

AVALIAÇÃO PRÉVIA DE DESEMPENHO E QUALIDADE DE CORPOS MOEDORES ATRAVÉS DE AMOSTRAS MARCADAS.

A.L. Nunes¹, A.J. Rodrigues¹, E. Souza¹, J.C.Silva¹, L.A. Barros¹
1 – ULTRAFERTIL – Fazenda Chapadão, s/nº – Zona Rural - CEP 75701-970 - Catalão - GO
E-mail: andreianunes@fosfertil-ultrafertil.com.br

RESUMO

Este trabalho enfoca o circuito de moagem como uma das etapas primordiais para busca de melhoria contínua no processo de beneficiamento industrial de minério fosfatado do Complexo Mineral-Químico de Catalão - GO

Desta forma, buscou-se a otimização, utilizando metodologia para aplicação de desempenho de corpos moedores, através de amostras marcadas, obtendo-se resultados e informações primordiais para determinar a escolha adequada de um fornecimento ou mesmo a correção de desvios.

1. INTRODUÇÃO

A moagem é uma etapa de significativa importância no beneficiamento de minérios, tanto em seus aspectos técnicos quanto econômicos.

Basicamente, os custos operacionais de moagem se distribuem em gastos com energia, corpos moedores e revestimentos que, na maioria dos casos, respondem pela maior parcela na composição do custo final de uma usina de beneficiamento mineral.

Qualquer esforço no sentido de redução de custos nesta etapa passa necessariamente pela otimização de corpos moedores através da melhoria de sua qualidade.

Em qualquer hipótese, se faz necessária uma avaliação prévia do corpo moedor antes de sua utilização industrial onde possam ser analisados o consumo, deformações geométricas, índice de quebras, problemas de fabricação, etc.

Em busca de melhoria contínua no processo de beneficiamento, aplicamos metodologia referente à análise de qualidade de corpos moedores, através de amostras marcadas, para realização de avaliação prévia de desempenho e qualidade das amostras utilizadas e em fase de avaliação na Ultrafertil S.A.

2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE CORPOS MOEDORES

O processo de moagem é uma operação de tal complexidade que as leis que tentam explicá-lo estão baseadas em correlações empíricas. Sem dúvida a similaridade existente entre o processo de moagem e os processos unitários em geral é que torna possível dar um tratamento matemático que nos permite determinar algumas das variáveis do referido processo. Segundo Carrión (1980) as leis empíricas aplicadas, com sucesso, permitem descrever o desgaste dos corpos moedores dentro deste processo.

Assim, testes para avaliação de corpos moedores devem ser realizados preferencialmente onde seja possível reproduzir as condições normais de moagem ou seja, no moinho industrial, em sua operação normal.

As possibilidades existentes para este caso são descritas e avaliadas. A primeira seria a prova de produção em paralelo que se aplica muito bem onde exista circuitos em paralelo com condições idênticas de moagem induzindo a resultados mais próximos da realidade. Dentre os inconvenientes desta prova destacam-se sua onerosidade, manuseio de grandes massas podendo ocasionar, para resultados negativos, a elevados riscos operacionais.

A segunda possibilidade consiste na colocação, junto à carga moedora em uso, de um lote de amostras marcadas, em quantidade que não interfira na produção do moinho, as quais, são analisadas quanto ao desgaste através de remoção do moinho em sucessivos períodos de controle. Este tipo de prova fornece efetivamente as mesmas condições de moagem a todos os corpos moedores que participam da prova e por estarem dentro do mesmo moinho estão submetidos às mesmas

variáveis.

Outra possibilidade de efetuar esta prova é pondo dentro do moinho corpos moedores de diâmetro maior que o diâmetro da carga empregada que facilitará a busca das mesmas. Esta prática cria condições de comportamento diferenciado em relação aos diâmetros usuais podendo haver mascaramento dos resultados.

3. TEORIA DO DESGASTE

A perda de peso ou desgaste de uma amostra em uma unidade de tempo qualquer é proporcional ao diâmetro ao quadrado da amostra. Por isto com o propósito de determinar sua lei de desgaste é assumido que: o consumo de uma esfera ou seja, a redução de seu peso, devida ao desgaste, é sempre proporcional a sua superfície exposta, a qual, é traduzida pela equação (1):

$$\frac{d\theta}{dt} = K \quad (1)$$

sendo,

θ = diâmetro do corpo moedor

t = tempo de operação

k = constante de desgaste

A aplicabilidade e exatidão experimental desta teoria, levou Azzaroni (1987), a apresentar o seguinte corolário: “ a redução do diâmetro de uma amostra, devido ao desgaste, é constante e uniforme em relação ao tempo de operação ou à produção do moinho.”

Conforme Barros et. al. (1991), o conhecimento proveniente da lei de desgaste de um corpo moedor permite informações a respeito do dimensionamento de cargas moedoras, tempo requerido para a carga alcançar o equilíbrio e sua distribuição de tamanho de amostras, a taxa de consumo específico de amostras, avaliação e projeção de consumos e extrapolações para condições semelhantes.

4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A marcação dos corpos moedores deve ser realizada com cuidado especial evitando que ocorra micro-trincas, quebras e/ou defeitos estruturais ao longo dos ensaios. O lote de amostras deve apresentar uniformidade de tamanho uma vez que o teste reflete qualquer problema com as amostras.

Imediatamente após o recebimento das amostras devidamente marcadas e, identificadas realiza-se inspeção visual, obtenção do diâmetro inicial e peso do corpo moedor, análise metalográfica, química e ensaios mecânicos. Os resultados são submetidos a análises estatísticas, indicando o grau de homogeneidade das amostras.

O moinho é inspecionado e deve apresentar boa estabilidade nas suas condições gerais. A seguir todo o lote de amostras é colocado no moinho de uma única vez e, a partir daí acompanhado o desgaste através da pesagem de amostras colhidas em sucessivos períodos de controle atingindo um total para validação mínimo de 2500 horas de operação como citado por Maia (1994).

Nestas inspeções periódicas são avaliadas as condições do corpo moedor quanto à lascamentos, trincas, quebras e desgaste irregular .

Os diâmetros obtidos no teste são recalculados para o diâmetro máximo usado na reposição e através de regressão linear, obtida da evolução do diâmetro versus horas, assume-se a lei de desgaste e extrapola-se a reta encontrada para os demais diâmetros da carga moedora equilibrada (figura 1). A correção do gráfico através de uma reta única linear é necessária para obter um valor médio da constante K para todo o período de teste.

De acordo com a equação 2, calcula-se a carga de amostras que apresentará distribuição de tamanhos e dados, conforme tabela I.

$$y = \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{3,84} \quad (2)$$

Sendo,

y = % passante na malha

α = tamanho da amostra

β = diâmetro da maior amostra

Em situação de equilíbrio, no momento, a carga moedora evoluiu para a distribuição média apresentada na tabela I e, a qual foi utilizada na metodologia apresentando diâmetro de corte ou residual de 20 mm. No presente ensaio utilizamos a distribuição média atual, evolução, porém, não foram consideradas as recargas no período. Salienta-se que esta distribuição apresentada é a real nas condições de teste, não representando uma situação otimizada. Porém a distribuição a ser considerada deve ser a real encontrada, para que se tenha uma melhor condição de comparação dos resultados com os dados industriais.

Conhecida a variação superficial da carga moedora e sua distribuição, calcula-se a carga moedora residual existente, ou seja, a remanescente após o tempo de operação estipulado, ao final do teste, e a quantidade de metal consumido. Os consumos específicos são calculados em massa metálica por tonelada de minério moído (g/t) e por perda de área (mm/100h).

Tabela I – Distribuição de tamanhos

Diâmetro (mm)	Calculada		Evolução	
	% Bolas Retida	Carga (t)	% Bolas Retida	Carga (t)
50	17,88	32,90	9,95	18,30
45	28,55	52,52	28,39	52,24
40	20,44	37,52	37,47	68,95
35	14,01	25,77	18,27	33,62
30	9,06	16,66	5,77	10,62
25	10,07	18,53	0,15	0,27
Total		184 (t)		184 (t)

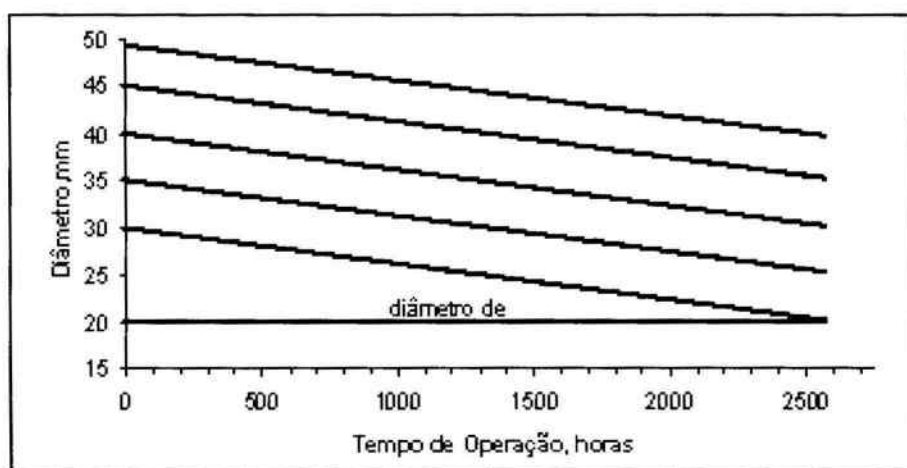


Figura 1 – Evolução dos diâmetros da carga moedora em função do tempo de operação

5. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Primeiramente salienta-se a confiabilidade dos testes permitindo a obtenção de resultados representativos referentes aos sete tipos de corpos moedores utilizados. Na Ultrafertil temos extrapolado a metodologia para barras com sucesso.

As amostras utilizadas foram identificadas como A, B, C, D, E e F – grupo dos ferro fundido alto cromo e amostra

G – grupo aço laminado. Os fornecedores e as denominações comerciais de cada liga foram preservados para evitar exploração comercial.

5.1. Efeito do Diâmetro

A partir dos dados obtidos no ensaio obtém-se as retas de desgaste das amostras testadas relacionando a redução do diâmetro com o tempo de operação, figura 2, considerando coeficientes de correlação superiores a 0,97 que são indicativos da performance do ensaio.

As retas de desgaste que apresentaram maiores declividades foram das amostras A e C evidenciando menor desgaste. A amostra E apresentou declividade inferior às demais amostras do ensaio, tendendo a maior desgaste.

Amostra A: $y = - 0,0038x + 49,42$

Amostra B: $y = - 0,0043x + 50,74$

Amostra C: $y = - 0,0036x + 50,49$

Amostra D: $y = - 0,0062x + 50,25$

Amostra E: $y = - 0,0078x + 49,99$

Amostra F: $y = - 0,0041x + 50,52$

Amostra G: $y = - 0,0054x + 50,13$

Sendo,

y = diâmetro

x = tempo de operação

R^2 = coeficiente de correlação

Através da extrapolação das retas de desgaste para os demais diâmetros da carga moedora equilibrada, calculou-se a carga residual e o consumo específico acumulado em massa metálica por tonelada de minério móido para cada amostra, com 2574 horas de operação, conforme tabela II.

Definiu-se um índice característico de perda de área, ao longo da operação para as amostras testadas, cujos valores encontram-se na tabela II. Os índices levantados ao final do período, indicaram tendência de desgaste para as amostras na mesma ordem que o desgaste apresentado em consumo específico em massa metálica por tonelada de minério móido.

Em análise visual, não foi detectado problema algum com as diversas amostras antes do teste.

Em termos dimensionais, as seis amostras fabricadas em ferro fundido alto cromo apresentaram baixos desvios de esfericidade inicial, indicando bom controle da moldagem durante a fabricação. Durante o controle dos testes, destacamos a amostra C que apresentou desvio padrão mais baixo em relação às demais e a amostra A que teve aumento acentuado no seu desvio padrão indicando maior variabilidade no controle de qualidade.

Como esperado, a amostra E, fabricada em aço laminado, durante o teste preserva sua esfericidade porém acentua o grau de porosidade induzindo a desgaste por abrasão e corrosão. Ressalta-se que a taxa de desgaste por corrosão é muito superior em relação à taxas obtidas com amostras de ferro fundido alto cromo.

Tabela II – Resultados de consumos das amostras

Diâmetro (mm)	Carga inicial (kg)	Carga residual (Kg)						
		A	B	C	D	E	F	G
50	18304	9527	8639	9894	5776	3923	8990	6889
45	52244	25047	22395	26151	14041	8873	23440	17246
40	68947	29731	26084	31262	14967	0	27516	19154
35	33619	12578	10745	13357	0	0	11461	7366
30	10619	3251	2668	3504	0	0	0	0
25	267	60	0	0	0	0	0	0
Consumo (g/t)		65,46	70,78	63,22	87,53	95,40	67,55	79,51
Consumo (mm/100h)		0,380	0,430	0,360	0,630	0,793	0,418	0,549
Desvio padrão inicial		0,008	0,061	0,017	0,015	0,006	0,017	0,017
Desvio padrão no ensaio		0,024	0,015	0,008	0,022	0,005	0,024	0,024

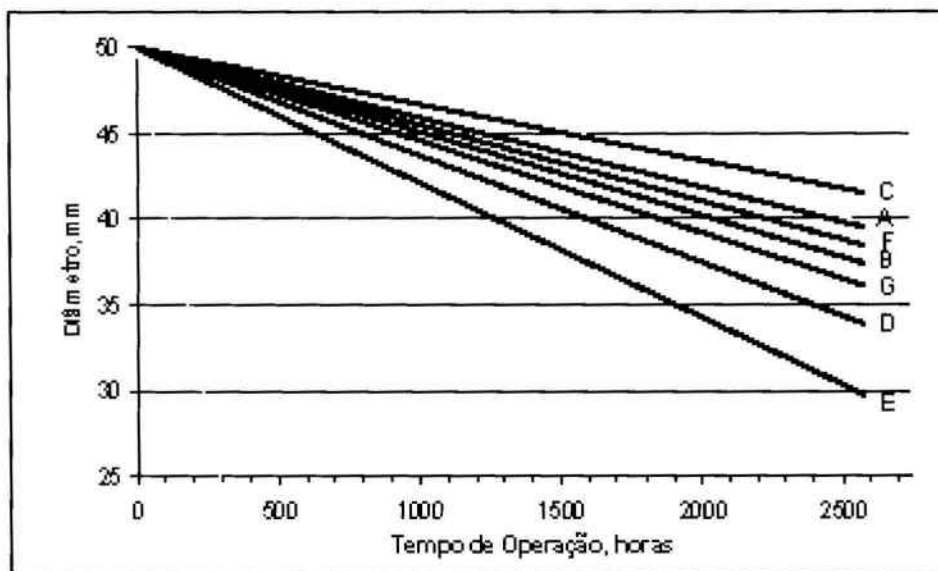


Figura 2 – Evolução do diâmetro em função do tempo de operação para as diversas amostras testadas

5.2. Efeito da composição química, metalográfica e dureza

De forma geral as análises metalográficas das amostras de ferro fundido alto cromo mostraram estrutura constituída de glóbulos de carbonetos e carbonetos maiores na forma de agulhas e poliedros, bem distribuídos em matriz martensítica. A amostra fabricada em aço laminado constitui-se predominantemente de martensita com poucas inclusões alongadas típicas de sulfetos e poucas trincas.

A tabela III mostra os principais elementos químicos, dureza superficial e de centro para os sete tipos de amostras testadas. Medições de dureza na superfície e no núcleo das amostras mostraram menor variação para a amostra C, este fato a diferencia das demais, cuja variação de dureza superfície/núcleo situa-se na faixa de 2 pontos HRc.

Quanto a composição química a experiência mostrou que a deficiência de cromo pode ser suprida em um corpo moedor, haja visto que a amostra C apresentou menor porcentual de cromo porém desempenho superior às demais. Salienta-se ainda que a amostra E não apresenta adição balanceada dos micro-elementos de liga, que visam redução do consumo. Nota-se que o teor de molibdênio é apenas residual, oriundo da matéria-prima utilizada.

As amostras C e D mostraram deficiências de tratamento térmico que além de alto consumo poderiam levar a desgaste irregular.

As figuras 3 e 4 apresentam uma micrografia típica, com ampliação de 190X, de duas bolas fabricadas respectivamente em ferro fundido alto cromo e aço laminado, semelhantes às utilizadas neste ensaio.

Tabela III – Composição química, dureza superficial e de núcleo

Elemento	Bolas						
	A	B	C	D	E	F	G
Carbono	2,89	2,73	2,64	3,36	0,59	2,47	2,44
Manganês	1,58	0,56	0,34	ND	1,00	0,23	0,21
Cromo	15,76	20,64	14,78	24,60	1,00	15,22	16,96
Molibdênio	0,245	0,033	0,018	ND	<0,015	0,011	0,011
Níobio	<0,005	<0,005	0,010	ND	<0,070	<0,004	<0,004
Dureza a Superfície	65	68	65	60	66	61	61
Dureza a Centro	63	66	66	62	60	63	58

ND = não determinado



Figura 3 – Micrografia típica de amostras fabricadas em ferro fundido alto cromo

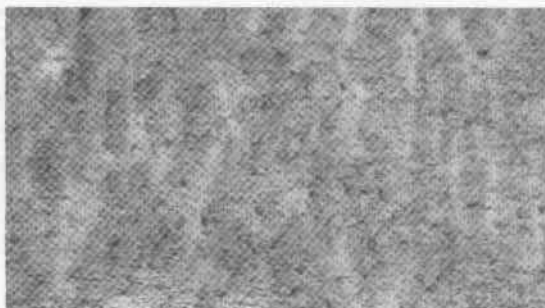


Figura 4 – Micrografia típica de amostras fabricadas em aço laminado

6. CONCLUSÕES

Pela experiência concluímos que o corpo moedor deve ter suas características físicas e químicas analisadas conjuntamente. Em se tratando de amostras fabricadas com ferro fundido alto cromo a relevância dada ao teor de cromo deve ser diretamente proporcional ao seu tratamento térmico.

Uma boa maneira de adquirir dados referentes ao controle do processo de fabricação consiste da verificação dimensional.

A caracterização química e física através de análises metalográficas, químicas, dureza e análises dimensionais em conjunto com os ensaios de amostras marcadas nas condições reais de operação completam a avaliação do corpo moedor possibilitando antever possíveis problemas de qualidade, reduzindo níveis de riscos operacionais e possibilitando aos fornecedores desenvolvimento de produtos de melhor qualidade.

Experiências industriais realizadas em outra unidade do grupo (Fosfertil-Ultrafertil) com as mesmas bolas do teste permitiram a obtenção de dados industriais que tem confirmado os resultados dos ensaios com bolas marcadas comprovando a aplicabilidade da metodologia e demonstrando a aderência da aplicação dos critérios com dados técnicos e econômicos significativos para nossa Empresa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azzaroni, E., Determinacion de la ley de desgaste y distribucion del tamaño de las amostras en los molinos de amostra, Symposium sobre molienda ARMCO CHILE S/A, Viña del mar, pp 146 – 160, 1980.
- Barros, L. A. F., Maia, G. S.; Souza, A. C.; Testes de avaliação de corpos moedores, II Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste, ABM/Un. Fed. de Uberlândia, 1991, pp 481 – 502.
- Carrión V. D., Determinacion de la ley de desgaste de las amostras para molienda através de la prueba de amostras marcadas, Viña del mar, pp 328-336, 1980.
- G. S. Maia, Avaliação da qualidade de corpos moedores para o minério fosfático de Tapira-MG, 1994.
- G. S. Maia; L. A. F. Barros e G. C. Correa, Testes de desempenho de corpos moedores através de amostras marcadas, Tecnologia Mineral, Parte A, pp 292 – 309, 1992.