilíbrio da carga de bolas, devem-se iniciar sistemáticas reposições à taxa constante, que a princípio deve ser igual à média da taxa de reposição dos últimos meses.

Tabela II. Parâmetros operacionais do ensaio com bolas marcadas.

Tempo de operação efetivo	264,9 h
Massa de minério processada	24018,9 t
Massa específica das bolas	7,54 t/m ³
Diâmetro das bolas antes do ensaio	74,00 mm
Massa da bola antes do ensaio	1600 g
Diâmetro das bolas depois do ensaio	63,80 mm
Massa da bola depois do ensaio	1025,45 g
Energia utilizada pelo moinho durante o ensaio	298,3939 MWh

3.2. Taxa de desgaste de corpos moedores

O ensaio com bolas marcadas foi realizado no moinho do circuito 1, de menor capacidade de produção e menores dimensões. A decisão de utilizar o referido moinho para a realização do ensaio está associada ao aumento da probabilidade de recuperação das bolas no interior do mesmo. A Tabela II apresenta as condições operacionais do circuito de moagem durante o ensaio e as características físicas das bolas utilizadas no ensaio.

Após a parada do moinho onze bolas marcadas foram recuperadas. A Figura 4 apresenta, em detalhe, as bolas antes e depois do ensaio. Assumindo desgaste linear das bolas, a relação entre a redução do diâmetro das bolas com o tempo de operação efetivo do moinho ou com a massa de minério processado ou ainda a relação da perda de massa das bolas com a potência empregada ao moinho, é linear, de modo que existe uma constante cinética que relaciona essas grandezas. As constantes cinéticas encontradas para as bolas ensaiadas são: $k_d = 0,0385$ mm/h, $k_t = 0,0004$ mm/t, $k_e = 0,0019$ g/kWh.

A transformação das constantes cinéticas, obtidas do ensaio com bolas marcadas, em valores práticos operacionais ou indicadores operacionais é possível a partir dos valores observados durante a realização do ensaio e das condições de moagem. Assim o consumo em massa dos corpos moedores pela energia fornecida durante o ensaio foi calculado em 219 g/kWh e o consumo em massa dos corpos moedores por tonelada de minério processado foi de 2,73 kg/t. Este valor é superior a taxa de reposição praticada na usina de 1,94 kg/t de minério processado, quando as bolas originais são usadas.



Figura 4. Comparação das bolas antes e depois da moagem.

A análise das bolas originalmente usadas na usina e das bolas utilizadas no ensaio é apresentada na Tabela III. Nota-se uma diferença considerável nas composições. As bolas ensaiadas apresentam maior quantidade de cromo, vanádio e zinco enquanto que as bolas originalmente utilizadas apresentam maior quantidade de manganês, níquel, cobre e molibdênio. Em geral, a presença de cromo na liga de aços aumenta, gradativamente, a resistência a corrosão. No entanto, a elevada presença de cromo na composição da liga das bolas ensaiada não diminuiu o desgaste das mesmas. Isto indica que o elevado desgaste de corpos moedores, no presente caso, não é devido à corrosão, mas sim abrasão.

Tabela III. Análise química da liga dos corpos moedores.

	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	V	Zn	Mo
Bolas originais (%)	97,48	1,18	0,673	0,19	0,293	-	-	0,03
Bolas de liga especial (%)	82,38	16,66	0,415	0,135	0,061	0,047	0,03	-

4. CONCLUSÕES

A amostragem realizada nos moinhos da Jacobina Mineração e Comércio revelou que as distribuições das cargas de bolas se encontravam afastada da distribuição de referência sugerida por Bond. As curvas, que representam as distribuições, se encontram à direita e abaixo da curva padrão, indicando que a taxa de reposição atual é maior que a taxa de desgaste dos corpos moedores. A estratégia de reposição adotada com dois tamanhos de bolas provocou o afastamento da carga de equilíbrio elevando a quantidade de bolas abaixo de 50,80 mm.

O ensaio com bolas marcadas de uma liga especial (com 16,66%Cr, 0,41%Mn, 0,13%Ni, 0,05%V) indicou que a taxa de redução do diâmetro das bolas com o tempo de operação do moinho (k_d) é de 0,0385 mm/h, a taxa redução do diâmetro com a massa de minério processado (k_t) é de 0,000426 mm/t, e que a taxa da perda de massa das bolas com a potência empregada ao moinho (k_e) é de 0,0019 g/kWh. O consumo específico em massa dos corpos moedores por tonelada de minério processado foi de 2,73 kg/t, que é significativamente superior à taxa de reposição praticada na usina que é de 1,94 kg/t de minério processado.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Jacobina Mineração e Comércio no desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

AUSTIN, L.G, KLIMPEL, R.R., Ball wear and ball size distribution in tumbling ball mills, *Powder Technology*, 41, 279-286, 1985.

BERALDO, J.L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares, 1º ed, São Paulo, Edgard Blucher LTDA. 1987.

CASSOLA, M.S., MORAES, S.L., ALBERTIN, E. Desgaste na mineração: O caso dos corpos moedores. *Revista Escola de Minas*, 59:2, p.173-178, 2006.

RADZISZEWSKI, P. Developing an Experimental Procedure for Charge Media Wear Prediction. *Minerals Engineering*, 13, p.949 – 961, 2000.

REIS, J.P., VIANNA, M.T., COSTA, L.S., SACHS, P.F.T. Redução de Consumo Específico de Corpos Moedores. In: X Encontro nacional de tratamento de minérios e hidrometalurgia, Belo Horizonte, 1984.