

INSUMOS DA MINERAÇÃO: O CASO DO DESGASTE DE CORPOS MOEDORES

M. S. Cassola¹, S. L. Moraes², E. Albertin³, J. C. Pontes⁴

1, 2, 3 - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - Rua Prof. Almeida Prado, 532. Cidade Universitária. CEP 05508-901 - São Paulo - SP

E-mail: mrnc@ipt.br sandralm@ipt.br albertin@ipt.br

4- Companhia Vale do Rio Doce - Departamento de Pelotização.

Av. Dante Michelini, 5500 Ponta de Tubarão - CEP 29090-900 Cx Postal 8001 - Vitória - ES

E-mail: jose.carlos.pontes@cvrld.com.br

RESUMO

Os pesquisadores do IPT desenvolveram *know-how* para correlacionar os resultados laboratoriais de ensaios de desgaste de corpos moedores diretamente à indústria, por meio de constantes pesquisas e trabalhos realizados em parceria com o setor minero-metalúrgico. A experiência dos autores em estudos de desgaste é aplicável também a outros insumos da mineração, tais como peças de britadores, rotores de bomba e revestimento de moinhos. A completa infraestrutura do IPT para o atendimento à Tecnologia de Fundição (projeto e identificação de ligas, fundição, circuito de moagem piloto e caracterização dos insumos e produtos), gera uma hierarquia de desempenho dos insumos com redução de custos e pré-seleção de fornecedores. Os ensaios padronizados em escala piloto, com diferentes tipos de bolas de moinho, de ferros fundidos brancos de alto cromo e de aços temperados, nos quais avaliam-se as taxas e os micromecanismos de desgaste destas, fornecem uma correlação quantitativa direta com os resultados industriais. O presente trabalho teve como objetivo a caracterização dos corpos moedores para avaliação deste insumo adquirido de diferentes fornecedores pela Companhia Vale do Rio Doce - CVRD para dar subsídio técnico às unidades de moagem industriais de Tubarão-ES. As principais etapas foram: Determinação das curvas de polarização (avaliação do efeito de corrosão preferencial); Caracterização metalográfica (caracterizar química e metalograficamente as amostras de bolas para compor um *Atlas de Referência*) e Ensaio de desgaste (avaliar o desgaste dos corpos moedores em uma unidade piloto contínua de moagem e classificação). Os resultados obtidos permitiram elaborar uma hierarquia de desempenho técnico.

PALAVRAS-CHAVE: cominuição, corpos moedores, bolas de moinho, desgaste.

1. INTRODUÇÃO

Considera-se geralmente que o consumo de corpos moedores é um dos principais itens de custo no processamento de minérios. Na indústria de cimento, as bolas de moinho de ferro fundido branco de alto cromo (FFBAC) tornaram-se o padrão, em vista de um desempenho nitidamente superior em comparação com bolas de aço fundidas ou forjadas. Já no caso de moagem a úmido de minérios e, de maneira geral, nas condições mais severas do ponto de vista do desgaste, as diferenças de desempenho entre os materiais tende a diminuir, o que torna necessário analisar caso a caso as eventuais vantagens técnicas e econômicas, ao selecionar o tipo de corpo moedor e respectivos material e processo de fabricação.

Devido ao seu grande potencial como material resistente ao desgaste em aplicações na indústria de processamento de minérios, foram realizados muitos estudos em todo o mundo sobre os ferros fundidos brancos de alto cromo. Entretanto, a colocação em prática de desenvolvimentos relativos a materiais resistentes ao desgaste é dificultada pelo fato de que resultados de ensaios de laboratório em que as condições de interação abrasivo/metal diferem muito daquelas encontradas na prática tendem a ser pouco aceitos como indicadores do desempenho desses materiais nos equipamentos de moagem industrial.

Por outro lado, os ensaios de corpos moedores em condições de produção industrial são demorados e onerosos, tanto para os fornecedores desses insumos como para os usuários. Além disso, do ponto de vista metodológico, apresentam sérios problemas, no que se refere ao controle das condições experimentais, já que não há a possibilidade prática de priorizar a manutenção de condições constantes da operação – essenciais para uma efetiva comparação de desempenho – em detrimento das necessidades da produção. É praticamente inviável, nessas condições, manter sob controle todas as variáveis que podem afetar os resultados.

A disponibilidade de um ensaio relativamente barato e rápido, capaz de reproduzir, pelo menos parcialmente, as condições de um moinho de bolas industrial, pode contribuir para o desenvolvimento dos materiais para corpos moedores, bem como dotar os usuários de uma ferramenta eficiente para o controle de qualidade desse insumo essencial. Um bom ensaio de desgaste deve atender a três requisitos: reprodutibilidade; capacidade de estabelecer uma hierarquia de desempenho (*ranking*) e transferibilidade para a prática, verificada através dos resultados em serviço. Na literatura são apresentadas três abordagens no que se refere ao estudo de materiais para corpos moedores:

a) Uso de testes de laboratório

Nesta categoria enquadram-se os ensaios de pino contra lixa e os ensaios de trilha com lama abrasiva. 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. 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.

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, teste com bolas marcadas por atividade radioativa e testes com bolas marcadas com furos e entalhes. As dificuldades referem-se aos custos de realização, bem como a problemas metodológicos decorrentes da dificuldade de se controlar as condições dos ensaios, conforme já foi mencionado. Além disso, só podem ser realizados em um estágio avançado da negociação entre fornecedor e consumidor dos componentes, não servindo propriamente para desenvolvimento mas apenas para aprovação ou não de um fornecedor potencial.

c) Uso de moinhos de laboratório

Neste ensaio, empregam-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 IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A) desenvolveu o ensaio de desgaste de bolas em moinho de laboratório (Cassola, Moraes e Albertin, 2004), aplicando-o para avaliar o desempenho de FFBAC, durante a moagem de minérios de ferro e de fosfato, bem como de talco e de areia de quartzo. Seus resultados foram validados por meio da realização, em paralelo, de ensaios de laboratório e na instalação industrial, na moagem de minério de fosfato.

Assim, o presente trabalho apresenta os resultados obtidos em um estudo realizado com o objetivo de caracterizar as bolas de moinho adquiridas de diferentes fornecedores, pela Companhia Vale do Rio Doce, para dar subsídio técnico às unidades de moagem industriais de Tubarão-ES.

2. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi a caracterização dos corpos moedores para avaliação deste insumo adquirido de diferentes fornecedores da Companhia Vale do Rio Doce - CVRD, o qual foi seqüenciado através de três módulos distintos:

- ✓ Módulo I – Determinação das curvas de polarização, cuja finalidade foi definir quantos grupos poderiam ser montados sem que houvesse o efeito de corrosão preferencial de algumas bolas e de proteção de outras durante a avaliação do desgaste de corpos moedores, realizado no Módulo III;
- ✓ Módulo II – Caracterização metalográfica das bolas, onde se previu caracterizar química e metalograficamente as amostras dos diferentes fornecedores de bolas para compor um atlas de referência; e
- ✓ Módulo III – Ensaio de desgaste, no qual foi previsto avaliar o desgaste dos corpos moedores em uma unidade piloto de moagem e classificação, segundo metodologia desenvolvida pelo IPT. O objetivo desta etapa foi estabelecer o ranking de desempenho das bolas, em condições tais que os resultados possam ser transferidos para a prática industrial. Foi também realizado um estudo inicial sobre o efeito da adição de um inibidor de corrosão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Run in

O *run in* refere-se a um período preliminar de moagem, sendo essencial para se conseguir remover heterogeneidades superficiais das bolas decorrentes dos processos de fundição e tratamento térmico, além de remover a estrutura coquilhada presente em bolas de algumas composições, nas regiões próximas à superfície. Em alguns casos, a maior parcela de desgaste durante um ensaio de laboratório poderia ocorrer na região coquilhada, o que comprometeria a transferibilidade de resultados.

Para a realização da etapa de *run in*, utilizou-se uma areia com cerca de 74% de material entre as malhas 0,3 mm e 0,21 mm, fornecida pelo Laboratório de Fundição do IPT. O *run in* foi realizado para as bolas marcadas e não marcadas separadamente, num total de 25 horas de moagem em moinho de bolas a seco marca IPT, com 4 (quatro) intervalos de parada, nos quais era trocada a areia moída por areia nova e as bolas eram limpas e pesadas. Na figura 1 estão apresentados aspectos de uma bola antes e depois do *run in*.

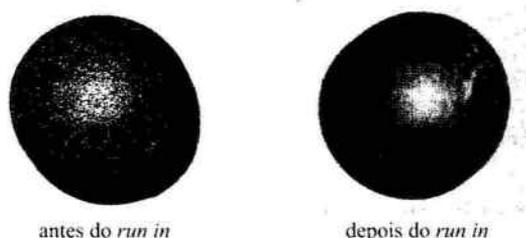
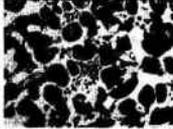
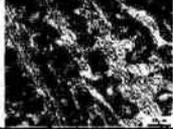


Figura 1 - Aspectos das bolas antes e depois do *run in* (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004)

3.2. Corpos Moedores

Foram recebidos seis tipos de corpos moedores (bolas) para ensaio, denominadas de CM1 a CM6 e identificadas por diferentes tipos de marcação através de furos feitos por eletroerosão. De cada lote de bolas, algumas foram selecionadas aleatoriamente e destinadas a ensaios de análise química e corrosão. Os resultados de caracterização de cada tipo de bola constam da tabela 1.

Tabela 1 Características dos corpos moedores

CM	Corpo moedor		Tipo de liga	Comp. Química		Resultado do ensaio de corrosão
	Fotografia	Microestrutura		C (%)	Cr (%)	
1			Ferro fundido branco comum coquilhado	3,26	1,1	Ataque generalizado
2			Ferro fundido branco de alto cromo	2,71	25,0	Comportamento passivo
3			Aço alto carbono temperado	0,86	0,22	Ataque por pite
4			Ferro fundido branco de alto cromo	3,0	11,0	Ataque por pite
5			Ferro fundido branco de alto cromo	3,0	30,0	Comportamento passivo
6			Aço alto carbono temperado	1,19	0,59	Ataque por pite

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2004)

3.3. Circuito de Moagem / Classificação

Utilizou-se circuito fechado de moagem contínua a úmido e classificação. O fluxograma esquemático do circuito está apresentado na figura 2.

O moinho de bolas de laboratório, marca Denver, equipado com um medidor eletrônico de potência, foi revestido internamente com uma manta de borracha com 1 cm de espessura, com o objetivo de minimizar possíveis efeitos de corrosão, decorrentes de interações entre as ligas das bolas e o aço da carcaça. Trabalhou-se em circuito fechado

com um ciclone, onde o *underflow* (grossos) da classificação retornava para a alimentação do moinho e o *overflow* (finos) era bombeado para uma caixa de decantação, sendo a água retornada ao processo.

A taxa de alimentação nova de minério de ferro com umidade em torno de 8% do moinho foi de cerca de 74 kg/h (base seca) e a malha de moagem foi de 325 *mesh* (0,044 mm). Como controle de processo, foram utilizadas vazões mássicas e volumétricas e análises granulométricas do *underflow* e *overflow* do ciclone.

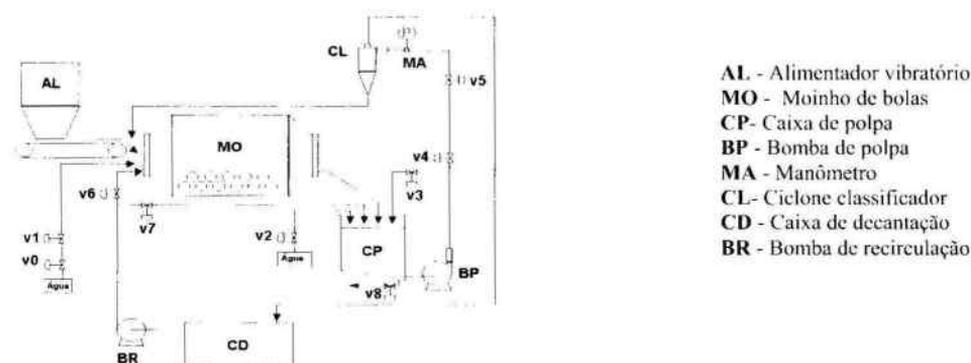


Figura 2 - Fluxograma esquemático da planta de moagem de laboratório (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004)

3.4. Taxas de Desgaste

No caso de corpos moedores, um parâmetro indicativo de sua durabilidade é a constante cinética de desgaste, relacionada à taxa específica de consumo. A taxa de consumo representa a perda de massa dos corpos moedores em relação a fatores como consumo energético (g/kWh), tempo de moagem (g/h) ou toneladas de minério moído (g/t). De acordo com Sepúlveda (1996), o modelo mais amplamente 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 velocidade de consumo do corpo moedor é diretamente proporcional à sua área superficial exposta aos diversos mecanismos de desgaste. Como consequência, a diminuição de diâmetro das bolas com o tempo de moagem é linear. No presente trabalho a análise do desgaste foi realizada convertendo-se os resultados de perda de massa para variação de diâmetro. Os diâmetros equivalentes foram calculados utilizando densidade de 7,5 g/cm³ para as bolas de ferro fundido branco de alto cromo e 7,7 g/cm³ para a bola de aço.

Assim, em gráficos de perda de diâmetro pelo tempo de moagem, foram obtidas as taxas de desgaste k , correspondentes aos respectivos coeficientes angulares das retas. Uma vantagem importante da utilização deste parâmetro é que seu valor não depende do diâmetro original das bolas, ao contrário do que é verificado quando se utiliza a perda de massa como indicador da taxa de desgaste.

Por uma analogia direta com os processos de cominuição de minerais, é razoável afirmar que a cinética do desgaste seja similarmente dependente da intensidade energética do processo, isto é, quantos kWh de energia são aplicados para cada tonelada de corpos moedores na carga do moinho. Portanto, a potência consumida pelo moinho durante os ensaios foi monitorada e para cada material foi calculado o parâmetro K_e , expresso em g/kWh.

3.5. Ensaios de Desgaste

De acordo com os resultados obtidos no Módulo I, referente à caracterização das bolas quanto ao potencial de corrosão, os ensaios de desgaste foram divididos em testes, a saber:

- ✓ Ensaio D1: realizado com os corpos moedores CM2 e CM5, que apresentaram comportamento passivo no ensaio de corrosão;
- ✓ Ensaio D2: realizado com os corpos moedores CM3, CM4 e CM6, que apresentaram ataque por pite no ensaio de corrosão;
- ✓ Ensaio D3: realizado com o corpo moedor CM1, que sofreu ataque generalizado no ensaio de corrosão;
- ✓ Ensaio D4: realizado com os corpos moedores CM1, CM2, CM4 e CM6, com utilização de "inibidor de corrosão";
- ✓ Ensaio D5: refere-se a ensaios complementares para as bolas CM3 e CM6;
- ✓ Ensaio D6: refere-se a ensaios complementares para as bolas CM2 e CM5.

4. RESULTADOS

4.1. Comparação dos Resultados Obtidos nos Ensaios D1, D2 e D3

A figura 3 apresenta o comparativo geral entre as seis famílias de bolas ensaiadas, com as respectivas perdas em massa e diâmetro, bem como suas taxas de desgaste. O tempo de moagem em cada ensaio foi de cerca de 56 horas.

Familia	Perdas		Taxas de desgaste	
	(g)	(mm)	K ($\mu\text{m/h}$)	Ke (g/kWh)
CM2	1,13	0,11	1,88	11,08
CM4	1,74	0,17	2,99	18,14
CM5	1,8	0,17	3,08	17,81
CM6	2,72	0,21	3,73	20,14
CM3	3,05	0,26	4,50	25,10
CM1	2,75	0,25	4,73	27,09

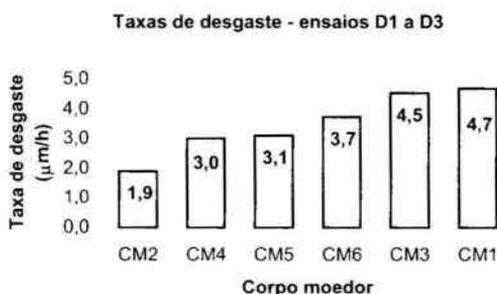


Figura 3 – Comparação entre o desempenho das diversas famílias de corpos moedores (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004)

4.2. Ensaio D4

No ensaio D4, avaliou-se o desempenho dos corpos moedores ao se adicionar um inibidor de corrosão. Os corpos moedores avaliados neste ensaio foram definidos em conjunto com a CVRD, sendo:

- ✓ CM1: por ser provavelmente o mais barato entre todos os materiais ensaiados;
- ✓ CM2: por ter apresentado o melhor desempenho nos ensaios de desgaste;
- ✓ CM4: por ter apresentado o segundo melhor resultado geral nos ensaios de desgaste; também é relevante que este material é o de menor teor de cromo, entre os ferros fundidos ligados, sendo, possivelmente, de menor custo;
- ✓ CM6: por ter apresentado o melhor resultado entre os aços.

O inibidor de corrosão foi selecionado pela CVRD e identificado por Inb-CVRD; trata-se de uma solução aquosa de cor amarela, densidade igual a $1,18 \text{ g/cm}^3$ e pH 11,94. A dosagem utilizada no ensaio foi a recomendada pelo fabricante, 0,5% sobre a massa seca de minério de ferro alimentada. No ensaio D4 o tempo total de moagem foi de 55 horas.

4.3. Ensaios D5 e D6

Os ensaios D5 e D6 são repetições das avaliações de taxas de desgaste para as bolas de aço CM3 e CM6 (ensaio D5) e para as bolas de ferro fundido de alto cromo CM2 e CM5 (ensaio D6). Com estes ensaios, procurou-se verificar se havia alteração da taxa de desgaste, em relação aos resultados obtidos inicialmente, à medida em que se afastava da superfície original das bolas. Para isso, foi feito um segundo período de *run in*, com moagem a úmido, contínua, por 40 horas utilizando-se a areia de fundição descrita anteriormente, seguindo-se o ensaio normal com minério de ferro.

No ensaio D5, o tempo total de moagem foi de 23 horas. No ensaio D6, o experimento foi conduzido por 54,5 horas.

5. COMPARAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS DE DESEMPENHO DAS BOLAS

O gráfico da figura 4 apresenta uma comparação do conjunto de resultados.

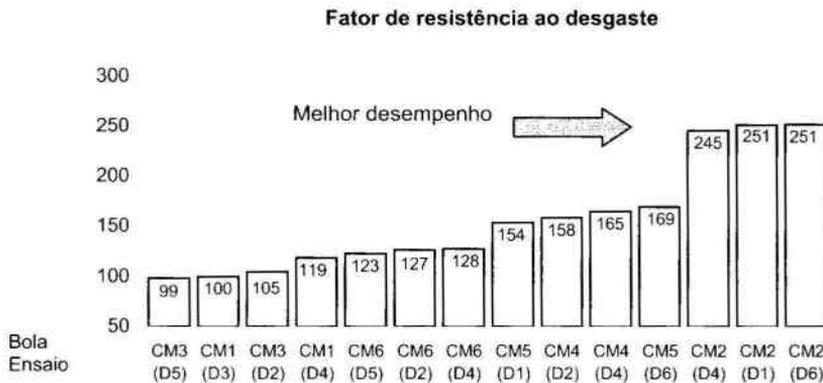


Figura 4 - Comparação do Fator de Resistência ao Desgaste (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004) (referência: FRD=100, para a bola CM1 no ensaio D3)

Neste gráfico, os resultados são apresentados como Fator de Resistência ao Desgaste (**FRD**), calculado para cada material, tomando-se como referência o desempenho das bolas CM1, no ensaio D3. O **FRD** de cada material é calculado dividindo-se o valor da taxa de desgaste das bolas CM1 no ensaio D3 pelo valor da taxa de desgaste do material em questão. Dessa forma, o parâmetro FRD indica em que proporção o desempenho de cada material é melhor do que o das bolas CM1. Analisa-se também a variação de desempenho em diferentes ensaios para um mesmo material.

6. CONCLUSÕES

- ✓ Nos ensaios de desgaste, moendo minério de ferro em escala-piloto, a úmido em regime contínuo, simulando condições de operação em escala industrial, foram determinadas as taxas de desgaste de bolas de moinho de seis diferentes materiais, compreendendo: um ferro fundido branco comum coquilhado, dois aços alto carbono conformados mecanicamente e temperados e três ferros fundidos de alto cromo.
- ✓ A metodologia dos ensaios permitiu a determinação da redução do diâmetro das bolas com o tempo, obtendo-se das taxas de desgaste expressas como $\mu\text{m/h}$.
- ✓ Os ensaios mostraram-se repetitivos, obtendo-se valores de taxas de desgaste praticamente idênticos nos casos em que o mesmo material foi ensaiado duas ou três vezes.

- ✓ O ferro fundido branco de alto cromo CM2 apresentou desempenho destacado, com durabilidade cerca de 150% (2,5 vezes) maior em comparação com o material de pior desempenho.
- ✓ O segundo grupo em termos de desempenho também foi constituído por ferros fundidos brancos de alto cromo, os materiais CM4 e CM5, que apresentaram durabilidade entre 50 e 70% maior em comparação com o material de pior desempenho.
- ✓ O aço temperado CM6 apresentou desempenho cerca de 25% maior em comparação com o material de pior desempenho. Já o resultado do aço CM3 foi comparável ao do material de pior desempenho.
- ✓ O ferro fundido branco comum coquilhado, CMI, e o aço CM3 foram os materiais de pior desempenho. No caso do ferro fundido comum, este resultado é a consequência esperada de sua menor dureza e menor resistência à corrosão, por sua vez decorrentes da composição química e da microestrutura desse material. Já no caso do aço CM3, o baixo desempenho pôde ser correlacionado com sua fragilidade, que causou o aparecimento de trincas e lascamentos durante os ensaios.
- ✓ A utilização de um aditivo “inibidor de corrosão” só produziu efeito significativo no caso do material CM1, ferro fundido branco comum coquilhado. Este material é o único que apresentou corrosão generalizada nos ensaios de corrosão.
- ✓ A partir da medição da potência consumida pelo moinho durante os ensaios, foi possível determinar também taxas de desgaste expressas em termos de g/kWh.
- ✓ O ranking técnico obtido em laboratório é comparável ao dos testes industriais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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**. São Paulo, 1993. 297p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Albertin, E.; e Ambrósio Filho, F. **Ensaio de desgaste de bolas de ferro fundido de alto cromo em moinho de bolas de laboratório**. In: Simpósio de Metais Resistentes ao Desgaste, 3. Fortaleza, 1994. **Anais**. Fortaleza, 1994.
- Beraldo, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. Cap. 3 - Projeto e Construção de moinhos de barras e de bolas. p. 22-47
- Chaves, A. P.; e Peres, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. Britagem, peneiramento e moagem. São Paulo. Signus. 1999. p. 562-649.
- Cassola, M.S., Moraes, S. L.; e Albertin, A. **Ensaio de moagem piloto: referência para avaliação da taxa de desgaste de corpos moedores**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.1 n2, out.-dez. 2004. p 28-33
- 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. IPT, São Paulo, 1993
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Relatório nº 74638-205 - **Caracterização de Corpos Moedores - Bolas – Módulo III - Desgaste de Corpos Moedores em Moinho de Bolas**. Relatório final. IPT, São Paulo, 2005.
- Mascia, R. **Desenvolvimento e caracterização tribológica de materiais resistentes ao desgaste abrasivo para a indústria mineradora de cassiterita**. Uberlândia, 2002. 141p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia.
- Sepúlveda, J. **Recomendaciones prácticas para la evaluación de cuerpos moedores a escala industrial**. In: Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, 1., Ouro Preto, 1996. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 1996. p. 595-614