

AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE DE CORPOS MOEDORES EM MOINHOS DE BOLAS¹

Eduardo Roveri²
Arthur Pinto Chaves²

Resumo

A moagem dos minérios é o componente de custo de produção mais importante na produção dos metais correspondentes, sendo o consumo do material metálico de corpos moedores e revestimentos parcela significativa. Este trabalho faz uma rápida revisão dos modelos mais aceitos para a previsão do desgaste metálico durante a moagem. Ressalta o fato de que, na realidade, o processo não é apenas mecânico, como a maioria das aproximações faz crer, mas também eletroquímico, uma vez que na polpa de moagem existem espécies iônicas capazes de acarretar a corrosão do metal e a ação conjunta de abrasão e corrosão tem efeito sinérgico de modo que a velocidade do processo conjunto é muito maior que a soma das duas velocidades individualizadas. Foi programada e executada uma série de ensaios de bancada, com dois concentrados de minério de ferro de diferentes teores de sílica, usando bolas marcadas, variando a composição do material das bolas e o pH da polpa de moagem. A análise foi realizada a partir do estudo da redução de diâmetro das bolas em função do tempo, obtendo-se como resultado uma taxa de desgaste média, por hora, para os dois tipos de bolas estudados. Os resultados permitem identificar claramente e quantificar as componentes de abrasão e corrosão sobre o resultado final.

Palavras-chave: Corpos moedores; Desgaste; Abrasão; Corrosão.

EVALUATION OF THE MECHANISMS OF CHARGE WEAR IN BALL MILLS

Abstract

The grinding of ores is an important cost item in the production of metals. Metal wear is a major part of it. This paper reviews the most accepted models for wear during grinding. This process, in fact, is not just a mechanical one as most of the models induce, but also electrochemical as in the slurry inside the mill there are ionic species able to carry out metal corrosion. The joint action of abrasion and corrosion has a synergetic effect and the rate of the joint process is greater than the sum of the rates of the two individual processes. A series of bench tests with two iron ore concentrates of different silica grades, using marked balls, varying metal composition and slurry pH was performed. Wear rates were calculated from diameter reduction as a function of time. Results make able to identify and measure the abrasion and corrosion components on the final result.

Key-words: Grinding balls; Wear; Abrasion; Corrosion.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo



1 INTRODUÇÃO

Em operações de beneficiamento de concentrados, a operação unitária de moagem pode chegar a representar 40% dos custos totais da operação, como com concentrados de cobre, por exemplo. Deste total, parte fundamental é constituída pelos custos envolvidos no desgaste da carga moedora.

Apesar da importante contribuição da componente abrasiva do desgaste, deve-se lembrar que toda polpa mineral tem íons em solução. Estes íons, dependendo de sua natureza, podem adicionar uma componente de desgaste corrosivo, que atua sinergeticamente com a componente abrasiva. A velocidade de desgaste do processo conjunto, corrosão + abrasão é muito maior que a soma das velocidades de desgaste por corrosão e por abrasão. Em especial, as águas brasileiras frequentemente são de caráter ácido, o que acaba valendo como regra para a região da Bacia Amazônica e para a região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

O presente trabalho teve como objetivo medir o desgaste de corpos moedores em um moinho de bancada, levando em consideração dois tipos de concentrado de minério de ferro e dois tipos de ligas de corpos moedores.

Siriani⁽¹⁾ comenta que a presença de minerais duros, como o quartzo, aumenta sobremaneira a dureza do material e lembra que este mineral, ao se romper com fratura concoidal, apresenta arestas vivas que causariam concentração de tensões localizadas em áreas muito pequenas. Desta forma, justifica sua maior penetrabilidade nos corpos moedores, riscando-os e abreviando sua vida útil.

Albertin⁽²⁾ descreve o mecanismo de desgaste como uma partícula suficientemente dura atacando uma superfície em um ângulo favorável e conseguindo atuar como uma ferramenta de corte, retirando “cavacos” (microcorte). Esta ação seria geralmente acompanhada por grande deformação plástica, observando-se acúmulo de material deslocado à frente do sulco e lateralmente, bem como deformação subsuperficial. Assim, passagens sucessivas de grãos abrasivos repetem ciclicamente estes deslocamentos, levando à remoção do material por fadiga de baixo ciclo, configurando um modelo da interação entre os grãos de quartzo e o material constituinte das bolas.

Chaves⁽³⁾ enumera diferentes mecanismos de desgaste abrasivo:

- desgaste por sulcamento: (*gouging abrasion*), que ocorre com partículas mais grosseiras que, quando impactam a superfície metálica de baixa dureza com velocidades médias a altas arrancam pedaços macroscópicos de metal (altas tensões e alto impacto). Ocorre um verdadeiro arrancamento de material da superfície. Depende evidentemente do tamanho da partícula, da sua forma e dureza e da dureza superficial da bola;
- riscamento e erosão, que ocorrem com partícula menores, cujo impacto sobre a superfície é menor (baixas tensões e baixo impacto). O movimento das partículas sobre e contra a superfície vai riscando-a, polindo-a e erodindo-a. Depende principalmente da velocidade com que as partículas passam sobre a superfície e da sua dureza relativa à dureza da superfície; e
- riscamento e moagem (lixamento), característico de altas tensões e de impacto médio e baixo, é um comportamento intermediário entre os dois anteriores.

Ainda Chaves,⁽⁴⁾ recomenda para o desgaste do primeiro tipo materiais tenazes e duros, isto é, que não sofram deformação plástica e que tenham alta resistência ao riscamento, em princípio materiais susceptíveis de têmpera, tratamento térmico que mantém o núcleo tenaz e torna a superfície dura. Para



aplicações em que o material deva resistir principalmente à erosão (segundo tipo), a característica mais importante a ser buscada é a dureza superficial. Ferros fundidos brancos não ligados, ferro fundido com 28% Cr, ferros fundidos brancos martensíticos e Ni-hard, com dureza entre 550 BHN e 700 BHN, são os mais utilizados. Já para aplicações em que predomina o desgaste do terceiro tipo, devem ser procurados materiais de alta resistência ao cisalhamento e à compressão. Dependendo do tamanho das partículas e da sua velocidade, a energia com que elas impactam a superfície variará correspondentemente, sendo pois possível adotar uma faixa ampla de valores de tenacidade e dureza. Os materiais mais populares são os ferros fundidos brancos martensíticos ou as ligas Ni-hard de baixo teor de C. Neste sentido, o tratamento térmico do corpo moedor, especificamente bolas, é tão importante quanto a sua composição.

Ainda Chaves⁽³⁾ descreve as seguintes maneiras pelas quais bolas de um moinho se desgastam:

- **riscamento:** partículas duras riscam a superfície das bolas, levantando metal paralelamente à direção do seu movimento, criando uma saliência lateral, que será erodida preferencialmente;
- **indentação ou mordida:** grãos duros, prensados entre duas bolas, indentam a superfície de uma delas, empurrando o metal para os lados, gerando uma cratera, inicialmente sem remoção do material, como no riscamento descrito acima, criando uma saliência lateral, que também será erodida preferencialmente;
- **sulcamento:** partículas duras e pesadas rasgam a superfície, arrancando metal;
- **desgaste metal contra metal:** o contato entre as superfícies de duas bolas, sem minério entre elas, faz aparecerem áreas desgastadas com dimensões maiores que as dos demais eventos de desgaste provocados pela abrasão devida ao minério;
- ***pitting corrosion:*** caracteriza-se por furos profundos devidos à corrosão do metal, devido à formação de pares galvânicos dentro da bola ou entre a bola e a polpa; e
- **lascamento (*spalling*):** decorre do trincamento da bola a partir de defeitos de fundição (rechupes). A bola vai sendo lascada sucessivamente, em camadas, como uma cebola.

A corrosão metálica é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num meio agressivo, processo que resulta na formação de produtos de corrosão e na liberação de energia. Trata-se dum processo eletroquímico em que o ferro metálico (Fe^0) cede elétrons e recebe íons do oxigênio da polpa, tornando-o oxidado (Fe^{+++}). Trata-se de um processo traiçoeiro porque lento, quase mesmo imperceptível, muitas vezes acaba negligenciado ou esquecido.

Gentil⁽⁵⁾ esclarece que para muitas ligas do ferro pode ocorrer a passivação quando em meio alcalino. Desta maneira, a passivação seria uma alternativa para se tentar diminuir o efeito corrosivo sobre a liga metálica, por meio da introdução de algum agente alcalino, como o hidróxido de sódio.

A corrosão é aumentada pela presença de íons cloreto no meio e de oxigênio dissolvido na água de processo. Gentil⁽⁵⁾ recomenda a desaeração da água a ser utilizada em operações industriais.

O processo corrosivo é acelerado pela abrasão: o produto da corrosão é um material oxidado que é facilmente removido pela ação mecânica do movimento de rolagem entre as bolas e intensificado pela presença de minerais abrasivos. A sua remoção expõe uma superfície de metal fresca, quimicamente ativa e pronta para

ser corroída. Deste modo, a ação conjunta de corrosão + abrasão torna-se extremamente rápida e danosa.

Há vários tipos de marcação de corpos moedores para acompanhar o seu desgaste, como: mecânica, radioativa, utilizar bolas com diâmetros maiores que o *top size*. Maia⁽⁶⁾ confirma que o ensaio com bolas marcadas permite medir com boa precisão o consumo de bolas em um moinho. No presente estudo foram utilizadas bolas com marcação feita a partir de eletro-erosão, identificadas com marcas circulares que permitem, de acordo com o número de marcas, diferenciar o tipo de bola, no caso, entre as bolas de aço e de FFBC (ferro fundido branco de alto cromo - 30% de Cr). Entretanto, dadas as diferentes composições dos dois tipos de bola, como mostra a Figura 1, apenas pela aparência podem ser diferenciados estes dois tipos de bola, as de aço, visualmente mais escurecidas e naturalmente com traços de *pitting corrosion*, e as de FFBC, mais claras, e aparentemente preservadas de ataques corrosivos.

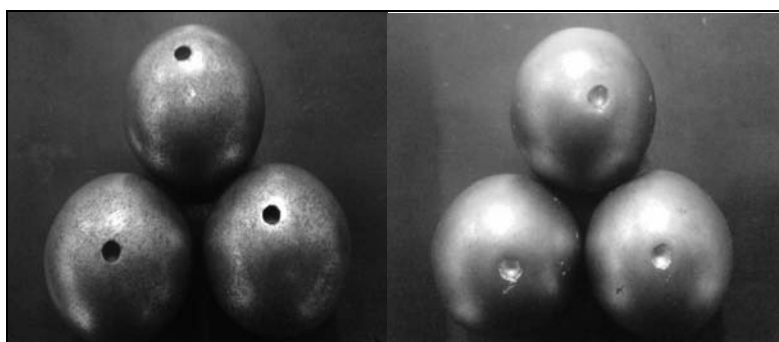


Figura 1 - Bolas marcadas de aço e de FFBC.

1.1 Teoria Volumétrica do Desgaste de Bolas

Segundo Maia,⁽⁶⁾ esta teoria afirma que a razão de desgaste de uma bola é proporcional à sua massa, por conseguinte ao seu volume, ou seja, ao cubo de seu diâmetro. Explica que a origem desta teoria está na idéia de que a maioria dos eventos de cominuição decorra dos mecanismos de impacto. Esta idéia seria, de modo geral, mais aplicável a alimentações cujas distribuições granulométricas sejam mais amplas, nas quais haja predominância de material mais grosso, no qual a cominuição ocorra predominantemente por mecanismo de impacto.

1.2 Teoria Superficial de Desgaste

Ainda, segundo Maia,⁽⁶⁾ a vasta maioria dos eventos de cominuição se deve à abrasão bola-partícula-bola, sugerindo que a razão de desgaste será proporcional à superfície da bola, ou seja, ao quadrado do diâmetro. O desgaste seria devido predominantemente à abrasão e portanto, proporcional à área da bola.

Segundo Azzaroni,⁽⁷⁾ a aplicação da teoria de desgaste superficial se dá da seguinte maneira: a redução do diâmetro de uma bola, devido ao desgaste, é constante e uniforme em relação ao tempo de operação ou à produção do moinho:

$$\frac{df}{dt} = -k \quad [1]$$

Com o tempo:

$$\frac{df}{dt} = -k \theta^n \quad [2]$$

onde n é função das características da moagem, distribuição da dureza ao longo do raio do corpo moedor e outras variáveis, podendo ser diferente de um moinho para outro.

Assim, para a avaliação das taxas de desgaste da carga moedora, seria necessário se determinar somente e com precisão, a variação da massa do corpo moedor, entre a entrada e a sua saída do moinho. Conhecida esta variação, por meio da densidade do material, determina-se a partir da variação de volume, e, por conseguinte de diâmetro, qual seria a taxa de desgaste para um dado corpo moedor.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho mediu o desgaste ocorrido em um moinho de bancada, usando bolas de aço e bolas de FFBC e dois tipos de concentrado de ferro, tipo *pellet feed*, originários de Minas Gerais, sendo o primeiro, denominado de Baixa Sílica (BS) e o outro de Alta Sílica (AS), respectivamente contendo em torno de 1,8% e 6% SiO_2 .

Primeiramente, as amostras dos dois concentrados foram homogeneizadas em pilha alongada e alíquotas foram retiradas para análise química. Uma vez confirmados os teores de Fe e SiO_2 em cada tipo de concentrado, deu-se início aos ensaios de moagem por batelada. A Tabela 1 mostra a análise química dos concentrados e a Tabela 2 a distribuição granulométrica dos mesmos.

Tabela 1 - análise química dos concentrados (%)

elemento	AS	BS
Fe	67,3	69,0
SiO_2	6,03	1,78
Al_2O_3	0,71	0,12
P	<0,01	0,01
Mn	0,28	0,10
TiO_2	<0,10	<0,10
CaO	<0,10	<0,10
MgO	0,31	<0,10
Na_2O	<0,10	<0,10
K_2O	<0,10	<0,10
P.F.	0,45	0,92

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da alimentação do moinho (% retida acumulada)

malha Tyler	mm	AS	BS
4	4,8		0,82
6	3,4	0,13	1,14
9	2,0	0,34	1,73
14	1,2	1,60	2,45
28	0,600	9,71	3,85
65	0,210	32,84	8,15
100	0,150	45,31	11,94
150	0,105	57,57	21,00
200	0,075	68,57	33,72
325	0,044	85,68	63,11
- 325		100,00	100,00

O ensaio de moagem no moinho de batelada foi conduzido misturando bolas, concentrado e água para encher 40% do volume interno do moinho e ajustar a

porcentagem de sólidos na polpa em 87% em peso. O moinho utilizado tem dimensões internas de cilindro 200 x 250 mm e gira a 73 rpm.

Para a realização do ensaio, foram utilizadas bolas marcadas, por eletroerosão, e identificadas segundo o número de marcas na superfície. Para completar a carga do moinho, foram utilizadas bolas não-marcadas, denominadas bolas de enchimento. Foram utilizadas, segundo a disponibilidade de bolas marcadas no laboratório, 15 bolas de aço e 15 bolas de ferro fundido de alto cromo, e após a pesagem de cada lote de bolas, foi então completada a massa de carga moedora no moinho. Cabe a observação de que foi necessário determinar as massas com duas casas decimais para conferir precisão às medidas de desgaste.

As bolas, no início de cada ensaio, foram submetidas a uma rodada de moagem, a seco, com areia de fundição, para retirar eventuais protuberâncias ou áreas oxidadas e deixar o material limpo.

O ensaio de desgaste consistiu nas seguintes etapas:

- 1 - pesagem dos corpos moedores marcados e anotação da massa individual de cada corpo moedor;
- 2 - pesagem da carga de enchimento para completar a carga de corpos moedores no moinho;
- 3 - pesagem da alíquota de concentrado de ferro;
- 4 - pesagem do volume de água necessário;
- 5 - colocação do concentrado, dos corpos moedores e da água dentro do moinho;
- 6 - acionamento do moinho por período de 1h;
- 7 - ao término de 1h, o moinho é aberto, as bolas são retiradas e lavadas com lavador de alta pressão;
- 8 - a polpa restante nas paredes e no fundo do moinho é retirada;
- 9 - carrega-se o moinho novamente com a mesma massa de concentrado de ferro, água e corpos moedores;
- 10 - aciona-se novamente o moinho e, decorrida 1h, repete-se o passo 7 para mais uma rodada de moagem em batelada.

Como norma de ensaio, adotou-se o período de moagem de 8 h para cada conjunto concentrado, corpo moedor e tipo de água utilizada.

A Figura 2 mostra o moinho carregado com concentrado, bolas e água.



Figura 2 - Conjunto moinho + bolas + concentrado + água.

Transcorridas 8 h de ensaio, as bolas foram retiradas do moinho e lavadas com lavador de alta pressão. Para retirar de forma eficaz todas as eventuais partículas retidas na superfície das bolas, elas foram submetidas a imersão, por período de 15 minutos, em água, em equipamento de emissão de ultrassom modelo Thornton. Decorridos os 15 minutos, as bolas foram retiradas do aparelho e

submetidas a banho de imersão em acetona e novamente, por mais 15 minutos, foram submetidas ao ultrassom para retirar as eventuais partículas restantes, ao mesmo tempo em que se tem como objetivo retirar a água residual na superfície das bolas, evitando-se assim o processo de corrosão precoce das bolas. Por último, antes da pesagem, as bolas foram colocadas sob lâmpadas incandescentes de 1.000 W pelo período de 10 minutos para que se eliminasse toda a umidade residual. Só então elas foram pesadas.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O método consiste em comparar as massas dos corpos moedores ao término de cada rodada de moagem. Com os valores da variação de massa, geram-se os dados necessários para o cálculo da taxa de desgaste dos corpos moedores.

As taxas de desgaste foram obtidas a partir da variação de massa obtida, individualmente, para cada bola. Entretanto, é mais adequada para o cálculo da taxa média de desgaste a variação de diâmetro de cada bola, comparável com os valores de referência da literatura. Para isso, foi admitido que as bolas poderiam ser representadas por esferas perfeitas e, com o valor de densidade, a partir dos pesos respectivos, calculado o diâmetro equivalente. Os valores de densidade das bolas são, respectivamente, 7,5 g/cm³ para as bolas de FFBC e de 7,85 g/cm³ para as bolas de aço. A taxa de desgaste para cada bola era então calculada, representando essa variação de diâmetro e, conseqüentemente, a taxa média, por hora, era calculada em relação ao lote de bolas marcadas utilizadas no ensaio:

$$\phi_{equivalente} = \sqrt[3]{8 \cdot \left(\frac{3 \cdot m}{4 \cdot \pi \cdot \rho} \right)} \quad [3]$$

onde:

m: massa da bola

ρ : densidade da liga da bola

$$taxa \text{ média de desgaste} = \frac{\phi_{eq \text{ inicial}} - \phi_{eq \text{ final}}}{\Delta t} \quad [4]$$

onde:

$\phi_{eq \text{ inicial}}$:: diâmetro equivalente no início do ensaio

$\phi_{eq \text{ final}}$: diâmetro equivalente ao término do ensaio

Δt : intervalo de tempo de ensaio.

A programação experimental executada é mostrada na Tabela 3. A água foi obtida da rede de abastecimento.

Tabela 3 - Condições experimentais - efeito da abrasão

ensaio	material	concentrado	pH
1	aço	BS	8,5
2	FFBAC	BS	8,5
3	aço	AS	8,5
4	FFBAC	AS	8,5

A Tabela 4 exemplifica o cálculo da taxa de desgaste.



Tabela 4 - Cálculo do desgaste das bolas de aço com concentrado AS em pH 8,5

bola nº	alimentação massa (g)	Ø equiv. (mm)	bola nº	pesagem 8 h massa (g)	Ø equiv. (mm)	desgaste (mm)
1	117,84	30,61	1	117,580	30,58	0,023
2	118,03	30,62	2	117,750	30,60	0,024
3	118,05	30,62	3	117,860	30,61	0,016
4	118,22	30,64	4	117,940	30,61	0,024
5	118,26	30,64	5	117,970	30,62	0,025
6	118,54	30,67	6	118,260	30,64	0,024
7	118,96	30,70	7	118,680	30,68	0,024
8	119,07	30,71	8	118,770	30,69	0,026
9	119,08	30,71	9	118,810	30,69	0,023
10	119,27	30,73	10	118,850	30,69	0,036
11	119,27	30,73	11	118,970	30,70	0,026
12	119,28	30,73	12	118,980	30,70	0,026
13	119,45	30,74	13	119,140	30,72	0,027
14	119,76	30,77	14	119,400	30,74	0,031
15	122,22	30,98	15	121,990	30,96	0,019
média	119,02	30,71	média	118,73	30,68	0,025
desvio	1,07	0,09	desvio	1,06	0,09	0,004
Ø equiv. médio (mm)		30,71	Ø equiv. médio (mm)		30,68	
			TD média(µm/h)		3,12	

A Tabela 5 mostra as taxas médias de desgaste obtidas.

Tabela 5: Taxas médias de desgaste obtidas (µm/h)

taxa média de desgaste	bola de aço	bola de ferro fundido
concentrado BS	2,85	1,06
concentrado AS	3,12	1,10

Estes resultados mostram que, como esperado, o desgaste das bolas de ferro fundido é menor que o das bolas de aço e que o desgaste com o concentrado de alta sílica é maior que com o de baixa sílica.

Passou-se então a avaliar o efeito da componente de corrosão sobre o desgaste. Para isto foram realizados mais quatro ensaios, nos quais se variou o pH da água utilizada para compor a polpa do concentrado. Nesta etapa, foi utilizado hidróxido de sódio, em escamas, 70% de alcalinidade, aumentando o pH de 8,5 para 10,5. A programação desta etapa é mostrada na tabela 6.

Tabela 6 - Condições experimentais - efeito da corrosão

ensaio	material	concentrado	pH
5	aço	BS	10,5
6	FFBAC	BS	10,5
7	aço	AS	10,5
8	FFBAC	AS	10,5

A Tabela 7 mostra as taxas médias de desgaste obtidas.

Tabela 7: taxas médias de desgaste obtidas (µm/h) - efeito da abrasão

taxa média de desgaste	bola de aço	bola de ferro fundido
concentrado BS	2,52	0,99
concentrado AS	2,99	1,04



Novamente, o desgaste das bolas de ferro fundido é menor que o das bolas de aço e o desgaste com o concentrado de alta sílica é maior que com o de baixa sílica. Todos os ensaios realizados em meio mais alcalino resultaram e taxas de desgaste inferiores.

4 CONCLUSÃO

Os resultados corroboram a idéia de que a corrosão possui influência significativa sobre a taxa de desgaste das bolas, e ainda, que variando o pH, obtém-se uma condição em que há diminuição da taxa de desgaste, em especial para as bolas de aço, mais susceptíveis ao desgaste do que as bolas de alto cromo.

Isto fica evidenciado nas tabelas 8, para o concentrado de baixa sílica, e 9, para o de alta sílica.

Tabela 8 - taxa de desgaste ($\mu\text{m/h}$) das ligas versus variação de pH – concentrado de baixo teor de Sílica (BS) - efeito do material da bola

material	dureza (RC)	pH		Δ (%) taxa de desgaste
		8,50	10,5	
aço	49,01	2,85	2,52	- 11,70
FF	61,50	1,06	0,99	- 6,70
Δ (%) taxa de desgaste		62,82	59,09	

Fica evidenciado que, para a mesma bola e mesmo tipo de concentrado, quando se elevou o pH para 10,5 obteve-se a maior variação para a bola de aço, com decréscimo de 11,70% na taxa de desgaste. Também se verificou uma diminuição na taxa de desgaste para a bola FFAC, de 6,70% na taxa de desgaste.

Tabela 9 - Taxa de desgaste ($\mu\text{m/h}$) das ligas versus variação de pH – concentrado de alto teor de Sílica (AS) - efeito do material da bola

material	dureza (RC)	pH		Δ (%) taxa de desgaste
		8,50	10,5	
aço	49,01	3,12	2,99	-4,16
FF	61,50	1,10	1,04	-5,76
Δ (%) taxa de desgaste		-64,74	-65,21	

Fica ainda evidenciado que para o concentrado de alto teor de sílica, a variação no pH não resultou numa diminuição tão significativa na taxa de desgaste nas bolas de aço (4,16%) como nas bolas de FFAC (5,76%), ressaltando o aspecto abrasivo que o alto teor de sílica pode causar na taxa de desgaste das bolas. Outro efeito percebido aqui é que a diferença de desempenho entre as ligas se mantém praticamente no mesmo patamar, deixando a impressão de que dado o caráter altamente abrasivo do minério, a diferença na taxa de corrosão parece influenciar de forma menos substancial a taxa de desgaste das bolas.

Já com o concentrado de baixa sílica, o aumento no valor de pH favorece a utilização das bolas de aço, enquanto que quando se trata de concentrado de alta sílica, ainda recomenda-se a utilização de bolas de FFAC, na condição de pH mais baixo. Desta forma, apesar da grande diferença de desempenho quanto às taxas de desgaste, pode-se pensar em recomendar a bola de aço, para concentrado de ferro com baixo teor de sílica, desde que seja introduzido no sistema a soda cáustica, a fim de diminuir a taxa de desgaste e contribuir para o menor custo da operação.

No entanto, cabe ainda a ressalva de que outros custos, como o de mão-de-obra de reposição de bolas bem como o de maior estoque, devem ser levados em consideração, mas também a maior facilidade e rendimento de produção que as bolas de aço, forjadas, apresentam, podem indicar uma nova maneira de encarar a forma de compra de corpos moedores dentro da operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IPT - Agrupamento de Tratamento de Minérios, onde foi feito o trabalho experimental, especialmente às pesquisadoras MSc. Sandra Lúcia de Moraes e Camila Massola Zeitune.

REFERÊNCIAS

- 1 SIRIANI, F.A. *Características gerais de desgaste de mandíbulas em britadores*. São Paulo, 1973. 281p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 2 ALBERTIN E. *Efeito da porcentagem de carbonetos e da microestrutura da matriz metálica sobre a resistência ao desgaste de ferros fundidos brancos de alto cromo – ensaios em moinhos de bolas*. São Paulo, 1993. 297p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 3 CHAVES, A.P., PERES, C. E. A. *Teoria e prática do tratamento de minérios – Volume 3: Britagem, Peneiramento e Moagem*. 4^a edição. Editora Signus, São Paulo, 2009.
- 4 CHAVES, A.P. *Teoria e prática do tratamento de minérios – Volume 1*. 4^a edição . Editora Signus. São Paulo, 2009.
- 5 GENTIL, V. Corrosão em meio aquosos. In: *Corrosão*. Editora Guanabara Dois S.A, Rio de Janeiro, p 189-195. 1982.
- 6 MAIA, G.S. *Avaliação da qualidade dos corpos moedores para minério fosfático de Tapira – MG*. São Paulo, 1994. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- 7 AZZARONI, E. Consideraciones acerca del desempeño de bolas para molienda y sus posibles efectos en la determinacion de la ley de desgaste. *Simposium sobre Molienda*, 5, Anales. p.151,Viña del Mar, Chiel, 1987.