

ENSAIO DE MOAGEM PILOTO: REFERÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DA TAXA DE DESGASTE DE CORPOS MOEDORES

Monica Speck Cassola ⁽¹⁾

Sandra Lúcia de Moraes ⁽²⁾

Eduardo Albertin ⁽³⁾

Resumo

A Divisão de Metalurgia do IPT vem há alguns anos realizando trabalhos na área de desgaste, em especial, de corpos moedores. Nos trabalhos já realizados foram avaliados vários materiais resistentes ao desgaste abrasivo, durante a moagem de minérios de fosfato e de ferro, além de areia de quartzo, produtos representativos de uma ampla gama de abrasividades. Foram realizados ensaios em escala piloto, com diferentes tipos de bolas de moinho, de ferros fundidos brancos de alto cromo e de aços temperados, avaliando-se e analisando-se as taxas e os micromecanismos de desgaste destas bolas. No trabalho mais recente, padronizou-se o ensaio de avaliação do desgaste em escala piloto contínua, utilizando-se minério de fosfato. O presente trabalho teve como objetivo obter uma correlação quantitativa dos resultados dos ensaios de desgaste de corpos moedores, através de um ensaio de referência de laboratório, nos quais utilizaram-se bolas fundidas em escala laboratorial, no IPT, e bolas de diferentes fornecedores. Os resultados obtidos permitiram à indústria prever o desgaste de corpos moedores para cada minério, tornando possível a pré-seleção de fornecedores, a indicação do melhor tipo de liga para cada caso, além de economia em todo o processo.

Palavras-chave: cominuição, corpos moedores, desgaste

Pilot Plant Grinding Testing Program: Reference for the Evaluation of Wear Rates in Grinding Media

Abstract

The Division of Metallurgy of IPT has been working for some years in studies of grinding media wear. Tests have been conducted using phosphate and iron ores, as well as quartz sand, representing the range of abrasivity usually found in practical applications. The pilot plant scale testing program was carried out testing balls made of steel and of different types of high chromium white cast irons, evaluating the wear rates and analyzing the wear micromechanisms of these balls. In this work, the objective was the validation of the wear evaluation method, comparing the results obtained in an industrial ball mill, grinding phosphate ore with those obtained running continuously the pilot-scale laboratory mill. Balls from commercial suppliers, as well as some produced in IPT were compared. Quantitative correlations between the performance of the grinding media in the industrial and the laboratory ball mills were obtained. The final results is a validated testing method available for the industry to foresee the wear of grinding media for each type of ore, making possible the selection of suppliers as well as the development of the best alloy for each case, aiming to lower costs in the grinding process.

Key-words: comminution, grinding media, wear

1. INTRODUÇÃO

Em vários países, o setor minero-metalúrgico vem avaliando alternativas para a diminuição dos custos das operações de processo, que vão desde a pesquisa de processos alternativos de fragmentação até a investigação de revestimentos especiais para moinhos, aumento da vida das faces dos britadores, pesquisa do consumo de bolas, planejamento de

operações para otimizar os circuitos de moagem e classificação, além da crescente implantação de automação e instrumentação nas plantas de cominuição na indústria mineral.

Embora a cominuição seja um processo bastante antigo, ainda é preciso estudar muito a seu respeito; aspectos fundamentais necessitam ser conhecidos detalhadamente para o domínio da cominuição.

Grande parte da moagem industrial é realizada em “moinhos rotativos” que são basicamente cilindros revestidos internamente com placas de desgaste, dentro dos quais os corpos

⁽¹⁾ PhD em Eng^a Mineral, pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Est. São Paulo S/A

⁽²⁾ MSc em Eng^a Mineral, pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Est. São Paulo S/A

⁽³⁾ PhD em Eng^a Metalúrgica, pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Est. São Paulo S/A

moedores (bolas, barras, “pebbles” ou “cylpebs”) se movem livremente ao realizar o seu trabalho de cominuição sobre o material a moer. A experiência demonstra que, num mesmo intervalo de tempo, a redução do diâmetro de qualquer bola, pelo desgaste, é a mesma, seja qual for o valor inicial do seu diâmetro.⁽¹⁾

A indústria mineral nacional consome mais de 50 mil toneladas de corpos moedores por ano. Diante da magnitude do consumo de bolas de moinho, nos processos de cominuição, é prioritário que seja realizada pesquisa nesta linha, a qual forneça soluções tecnológicas, seja pela pesquisa de novos insumos, seja pela otimização de processos ou por ambos. O grande desafio desta pesquisa é a possibilidade de redução de consumo de insumos, cujo valor atinge a cifra anual de US\$ 14 Milhões com corpos moedores somente nas unidades de pelotização de minério de ferro.

A ciência que trata dos problemas envolvendo atrito, lubrificação e desgaste é a Tribologia (do Grego Tribos, que significa friccionar). A tribologia é definida como o estudo das superfícies que interagem através do movimento relativo. São quatro os mecanismos básicos de desgaste, ou alguma combinação deles, envolvidos nos processos de desgaste (entre parênteses, a estimativa da contribuição de cada uma para as perdas de massa verificadas na prática):

- abrasão (50%)
- reação triboquímica (8%)
- adesão (15%)
- fadiga de contato (5%)

O tipo de desgaste que prevalece nas indústrias mineradoras é o **abrasivo**. Do total de perdas na indústria mineral, 40% são com corpos moedores e 20% com revestimento de moinhos.⁽²⁾

Segundo Albertin,⁽³⁾ os trabalhos de Moore e seus colaboradores⁽⁴⁾ identificaram sete formas de desgaste de bolas de moinho, quais sejam:

1. **crateras de indentação:** o mineral, posicionado entre duas bolas, penetra na superfície e extruda o material para os lados, produzindo uma cratera, inicialmente sem remoção do material.;
2. **corte:** partículas duras penetram no material e cortam, carregando o material cortado na direção do seu movimento;
3. **sulcamento:** partículas sulcam a superfície, deslocando material para os lados;
4. **deslizamento metal/metal:** o contato direto das superfícies metálicas resulta em regiões desgastadas que aparecem ocasionalmente na superfície das bolas, apresentando dimensões maiores que os demais eventos de desgaste verificados no mesmo sistema, provocados por partículas abrasivas;
5. **corrosão induzida por deformação:** pode ocorrer devido à ação de um meio corrosivo sobre o metal fortemente deformado pela ação do abrasivo;
6. **corrosão por “pitting”;**
7. **lascamento (“spalling”):** decorre de trincamento subsuperficial por processo de fadiga.

O trabalho citado considera que vários destes mecanismos poderão atuar em um dos sistemas, mas geralmente seria possível verificar predominância de apenas um deles, dependendo das características do material e do abrasivo e das características de operação do moinho.

No caso dos efeitos decorrentes de impacto, numa escala grosseira, materiais com insuficiente resistência ao impacto sofrerão fratura catastrófica no primeiro impacto. Numa escala mais refinada, ocorre a quebra ou lascamento macroscópico de bolas devido aos impactos repetidos, havendo a intervenção de mecanismos de fadiga e de nucleação e propagação de trincas. Quando se passa de moagem a seco para moagem a úmido, há uma mudança da ordem de grandeza no desgaste, a qual é freqüentemente atribuída a ocorrência de corrosão. Verifica-se, entretanto, o mesmo aumento nas taxas de desgaste durante a moagem com líquidos orgânicos, que não criam condições favoráveis à corrosão.⁽⁵⁾ Na maioria dos casos, o efeito do líquido é essencialmente o de facilitar o mecanismo de abrasão atuando como “fluido de corte”.

No desgaste abrasivo, uma partícula suficientemente dura ataca uma superfície em um ângulo favorável e atua como uma ferramenta de corte, retirando “cavacos” (microcorte). A ação é geralmente acompanhada por grande deformação plástica, acumulando material deslocado à frente do sulco e lateralmente. A passagem sucessiva de grãos abrasivos repete cíclicamente estes deslocamentos, levando à remoção do material por fadiga de baixo ciclo. O primeiro mecanismo - microcorte - é muito mais eficiente e favorecido pelas seguintes características do abrasivo: alta dureza; tamanho de grão elevado e morfologia angulosa dos grãos.

O ferro fundido branco de alto cromo (FFBAC) é um material altamente resistente à abrasão e apresenta uma boa relação custo/benefício nas minerações. Os ferros fundidos de alto cromo são ligas de Fe-Cr-C, com carbono variando normalmente de 1,5% a 4,0%, o cromo de 11% a 30% e outros elementos como silício, manganês, fósforo e enxofre. Na moagem a seco, em particular na indústria de cimento, os FFBAC praticamente se tornaram o material padrão para as bolas e revestimentos de moinho, dado o seu desempenho até 10 vezes superior ao de aços. No caso de moagem a úmido e com minérios mais abrasivos, as vantagens técnicas e econômicas da aplicação precisam ser analisadas caso a caso.

Muitos estudos foram realizados em todo o mundo sobre os FFBAC, devido ao seu grande potencial como material resistente ao desgaste em aplicações na indústria de processamento de

minérios. Porém, a transferência para a prática dos desenvolvimentos relativos a materiais resistentes ao desgaste é difícil, dada a diferença entre as condições dos ensaios de laboratório e aquelas da prática, o que os tornam pouco aceitos como indicadores do desempenho desses materiais nos equipamentos industriais. São raros os resultados relativos aos FFBAC obtidos em moinhos de bolas, sejam industriais ou de laboratório e quase sempre se referem à comparações entre diferentes tipos de materiais como “AÇO vs FFBAC”. A literatura apresenta três abordagens, no que se refere ao estudo de materiais para corpos moedores:

a) Uso de testes de laboratório

A grande maioria dos resultados encontrados na literatura relativos à resistência ao desgaste dos ferros fundidos brancos e aços foi obtida em ensaios de pino contra lixa, roda de borracha ou trilha com abrasivo. Devido à sua relativa facilidade de realização e baixo custo, estes ensaios permitiram varrer os parâmetros relativos aos materiais resistentes ao desgaste, ao mesmo tempo em que se verificaram os efeitos devidos a variáveis operacionais, como dureza e granulometria dos abrasivos, bem como cargas e velocidades.⁽⁶⁾ Embora esses ensaios atendam aos requisitos de reprodutibilidade e capacidade de estabelecer “rankings” de desempenho dos materiais, há fortes razões para se questionar a transferibilidade dos resultados para casos práticos de desgaste de bolas de moinho em aplicações industriais, tendo em vista a grande diferença dos sistemas tribológicos. A decisão quanto a usar bolas de ferro fundido branco ou aço, em uma determinada aplicação, provavelmente não será tomada com base em ensaios de desgaste realizados em laboratório. Por outro lado, uma vez decidido qual tipo de material será utilizado, os ensaios poderão ser de grande utilidade para avaliar fornecedores diferentes, ou o efeito de melhorias, como novos tratamentos térmicos, introdução de novos elementos de liga etc. Uma limitação importante é que ensaios como os de pino contra lixa não fornecem dados quantitativos que permitam estimar a vida útil dos corpos moedores. Na melhor das hipóteses, esses ensaios podem chegar a estabelecer um *ranking* de desempenho, ordenando qualitativamente diversos materiais ensaiados.

b) Uso de bolas marcadas em ensaios realizados em moinhos industriais

Neste caso, incluem-se testes com bolas diferenciadas pelo diâmetro maior do que o das bolas da carga normal do moinho, testes com bolas marcadas por atividade radioativa e testes com bolas marcadas com furos e entalhes.

As dificuldades encontradas referem-se aos custos de realização, bem como a problemas metodológicos decorrentes da dificuldade de se controlar as condições dos ensaios. Além disso, só podem ser realizados em um estágio avançado da negociação entre fornecedor e consumidor dos componentes, não servindo para desenvolvimento, mas apenas para aprovação ou não de um fornecedor potencial.

c) Uso de moinhos de laboratório

Neste caso, utilizam-se moinhos com até cerca de 1 m de diâmetro, em que se consegue reproduzir o tipo de interação entre corpos e meio abrasivo encontrada na prática, à exceção da intensidade dos impactos. Vantagens em relação aos testes em moinhos industriais são a maior rapidez dos testes e a possibilidade de introduzir e controlar variáveis de operação (como tipo e tamanho de grão dos abrasivos, % de sólidos na polpa, etc.) e relativas ao material resistente ao desgaste, possibilitando, portanto, o uso desses ensaios para o desenvolvimento dos materiais. Adicionalmente, um tratamento adequado dos resultados pode permitir a obtenção de dados quantitativos relativos à vida dos componentes em serviço.

O projeto inicial desenvolvido no Instituto de Pesquisas Tecnológicas,⁽⁷⁾ com o apoio da Finep, na linha de materiais resistentes ao desgaste, permitiu uma abordagem geral das ligas da família dos ferros fundidos de alto cromo e a determinação de solidificação e tratamento térmicos. Na segunda etapa, procurou-se uma maior especificidade, abordando-se a tecnologia de produção daquele produto de mais amplo consumo, as bolas de moinho fundidas. Neste projeto estudaram-se a técnica de fundição, a relação entre as composições químicas e têmpera e a técnica de têmpera em óleo, sempre aplicadas a bolas de moinho. Na terceira fase, foi possível conhecer o desempenho das ligas em ensaios em condições variadas, determinar os mecanismos de desgaste das bolas em diferentes condições tribológicas e otimizar as ligas.

Os ensaios foram efetuados em moinho de bolas de laboratório, marca Denver. Esse moinho possui uma câmara de moagem de 40 cm de diâmetro por 40 cm de comprimento, com revestimento liso de chapa de aço. A operação foi em regime contínuo, a úmido, com velocidade de 53 rpm, correspondente a 70% da velocidade crítica. Durante os ensaios, a carga, incluindo polpa e corpos moedores, ocupava cerca de 40% do volume do moinho. Utilizou-se o sistema de alimentação, controle de granulometria e recirculação.

Para poder ensaiar simultaneamente todas as bolas, utilizou-se um código de identificação constituído por 1, 2 ou 3 furos de 3 mm de diâmetro e 4 mm de profundidade, em disposições geométricas facilmente reconhecíveis. A carga inicial de bolas foi constituída de 71kg de bolas de 50 mm de diâmetro (144 bolas, correspondendo a 12 grupos), 27 kg de bolas de 35 mm de diâmetro e 27 kg de bolas de 25mm de diâmetro. Foram utilizados como abrasivos: minério de ferro, minério de fosfato e areia quartzosa, fornecidos pela Samarco Mineração S.A., Fosfértil - Fertilizantes Fosfatados S.A., e Mineração Jundu, respectivamente.

Verificou-se que o ensaio em moinho de bolas, de laboratório, indicou ser adequado para comparar desempenhos das ligas, estabelecendo um “ranking”. Também, no que diz respeito à reprodutibilidade, os ensaios mostraram-se satisfatórios, tanto pela pequena dispersão dos valores das medidas de perdas de massa, entre bolas de um mesmo lote, quanto pela regularidade do comportamento ao longo dos diversos períodos de ensaio, ou seja, as taxas de desgaste medidas em um período de ensaio repetiram-se nos demais períodos. De acordo Albertin e Sinátora⁽⁸⁾ o desgaste é proporcional à raiz quadrada do diâmetro do moinho em uma operação ocorrendo com a mesma porcentagem de velocidade crítica. Neste caso, o desgaste no moinho industrial deverá ser mais rápido do que no moinho de laboratório.

No presente trabalho, foi feita a comparação entre resultados obtidos no moinho de laboratório e aqueles obtidos em moinho industrial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido por meio das seguintes atividades:

- produção de cerca de 1 tonelada de bolas de ferro fundido branco de alto cromo (fundição e tratamento térmico, bem como a caracterização metalúrgica do material produzido). A Figura 1 mostra um conjunto de bolas fundidas. O projeto de fundição – específico para obtenção de amostras para ensaios - visou a que as condições de resfriamento e solidificação de todas as bolas fosse idêntico;
- todas as bolas de uma determinada composição ou lote comercial receberam uma identificação (Figura 2);
- recebimento das amostras de bolas produzidas comercialmente, para servir de referência nos ensaios, tanto de laboratório quanto de campo; preparação das amostras para caracterização metalúrgica e os resultados comparados com o das bolas produzidas no IPT. Na Figura 3 podemos observar o detalhe de um dos ensaios de caracterização;
- realização de ensaios de desgaste em moinho industrial;
- realização de ensaios de desgaste em moinho de laboratório. O minério utilizado foi minério de fosfato, britado com granulometria igual ao que é processado no moinho industrial. A empresa colaboradora colocou à disposição do IPT cerca de 10 toneladas do minério;
- análise da correlação entre ensaios de laboratório e de campo e do desempenho em serviço dos vários tipos de bolas ensaiadas.



Figura 1. Cacho de bolas fundidas

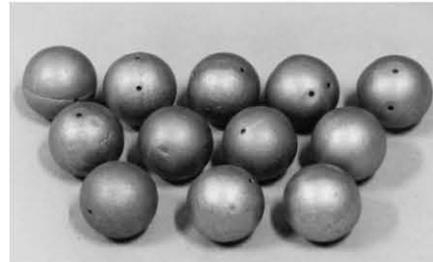


Figura 2. Bolas marcadas



Figura 3. Medição de dureza da superfície da bola

Os ensaios de desgaste foram realizados na planta piloto de moagem a úmido, em circuito fechado com classificador espiral, conforme pode ser visualizado na Figura 4. Complementar a esses, ocorre uma série de operações de controle do processo que geram os dados necessários para a avaliação de cada material ensaiado, quais sejam:

- determinação do *Work-Index* (WI) do minério fosfático;
- controle de processo: utilizam-se além do controle das vazões mássicas, análises granulométricas da alimentação, do produto da moagem, do *underflow* e do *overflow* do classificador espiral;
- durante a operação de moagem contínua, são efetuadas paradas periódicas para análise da variação do peso da carga de bolas; as bolas são retiradas do moinho, lavadas em aparelho de ultra-som utilizando-se acetona, secas e pesadas uma a uma em balança de precisão;
- controle da medição do pH na saída do moinho,

com o objetivo de verificar a acidez da polpa, para monitorar possíveis processos de corrosão. São extraídas aliquotas do extrato aquoso e são enviadas para ensaios complementares.

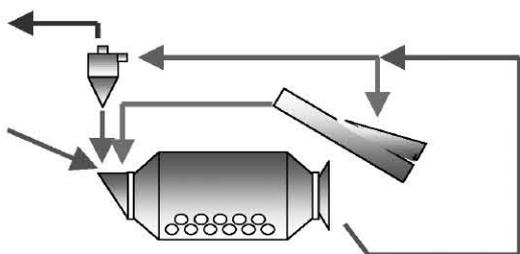


Figura 4. Fluxograma esquemático da planta piloto de moagem

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados de perda de massa foi possível estabelecer retas da diminuição do diâmetro das bolas com o tempo de ensaio. A inclinação destas retas é a taxa de desgaste em cada caso. O estudo forneceu informações de reprodutibilidade, de capacidade de estabelecer uma hierarquia de desempenho e transferibilidade para a prática.

O gráfico da Figura 5 mostra os efeitos das porcentagens de carbonetos das ligas utilizadas na fabricação das bolas, assim como o efeito do minério moído. Por meio de análises metalográficas, foi possível verificar que, adicionalmente ao efeito dos carbonetos na resistência ao desgaste, a relação dureza do material sobre dureza da matriz metálica das ligas mostrou-se como um fator extremamente importante para as diferentes amostras de bolas. Dessa forma, o desempenho de ligas contendo teores elevados de perlita ou de austenita retida tende a ser pior.

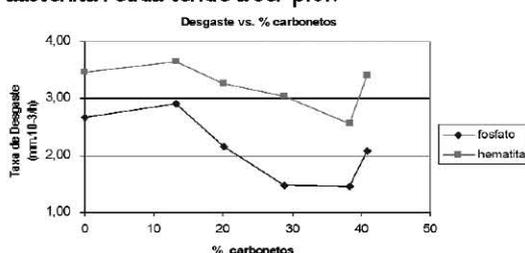


Figura 5. Taxas de desgaste em função da % de carbonetos e do tipo de minério moído – ensaios em moinho de laboratório

4. CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios de desgaste em moinhos de laboratório e industrial foram comparados, para o caso do minério de fosfato. Ao final da etapa experimental, obteve-se uma metodologia validada para avaliação de desempenho de corpos moedores, estabelecendo-se a correlação entre resultados no moinho de laboratório e de desempenho em serviço no moinho industrial, para materiais resistentes ao desgaste produzidos comercialmente e experimentalmente no IPT.

A Tabela I mostra a comparação entre os resultados no moinho de laboratório e no moinho industrial, relativos à moagem de minério de fosfato. Ambos os ensaios rodaram simultaneamente com bolas de aço e bolas de ferro fundido branco, utilizando-se no ensaio de laboratório amostras de bolas obtidas a partir dos lotes testados no moinho industrial.

Tabela I. Comparação dos resultados obtidos em moinho de laboratório e moinho industrial – minério de fosfato

| Ensaio | Taxa de desgaste por tipo de bola TD ($\mu\text{m}/\text{h}$) | | Resistência ao desgaste relativa RDR* |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------|
| | aço | FFBAC | |
| industrial | 7,97 | 4,10 | 1,94 |
| laboratório | 3,55 | 1,87 | 1,90 |

$$*RDR = TD_{\text{aço}} / TD_{\text{FFBAC}}$$

A comparação entre os resultados industriais e laboratoriais apontou que os ensaios de laboratório reproduzem qualitativa e quantitativamente o desempenho obtido no moinho industrial. No quadro abaixo, sintetiza-se a vantagem para o setor mineral em realizar o trabalho em escala laboratorial, considerando-se o interesse em um sistema de avaliação de fornecedores e desenvolvimento de novas soluções.

| MOINHO INDUSTRIAL | MOINHO DE LABORATÓRIO |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Realizado na parada de manutenção | Realizado por solicitação |
| > 1000 horas de ensaio | ~70 horas de ensaio |
| Alto custo | Baixo custo |
| Aprovação de fornecedor | Seleção de fornecedor |
| | Soluções tecnológicas |

Como podemos observar na Figura 5, obtida nos experimentos iniciais em laboratório, a evolução das taxas de desgaste com a variação das ligas foi similar para os minérios de fosfato e de ferro. O prosseguimento do programa de validação do ensaio em moinho de laboratório tem como prioridade o minério de ferro, especialmente no que se refere à preparação para pelotização, tendo em vista o grande volume de material processado e a crescente importância desse produto para a economia do País.

A principal contribuição esperada para o setor mineral é o aumento da produtividade advinda das soluções tecnológicas para a melhoria da qualidade dos corpos moedores, visando a ecoeficiência, estimulando as empresas a se tornarem mais competitivas, inovadoras e ambientalmente responsáveis, uma vez que os resultados são aplicáveis à redução do consumo de materiais e energia, maximizando o uso sustentável de recursos renováveis, prolongando a durabilidade dos produtos e agregando valor aos bens e serviços, instrumentos para o Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARROS, L.A. Testes de avaliação de corpos moedores. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 2., 1991, Uberlândia, MG. **Anais...** São Paulo: ABM, 1991. p. 481-502.
2. BRUNO NETO, J.; LIMA, J. R. B. Métodos de acompanhamento do desgaste de revestimentos de moinho. In: SEMINÁRIO DE DESGASTE (DESGASTE E PROTEÇÃO), 4., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 1988. p. 349-364.
3. 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 moinho de bolas.** 1993. 297p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
4. MOORE, M.A.; PEREZ, R.; GANGOPADHYAY, A.; EGGERT, J.F. Factor affecting wear in tumbling mills: influence of composition and microstructures. **Internacional Journal of Mineral Processing**, v. 22, n.1-4, p. 313-343, Apr. 1988.
5. IWASAKI, I. Nature of corrosive wear in ball mill grinding. **International Journal of Mineral Processing**, v. 22, n.1-4, p 345-360, Apr. 1988.
6. ALBERTIN, E.; AMBRÓSIO FILHO, F. Ensaio de desgaste de bolas de ferro fundido de alto cromo em moinho de bolas de laboratório. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 3. Fortaleza, 1994. **Anais...** São Paulo: ABM, 1994. p. 241-274.
7. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório nº 31.480/93 - Ensaio contínuos de moagem para auxílio na avaliação da taxa de desgaste de corpos moedores:** Relatório final. São Paulo, 1993.
8. ALBERTIN, E.; SINÁTORA, A. Mecanismos de desgaste abrasivo durante a moagem em moinhos de bolas. In SEMINÁRIO DE DESGASTE (DESGASTE E PROTEÇÃO), 4., São Paulo, 1988. **Anais...** São Paulo: ABM, 1998. p. 83-108.