

Ensaaios de desgaste de bolas de ferro fundido de alto cromo em moinho de bolas de laboratório

Eduardo Albertin
Francisco Ambrózio Filho

Bolas de moinho de ferros fundidos brancos de alto cromo, com diferentes frações volumétricas de carbonetos, foram ensaiadas em um moinho de bolas de laboratório (diâmetro=40cm).

Foram controlados os parâmetros de operação, como: velocidade de rotação do moinho, porcentagem de sólidos na polpa, taxa de alimentação de minério, grau de enchimento do moinho e malha de moagem. A moagem foi contínua, a úmido, estendendo-se por cerca de 200 horas para cada ensaio. Foram realizados ensaios com abrasivos como minério de ferro, rocha fosfática e areia quartzosa.

Cada ferro fundido foi representado por 10 bolas de 50mm de diâmetro. Utilizou-se um código de furos nas bolas para identificar os diferentes materiais, permitindo ensaiá-los simultaneamente. Previamente aos ensaios com cada um dos 3 abrasivos, as bolas eram submetidas a um período de desgaste preliminar.

Foram efetuadas medidas de perdas de massa a cada dois dias de ensaio. A partir destes resultados, obtiveram-se retas de regressão do diâmetro das bolas em função do tempo de ensaio. A inclinação de cada reta expressa a taxa de desgaste do material respectivo.

Os resultados permitiram concluir que:

- 1) os ensaios em moinho de bolas apresentaram boa reprodutibilidade;*
- 2) foi possível ordenar os materiais ensaiados, de acordo com seus respectivos desempenhos nos ensaios, e correlacionar esta ordenação com as características microestruturais dos ferros fundidos;*
- 3) foi possível diferenciar os efeitos dos diferentes abrasivos.*

CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA Nº 2.428

III Seminário de Materiais Resistentes ao Desgaste/ABM, Fortaleza, 17-19 de outubro 1994

1. INTRODUÇÃO

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^[1]. Reconhece-se, entretanto, que esta validação em serviço é rara, devido à dificuldade, ou mesmo impossibilidade, de conseguir resultados confiáveis e reprodutivos nos ensaios de campo.

A literatura apresenta três abordagens, no que se refere ao estudo de materiais para corpos moedores:

a) Uso de testes de laboratório, procurando estabelecer de alguma forma comparações com desempenho em serviço. Nesta categoria enquadram-se os ensaios de pino contra lixa^[2] e os ensaios de trilha com lama abrasiva^[3]. Note-se que este último procura apresentar uma configuração de sistema de desgaste mais próxima da encontrada na prática de moagem:

abrasão a 3 corpos, a úmido, com moagem do abrasivo com dureza inferior à dos carbonetos.

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^[4], teste com bolas marcadas por atividade rotativa^[5-7] e testes com bolas marcadas com furos e entalhes^[8-10].

c) Uso de moinho de pequenas dimensões, um metro ou menos^[9,11-13]. Neste caso, consegue-se 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.

Também neste caso, busca-se fazer a validação por comparação com resultados de ensaios em serviço.

Eduardo Albertin, sócio da ABM. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT.
Francisco Ambrózio Filho, sócio da ABM. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN.

Encontra-se na literatura uma grande quantidade de resultados relativos ao efeito das variações microestruturais sobre a resistência ao desgaste dos ferros fundidos brancos de alto cromo (FFBAC). Têm sido verificados os efeitos de variações da matriz metálica, comparando-se, por exemplo, matrizes martensíticas, austeníticas ou perlíticas, e da quantidade e morfologia dos carbonetos. A grande maioria destes resultados 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 microestruturais dos materiais, ao mesmo tempo em que se verificam os efeitos devidos a variáveis operacionais, como dureza e granulometria dos abrasivos, bem como cargas e velocidades.

Entretanto, 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.

Por outro lado, são relativamente raros os resultados relativos aos FFBAC obtidos em ensaios em moinhos de bolas, sejam industriais ou de laboratório. Frequentemente, os resultados publicados referem-se a comparações entre materiais de diferentes tipos, de maneira que as hierarquias de desempenho estabelecidas geralmente são do tipo “aços vs. FFBAC”. Em outros casos, estabelecem-se comparações do tipo “fornecedor A vs. fornecedor B”. Embora muitos úteis do ponto de vista de cada usuário de corpos moedores, estes resultados não são generalizáveis, nem servem para se estabelecer mecanismos ou mesmo relações de causa e efeito. Além disso, nos ensaios realizados em campo (moinhos industriais) é extremamente difícil atender aos requisitos necessários para se garantir a reprodutibilidade dos resultados.

No presente trabalho visou-se estabelecer uma metodologia de ensaio de bolas em um moinho de laboratório, utilizando-a para determinar o efeito da fração volumétrica de carbonetos e do tipo de abrasivo sobre a resistência ao desgaste de FFBAC.

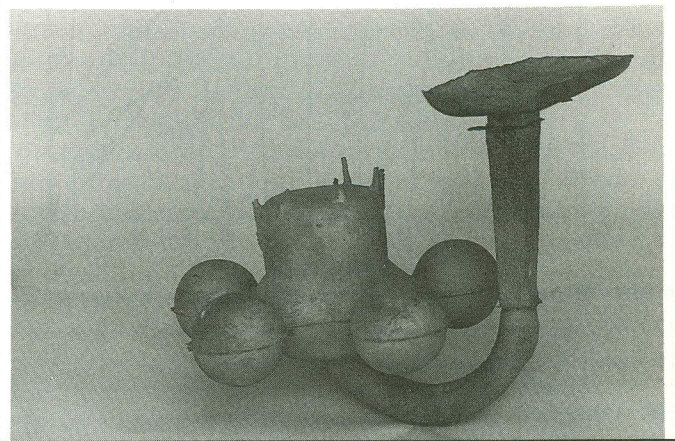
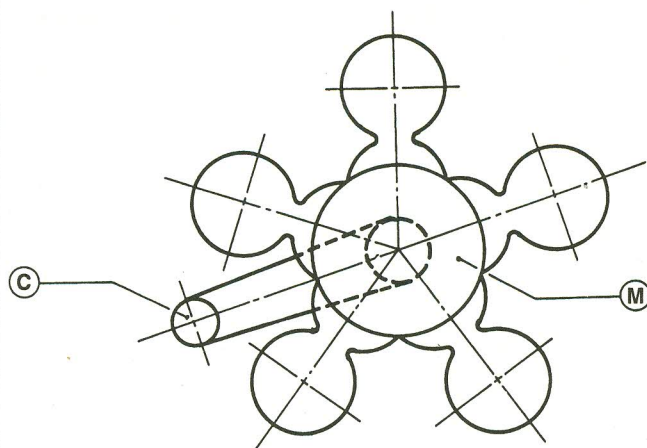
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Corpos de prova fundidos

Como corpos de prova foram utilizadas bolas fundidas com 50mm de diâmetro. Estas bolas são representativas de uma parcela importante daquelas empregadas industrialmente, principalmente na moagem fina.

O projeto de fundição e os cachos fundidos obtidos são apresentados na figura 1. Esta maneira de fundir as bolas permitiu a obtenção de condições idênticas de resfriamento e solidificação para todas as bolas em cada molde. Deve-se frisar a importância deste procedimento, uma vez que a microestrutura de solidificação dos FFBAC é bastante sensível à velocidade de resfriamento. Os processos de fundição utilizados normalmente na prática industrial resultam em grandes diferenças de condições de resfriamento de peça para peça e, portanto, em significativas variações microestruturais em um mesmo lote de bolas. Desta maneira, grandes dispersões de valores poderiam ocorrer nos resultados dos ensaios de desgaste, dificultando ou impedindo a

Figura 1. Esquema do modelo de fundição e cacho de bolas fundidas.



avaliação dos efeitos devidos às variações microestruturais planejadas na pesquisa.

Foram preparadas corridas com seis composições químicas, incluindo desde uma composição correspondente à da matriz típica de um FFBAC, à qual se denominou “aço-matriz”, até um FFBAC hipereutético. Os resultados das análises químicas encontram-se na tabela 1.

Na figura 2 as composições estudadas são apresentadas sobre a projeção da superfície liquidus do sistema Fe-Cr-C.

Os tratamentos térmicos efetuados são descritos no quadro abaixo.

Tabela 1 - Resultado das análises químicas

Ligas	Composição química(%)			
	Cr	C	Si	Mn
Aço	8,0	0,80	1,10	1,30
A	12,2	1,65	0,37	1,33
B	15,6	2,21	0,47	1,22
C	18,0	2,96	0,96	1,50
D	20,8	3,34	0,38	1,12
E	25,1	3,54	0,46	1,20

O teor de enxofre manteve-se em 0,019% em todas as ligas.

O teor de fósforo manteve-se em torno de 0,040%.

Figura 2. Composições químicas das ligas sobre a superfície liquidus do sistema ternário Fe-Cr-C.

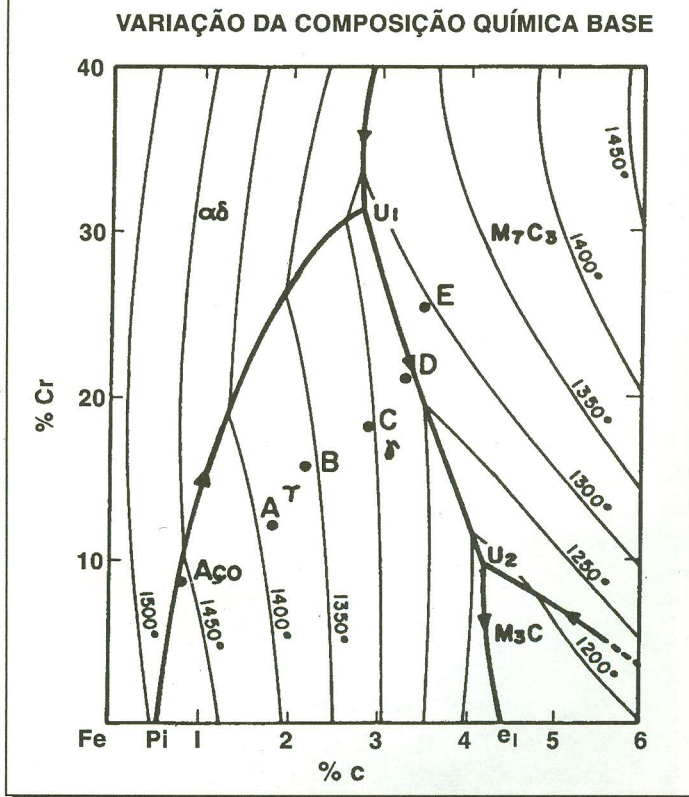


Figura 3. Liga A. Ataque profundo para remoção da matriz. MEV.

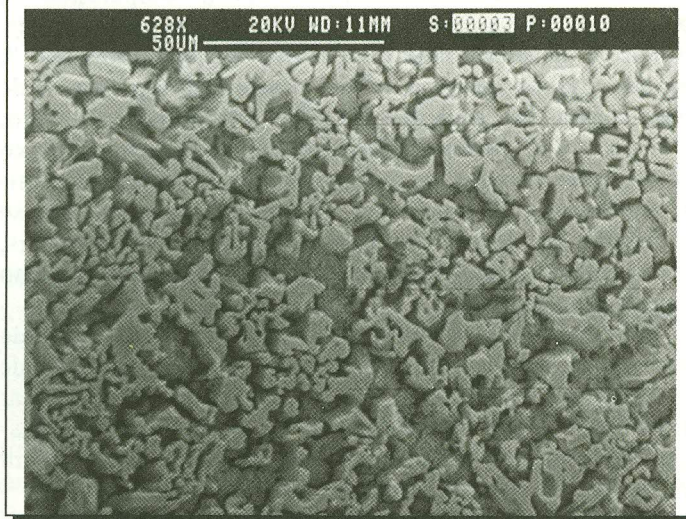
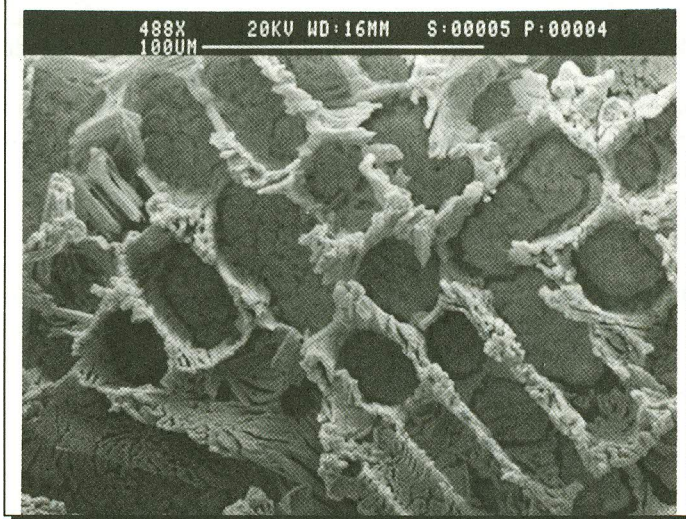


Figura 4. Liga C. Ataque profundo para remoção da matriz. MEV.



Quadro - Tratamentos Térmicos

Designação	Descrição
TR*	700°C; 1h, 950°C, 5h, resfriamento em ar soprado, revenido 1h, 250°C, tratamento em nitrogênio líquido, revenido 1h, 250°C.
AM**	solubilização a 1150°C, 1h; resfriamento ao ar até 950°C, manutenção a 950°C por 16h, resfriamento em óleo, tratamento em nitrogênio líquido; revenido a 250°C, 2h.

*tratamento aplicado aos FFBC.

**tratamento aplicado ao aço-matriz.

As figuras 3 a 7 apresentam a gama de microestruturas dos materiais utilizados nos ensaios de desgaste.

Abrasivos

Foram utilizados como abrasivos: minério de ferro, minério de fosfato e areia quartzosa.

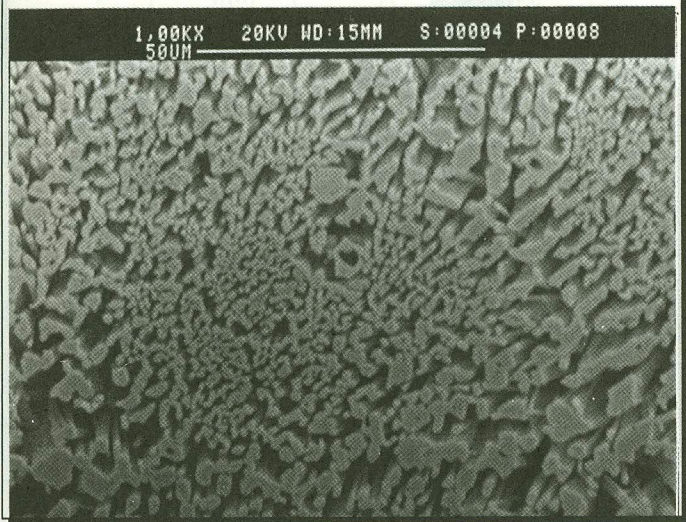
O minério de ferro, designado simplesmente "Hematita" no decorrer deste trabalho, foi fornecido pela Samarco Mineração S.A., sendo proveniente da mina de Germano. Este minério constitui a alimentação da remoagem, sendo destinado à produção de pelotas. Sua composição é essencialmente de óxido de ferro, hematita, apresentando como contaminantes sílica livre e argila.

O minério de fosfato ou rocha fosfática, designado como "Apatita" ao longo deste trabalho, foi fornecido pela Fوسفertil - Fertilizantes Fosfatados S.A., sendo proveniente da mina de Tapira. O material provém da alimentação da-remoagem. A

Tabela 2 - Composição mineralógica do minério de fosfato.

Mineral	Peso(%)
Apatita	19
Anatásio	2
Perovskita	10
Opacos	5
Magnetita	18
Agregados	2
Calcita	3
Piroxênio	14
Mica-Argila	20
Serpentina	1
Sílex	5

Figura 5. Liga D. Ataque profundo para remoção da matriz. MEV.



composição mineralógica típica, informada pela empresa, é apresentada na Tabela 2.

A areia quartzosa, designada simplesmente “Quartzo”, foi fornecida pela Mineração Jundu, de Descalvado (SP), sendo uma areia de fundição “fina” típica, correspondente à classificação de módulo AFS 90/100. É constituída essencialmente de quartzo, com menos de 1% de impurezas.

Para realização dos períodos de desgaste preliminar (*run in*), utilizou-se uma areia “grossa”, fornecida pela Divisão de Construção Civil do IPT.

As análises granulométricas dos abrasivos na alimentação e na saída do moinho (produto de moagem) aparecem na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta valores de *work index*, W_i , e de durezas típicas dos abrasivos. As formas e tamanhos dos abrasivos utilizados nos ensaios de desgaste são ilustrados na figura 8.

Figura 6. Liga E. Ataque profundo para remoção da matriz. MEV.

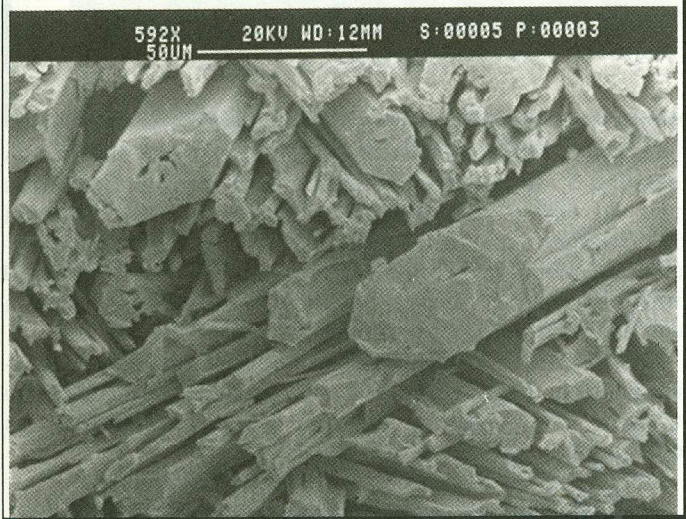


Figura 7. Aço matriz, 1000x.



Ensaio de desgaste

Utilizou-se moagem a úmido, contínua, em moinho de laboratório, ensaiando-se simultaneamente bolas das diferentes condições metalúrgicas. Para isto, utilizaram-se bolas identificadas por códigos de furos, em lotes de 12 bolas de cada tipo.

Os ensaios foram efetuados em moinho de bolas de laboratório, marca Denver. Esse moinho possui uma câmara de moagem de 40cm de diâmetro por 40cm de comprimento, com revestimento liso de chapa de aço. Sua capacidade de processamento é de aproximadamente 70Kg/h.

Durante os ensaios, a carga, incluindo polpa e corpos moedores, ocupava cerca de 40% do volume do moinho. A operação foi em regime contínuo, a úmido, com velocidade de 53rpm, correspondente a 70% da velocidade crítica.

A carga inicial de bolas foi constituída de:

- 27kg de bolas de 25mm de diâmetro (aproximadamente 400 bolas)
- 27kg de bolas de 35mm de diâmetro (aproximadamente 160 bolas)
- 71kg de bolas de 50mm de diâmetro (144 bolas)

As bolas de 25mm e de 35mm foram fundidas em ferro fundido branco de alto cromo, mas não foram caracterizadas detalhadamente, por não serem objeto de ensaio.

As 144 bolas de 50mm de diâmetro eram constituídas por grupos de 12 bolas, correspondentes a diferentes condições metalúrgicas. Utilizou-se uma carga nova de bolas de 50mm de diâmetro para cada abrasivo estudado.

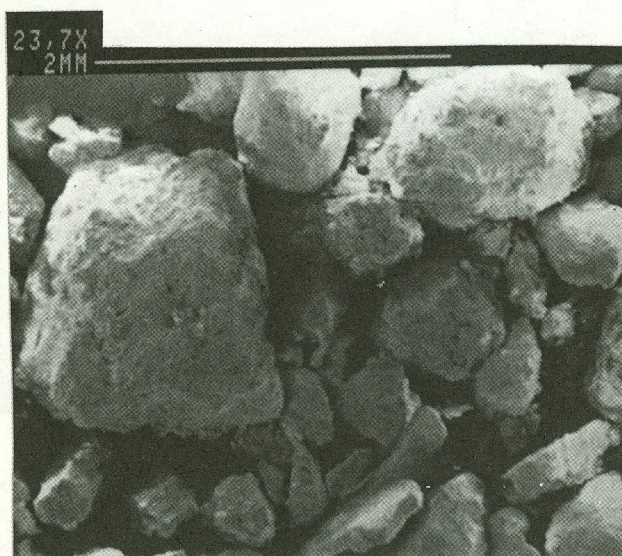
Para poder ensaiar simultaneamente todas as bolas utilizou-se um código com 1, 2 ou 3 furos de 3mm de diâmetro e 4mm de profundidade, em disposições geométricas facilmente identificáveis.

Em todos os ensaios efetuou-se um período preliminar de moagem, designado geralmente como *run in* na literatura de ensaios de desgaste. Este desgaste preliminar é essencial para se conseguir:

- remover heterogeneidades superficiais decorrentes dos processos de fundição e tratamento térmico;
- remover a estrutura coquilhada presente em bolas de algumas composições.

Com relação ao segundo item, foram medidas regiões coquilhadas estendendo-se até cerca de 200 μ m a partir da superfície, para algumas composições. Do ponto de vista da metodologia

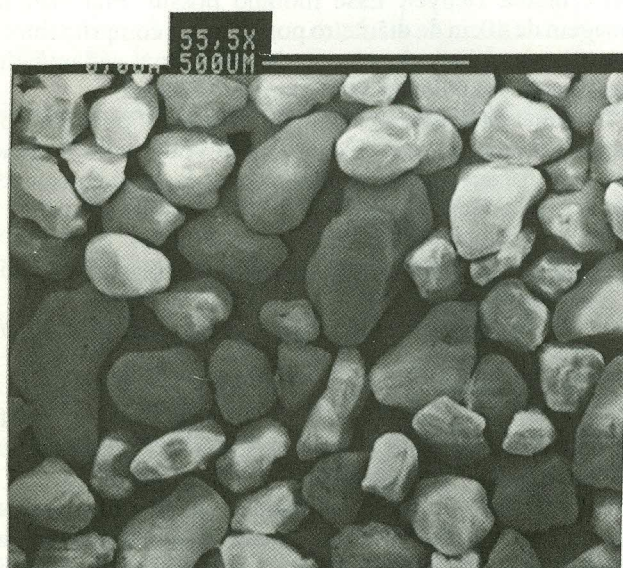
Figura 8. Aspecto típico dos órgãos dos abrasivos. (a) Apatita-alimentação; (b) Hematita-alimentação; (c) Quartzo-alimentação; (d) "run-in"-alimentação.



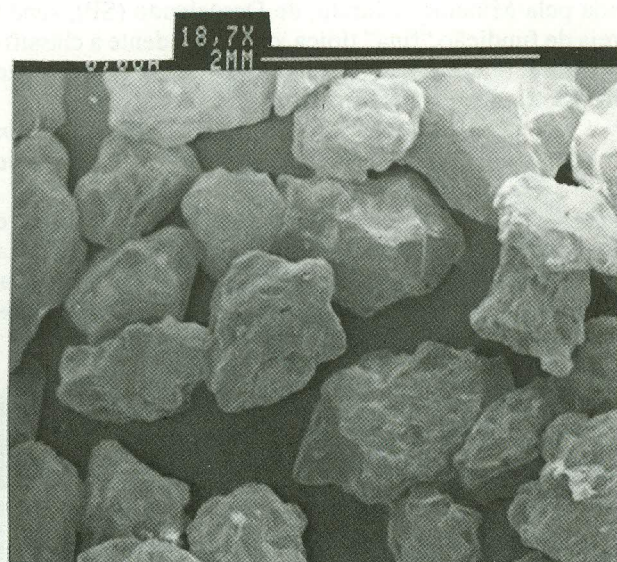
(a)



(b)



(c)



(d)

do ensaio, considerou-se importante remover esta região, visto que em condições de uso industrial de bolas fundidas a região coquilhada responde por uma parcela muito pequena da vida útil da bola, que se prolonga por meses. Pode-se afirmar que praticamente todo o desgaste nestas condições ocorre na região de solidificação colunar. Já em um ensaio de laboratório, restrito a no máximo algumas centenas de horas de moagem, uma parcela grande, eventualmente majoritária, do desgaste ocorreria na região coquilhada, comprometendo a transferibilidade dos resultados.

Com base no exposto acima, adotou-se como meta do *run in* a remoção da região coquilhada. Como critério complementar, considerou-se que o *run in* estaria completado ao atingir-se uma taxa de desgaste estável para todas as ligas ensaiadas.

Os *run in* estenderam-se por 40 horas antes do ensaio com hematita, 55 horas antes do ensaio com apatita, e 30 horas antes do ensaio com quartzo. Verificou-se que, após um rápido desgaste inicial, a velocidade de desgaste estabilizava-se. Resultados típicos são mostrados na figura 9. A figura 10 mostra bolas antes e depois do *run in*, podendo-se observar a suavização da rugosidade superficial.

Nos ensaios de moagem, utilizou-se o sistema de alimentação, controle de granulometria e recirculação esquematizado na figura 11. A figura 12 mostra a área de trabalho e os equipamentos utilizados.

Um ciclo típico de ensaio de moagem compreendia:

- operação do moinho por dois dias, ininterruptamente;

Tabela 3 - Análise granulométrica dos abrasivos.

Malha		"Run in"		Apatita		Hematita		Quartzo	
#	mm	A*	P.M.*	A*	P.M.*	A*	P.M.**	A*	P.M.**
4	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3,4	-	-	2,84	1,77	-	-	-	-
8	2,4	-	-	8,88	5,10	-	-	-	-
10	1,7	-	-	12,62	6,84	-	-	-	-
14	1,2	1,54	-	25,49	11,73	-	-	-	-
16	1,0	-	-	-	-	0,08	-	-	-
20	0,84	34,01	4,91	36,68	15,75	0,23	-	-	-
28	0,60	48,34	5,41	-	-	-	-	-	-
35	0,42	72,82	32,15	54,24	25,73	1,34	-	1,59	0,28
48	0,30	82,25	45,93	59,03	30,74	2,48	0,46	5,08	1,23
65	0,21	88,11	60,66	64,97	40,20	4,31	1,00	17,45	5,23
100	0,150	90,36	75,74	71,54	55,75	9,20	3,62	67,87	40,43
150	0,105	96,36	83,81	76,11	67,64	17,20	11,42	93,97	72,18
200	0,075	98,91	88,70	79,91	75,92	31,59	27,31	99,26	86,51
270	0,053	99,65	92,27	83,39	81,91	48,34	49,11	100,00	92,47
325	0,044	100,00	100,00	100,00	-	71,71	67,15	-	-
400	0,037	-	-	-	83,49	84,18	73,29	-	93,26
<400	<0,037	-	-	-	100,00	100,00	100,00	-	100,00

A=Alimentação do moinho

P.M.=Produto de moagem

(*)média de 2 determinações

(**)média de 3 determinações

(-)peneira não utilizada na análise granulométrica

Tabela 4 - Características dos abrasivos, Wi e dureza

Minério	Wi(kwh/sht)	Dureza HV
Apatita	13,6	300(*)
Hematita	12,4	400 a 600
Quartzo	14,4	1000

(*) A rocha fosfática é composta de vários minerais, a maioria de menor dureza que a apatita, como argilas e silicatos. Com dureza maior encontra-se a magnetita (400 a 600 HV) e sílex, este presente em pequena quantidade.

- parada do moinho e remoção das bolas;
- lavagem das bolas em água corrente, seguindo-se limpeza em ultrassom com acetona, e secagem;
- identificação das bolas pelos códigos de furo;
- pesagem individual das bolas (10 a 12 de cada tipo) em balança eletrônica, com precisão até centésimos de grama;
- recarregamento das bolas no moinho e estabilização do sistema de alimentação, classificação e recirculação de minério.

As condições de operação para cada minério foram as seguintes:

minério de ferro:

- tempo de *run in* (com areia grossa): 40h
- taxa de alimentação do minério novo: 70Kg/h
- %sólido da alimentação (novo+under flow): 60%

- malha de moagem: 325 mesh
- tempo total de moagem: 179h
- quantidade moída: 15t
- pH da polpa na saída do moinho: 7,2

minério de fosfato:

- tempo de *run in*: 55h
- taxa de alimentação do minério novo: 50Kg/h
- %sólido da alimentação (novo+under flow): 60%
- malha de moagem: 65 mesh
- tempo total de moagem: 171h
- quantidade moída: 10t
- pH da polpa na saída do moinho: 6,5

areia quartzosa 90/100 AFS

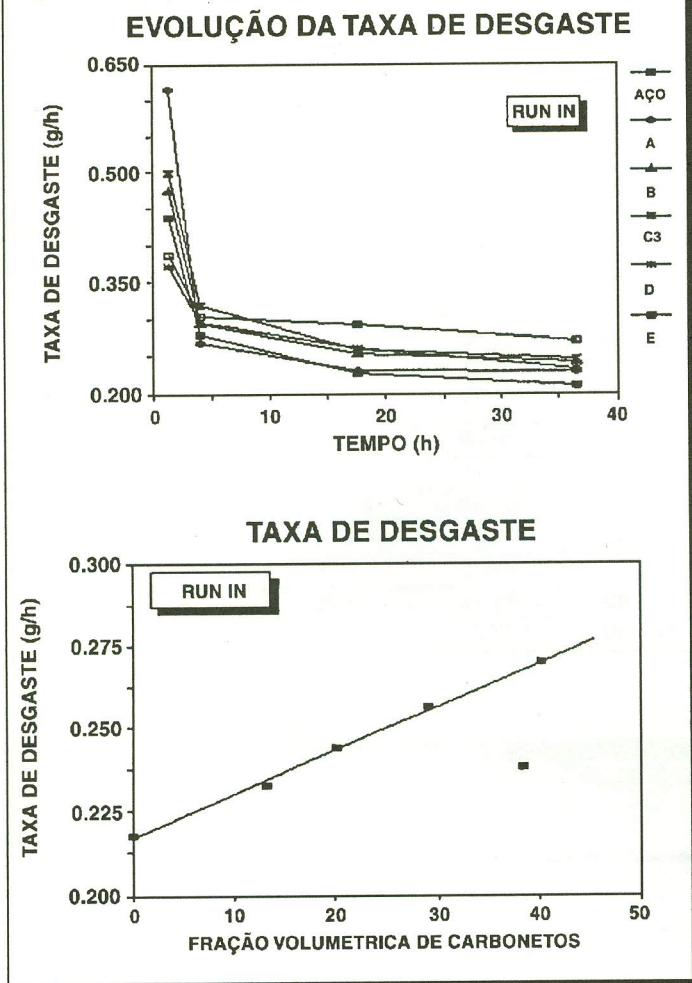
- tempo de *run in* (com areia grossa): 30h
- taxa de alimentação de areia nova: 70Kg/h
- %sólido da alimentação: 60%
- malha de moagem: 325 mesh
- tempo total de moagem: 207h
- quantidade: 15t
- pH da polpa na saída do moinho: 6,0

Caracterizações dos materiais

A caracterização dos corpos de prova no estado anterior aos ensaios de desgaste consistiu de análises químicas, exames metalográficos qualitativos e quantitativos, determinação das densidades e ensaios de dureza.

As micrografias apresentadas correspondem a posições cerca de 1mm abaixo da superfície, sendo representativas dos materiais que vieram a ser desgastados nos ensaios

Figura 9. Taxas de desgaste durante o "run in".
(a) evolução durante o "run in"; (b) taxa final, série Vvk.



abrasivos. Nestas mesmas posições foram realizadas as determinações de metalografia quantitativa. Foram efetuadas contagens das frações volumétricas de carboneto (Vvk) e de eutético (VvE) e mediram-se os números de interseções destes constituintes com uma linha, NKL e NLE.

Algumas amostras representativas dos materiais estudados foram examinadas quanto à presença de austenita retida, através de difratometria de raios-X, verificando-se que este constituinte foi praticamente eliminado pelos tratamentos térmicos efetuados.

Foram determinadas as durezas Rockwell C das bolas nas seguintes condições: após o tratamento térmico, depois da realização de um desgaste preliminar (*run in*), no meio do ensaio de desgaste e no fim do ensaio de desgaste. Essas medidas foram tomadas diretamente sobre a superfície das bolas, sem que fossem efetuados cortes nas amostras. Dessa forma pôde-se avaliar o efeito de encruamento provocado pela interação das superfícies de desgaste com os abrasivos.

Superfícies de desgaste foram observadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), visando-se verificar sobretudo evidências do tipo de interação entre abrasivos e superfícies metálicas.

3. RESULTADOS

Caracterização dos materiais

A Tabela 5 apresenta os resultados de metalografia quantitativa, relativos à estrutura de solidificação das ligas. A tabela 6 apresenta parâmetros microestruturais derivados daqueles apresentados na tabela anterior.

Os valores de densidade são apresentados na tabela 7. As tabelas 8(a), (b) e (c) apresentam os resultados de medidas de dureza Rockwell C, efetuadas na superfície das bolas, relativos ao ensaio com, respectivamente, Hematita, Apatita e Quartzo.

Resultados dos ensaios de desgaste em moinho

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam os valores médios das perdas de massa de cada tipo de bola acumuladas ao longo dos ensaios com, respectivamente, Apatita, Hematita e Quartzo.

As perdas finais acumuladas, correspondem à última coluna das tabelas e são apresentadas nos gráficos das figuras 13, 14 e 15, nos quais foram incluídos os respectivos intervalos de confiança.

Figura 10. Aspecto superficial das bolas antes e depois do "run in".

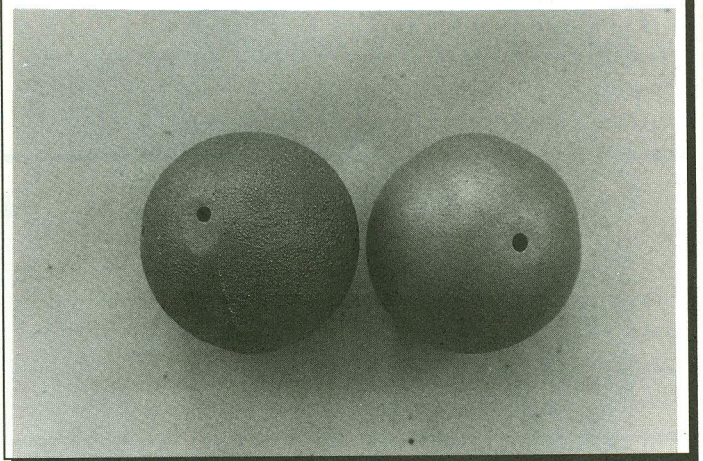
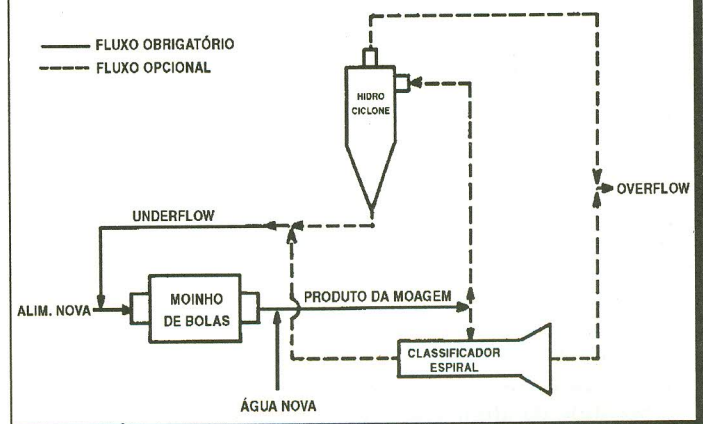


Figura 11. Esquema do sistema de alimentação, controle e recirculação dos abrasivos durante a moagem.



4. DISCUSSÃO

Uma consideração preliminar importante diz respeito à lei de desgaste de bolas com o tempo. A maioria dos autores^{4, 6-10} considera válido o modelo segundo o qual a perda de massa ocorre proporcionalmente à superfície da bola em cada instante, o que resulta na expressão:

$$\frac{dm}{dt} = -k \cdot \phi^2$$

onde ϕ é o diâmetro da bola num dado instante.

Este modelo leva a uma equação linear da diminuição do diâmetro com o tempo de moagem:

$$\phi = \phi_0 - k \cdot t$$

onde ϕ_0 é o diâmetro original da bola.

Tabela 5 - Resultados de metalografia quantitativa.

LIGA	Vvk (%)	Vve (%)	N _{LK} (mm ⁻¹)	N _{LCE} (mm ⁻¹)
A	13,10	26,27	48	22
B	20,09	44,00	64	22
C	28,92	57,80	80	18
D	38,30	-	132	4
E	40,77	-	4,1*	-

Vvk= fração volumétrica de carbonetos

Vve= fração volumétrica de eutético

N_{LK}= número de intersecções de áreas de carboneto por unidade de comprimento

N_{LCE}= número de intersecções de áreas de eutético por unidade de comprimento

* carbonetos pró-eutéticos

Os resultados de Norman e Loeb^[9], Vermeulen^[14], Nordquist e Moeller^[10], Barros e colaboradores^[8], entre outros, ajustam-se bem a este modelo, que se torna muito conveniente ao permitir expressar-se a qualidade de um material diretamente pelo valor da parâmetro k da equação acima. A

Tabela 6 - Parâmetros microestruturais derivados

Liga	Vvm (%)	VvD (%)	λ (μ m)	λ^{-1} (mm ⁻¹)	N _{LKE} (mm ⁻¹)	d (μ m)	dCE (μ m)
A	86,90	73,73	18,1	55,2	183	2,7	11,8
B	79,91	56,00	12,5	80,0	145	3,1	20
C	71,08	42,20	8,9	112	138	3,6	32
D	61,70	0	4,7	213	132	2,9	250
E	59,23	0	-	-	-	-	-

Vvm= 1 - Vvk (= fração volumétrica de matriz)

VvD= 1 - Vve (= fração volumétrica de dendritas)

$\lambda = (1 - Vvk)/N_{LK}$ (= caminho livre médio na matriz)

N_{LKE}= N_{LK}/Vve (= número de intersecções de áreas de carbonetos por unidade de comprimento, nas regiões eutéticas).

d= Vvk/N_{LK}(= tamanho médio das intersecções de carboneto)

dCE= VVE/N_{LCE} (= tamanho médio dos interceptos de células eutéticas)

Tabela 7 - Densidades das ligas

Liga	densidade g/cm ³
aço matriz	7,64
A	7,61
B	7,55
C	7,48
D	7,50
E	7,47

Tabela 8a - Resultados de dureza Rockwell C na superfície das bolas - ensaio com Hematita.

LIGA	dureza (HRC)			
	inicial	pós run-in	meio do ensaio	fim do ensaio
Aço	56,9 (0,7*)	62,9 (1,4)	61,9 (0,9)	63,2 (0,7)
A	56,6 (0,6)	58,3 (1,6)	61,9 (1,3)	60,9 (1,2)
B	60,6 (0,4)	61,0 (1,8)	62,7 (1,2)	64,7 (0,9)
C	64,5 (08)	64,4 (1,0)	66,9 (3,5)	65,6 (2,0)
D	65,1 (0,5)	65,0 (1,3)	66,1 (1,6)	65,8 (3,1)
E	62,6 (1,9)	62,2 (1,5)	63,6 (1,1)	63,0 (1,2)

(*) = desvio - padrão

Tabela 8b - Resultados de dureza Rockwell C na superfície das bolas - ensaio com Apatita.

LIGA	dureza (HRC)			
	inicial	pós run-in	meio do ensaio	fim do ensaio
Aço	56,9 (0,7*)	62,3 (0,9)	64,0 (1,2)	63,6 (1,1)
A	56,6 (0,6)	57,0 (0,9)	60,5 (1,7)	60,9 (1,0)
B	60,6 (0,4)	61,0 (2,1)	62,1 (0,5)	64,3 (1,8)
C	64,5 (08)	65,8 (1,2)	65,8 (1,0)	67,7 (1,2)
D	65,1 (0,5)	64,7 (0,6)	65,3 (1,2)	66,9 (1,5)
E	62,6 (1,9)	62,2 (1,2)	63,6 (0,7)	63,5 (1,0)

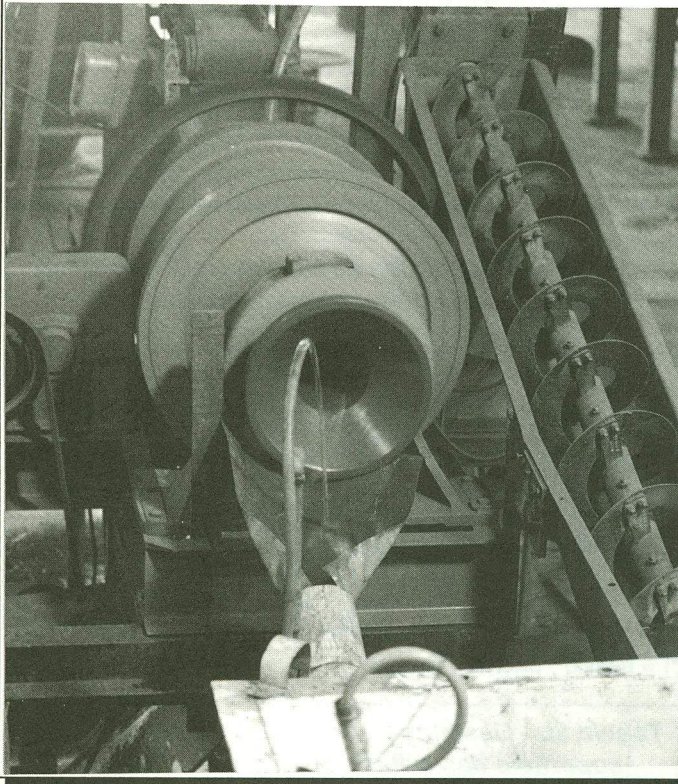
Tabela 8c - Resultados de dureza Rockwell C na superfície das bolas - ensaio com Quartzo.

LIGA	dureza (HRC)			
	inicial	pós run-in	meio do ensaio	fim do ensaio
Aço	60,4 (1,2*)	64,6 (1,0)	64,1 (0,9)	63,2 (0,6)
A	56,6 (0,6)	58,3 (1,9)	55,4 (1,2)	59,8 (0,9)
B	60,6 (0,4)	63,1 (1,4)	62,6 (10,3)	61,9 (0,9)
C	63,6 (04)	65,1 (1,2)	64,8 (1,6)	62,3 (1,6)
D	65,1 (0,5)	65,1 (1,6)	66,1 (1,0)	64,9 (0,8)
E	62,6 (1,9)	63,3 (1,1)	60,9 (1,0)	60,9 (1,0)

validade do modelo de desgaste é proporcional à superfície implica que o desgaste ocorre como consequência de ações na superfície, sejam exclusivamente de abrasão ou com participação de corrosão.

Algumas condições operacionais podem, entretanto, resultar em taxas de desgaste proporcionais ao volume ou massa

Figura 12. Moinho de Laboratório utilizado nos ensaios de desgaste.



das bolas, devido a elevados valores de energia cinética nas interações entre bolas, revestimento e abrasivos. Estas condições incluem velocidades elevadas do moinho (regime de catarata), grandes diâmetros de moinho ou de bolas e baixa percentagem de sólidos na polpa.

Um aspecto importante do sistema tribológico diz respeito

Figura 13. Perda de massa final com intervalo de confiança (Apatita).

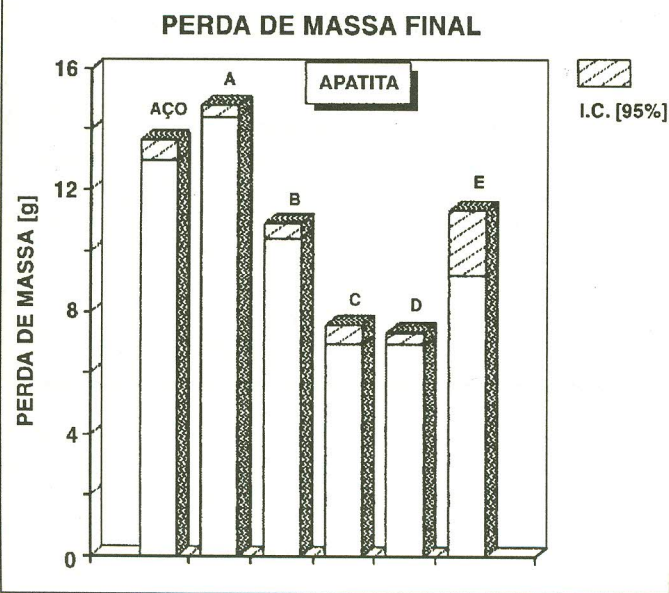


Tabela 9 - Perdas de massa médias acumuladas MOAGEM DE APATITA

Liga	Perdas de massa acumuladas, g				
	11,25h	35,67h	80,67h	126,67h	170,92h
Aço	0,68	2,28	5,88	9,52	13,31
A	0,83	2,90	6,88	10,74	14,57
B	0,49	1,90	4,79	7,62	10,66
C	0,39	1,37	3,34	5,21	7,28
D	0,34	1,29	3,26	5,10	7,16
E	0,45	1,80	4,48	7,19	10,27

Tabela 10 - Perdas de massa médias acumuladas MOAGEM COM HEMATITA

Liga	Perdas de massa acumuladas, g				
	21,17h	65,67h	111,0h	144,92h	182,42h
Aço	2,15	6,61	11,28	14,52	18,77
A	2,35	7,08	11,95	15,33	19,56
B	1,98	6,10	10,37	13,46	17,26
C	1,89	5,76	9,60	12,52	15,97
D	1,62	4,84	8,14	10,62	13,57
E	2,03	6,25	10,59	13,93	17,93

Tabela 11 - Perdas de massa médias acumuladas MOAGEM COM QUARTZO

Liga	Perdas de massa médias acumuladas, g			
	24,0h	114,17h	160,92h	206,92h
Aço	4,59	21,86	30,88	39,34
A	5,13	24,18	33,79	42,55
B	5,24	24,89	34,19	43,44
C	5,45	25,65	36,08	45,60
D	4,99	23,72	33,35	42,12
E	6,06	28,77	39,25	50,59

à forma de interação entre abrasivos e corpos. No caso de um moinho de bolas, trata-se, evidentemente, de um sistema a três corpos. Entretanto, supõe-se que a moagem dos grãos ocorre devido a interações com forte componente perpendicular às superfícies das bolas^[15,16]. Por este motivo, procurou-se observar nas superfícies desgastadas se havia também sinais de uma participação importante de deslizamento. Esta distinção é importante na medida em que o sulcamento sem deslizamento seria menos propício à remoção de material por corte, enfatizando os mecanismos de micrografia e microtrincamento.

Nas figuras 16 a 18 encontram-se registros fotográficos de superfícies desgastadas, observadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nelas, verificaram-se várias formas de interação superficial, sem se poder destacar uma como predominante.

Conclui-se das observações efetuadas que nas condições de ensaio ocorrem interações entre abrasivo e superfície tanto através de deslizamento quanto através de movimentos na direção perpendicular à superfície. Observam-se, de ma-

Figura 14. Perda de massa final com intervalo de confiança (Hematita).

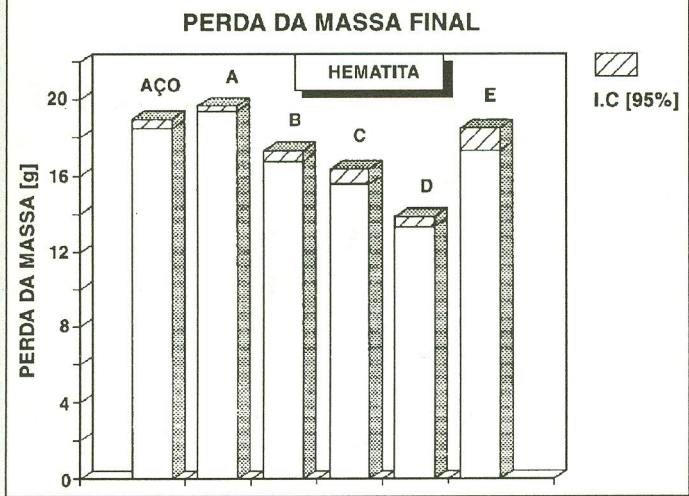
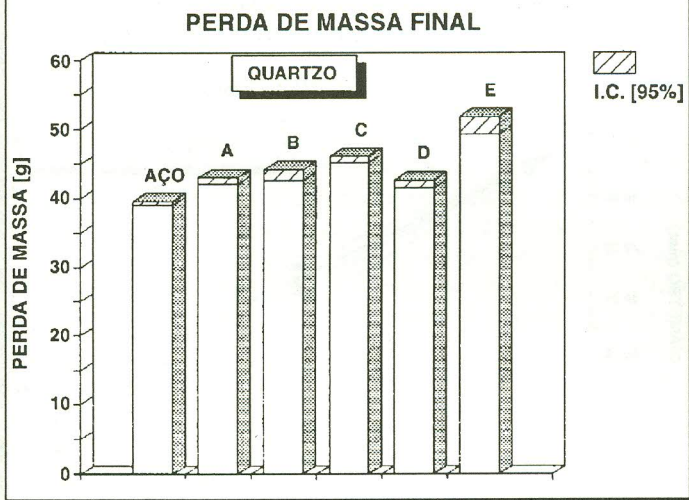


Figura 15. Perda de massa final com intervalo de confiança (Quartzo).



neira geral, os mesmos danos superficiais descritos na literatura relativa a outros tipos de ensaio, como pino contra lixa, roda de borracha e trilha, embora, naturalmente, os eventos não tenham a direcionalidade comumente observada naqueles ensaios.

Os resultados apresentados nas tabelas 9 a 11 e nas figuras 13 a 15 mostram tendências nítidas. Os gráficos relativos às perdas de massa finais, com os respectivos intervalos de confiança, mostram que foi possível medir diferenças significativas entre os desempenhos dos diversos materiais.

Tendo em vista a discussão apresentada acima, referente à lei de desgaste das bolas, considerou-se mais apropriado analisar o desgaste, convertendo-se os resultados de perdas de massa para variações de diâmetro. Desta forma, obtêm-se taxas de desgaste, **K**, que podem ser comparadas com valores publicados, como os de Carpinetti Costa^[11] Leiva e Estay^[7] e Barros^[8].

Além disso, os valores de **K** são independentes do diâmetro das bolas, facilitando as comparações.

Os gráficos das figuras 19 a 21 mostram as variações de diâmetro com o tempo. As retas de regressão ajustaram-se

muito bem aos pontos experimentais. Mesmo considerando-se o pequeno número de observações, é expressivo o fato de que os valores dos coeficientes de determinação (r^2) mantiveram-se praticamente iguais a 1. Pode-se afirmar com base nestes resultados que os ensaios atenderam aos requisitos propostos por Avery^[1], no que diz respeito à reprodutibilidade e capacidade de "rankear" ligas.

Desta forma, foi possível quantificar o desempenho dos materiais através dos coeficientes angulares, **K**, das retas, que expressam as respectivas taxas de desgaste.

A Tabela 12 apresenta os valores de taxas de desgaste obtidos para as diversas ligas e abrasivos, na série Vvk. A figura 22 mostra as taxas de desgaste em função da Vvk.

As tendências mostradas pelo gráfico são muito claras, podendo-se observar que:

a) As taxas de desgaste no ensaio com Quartzo foram muito superiores às verificadas nos demais ensaios.

Figura 16. Superfícies desgastadas com quartzo. Liga A.

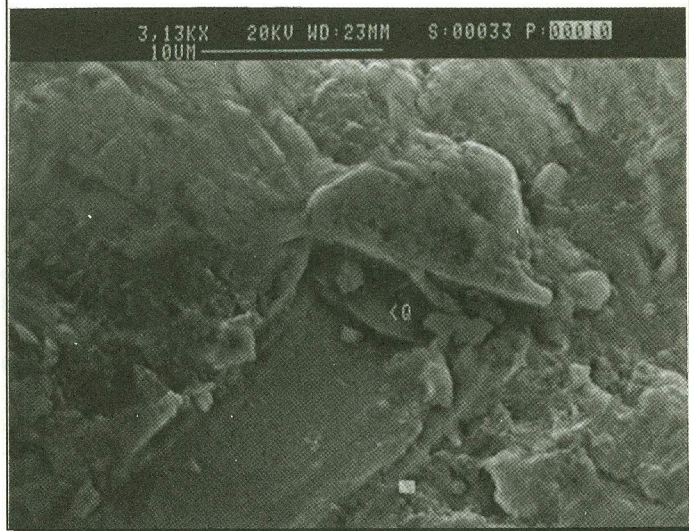


Figura 17. Superfícies desgastadas com Apatita. Liga A.

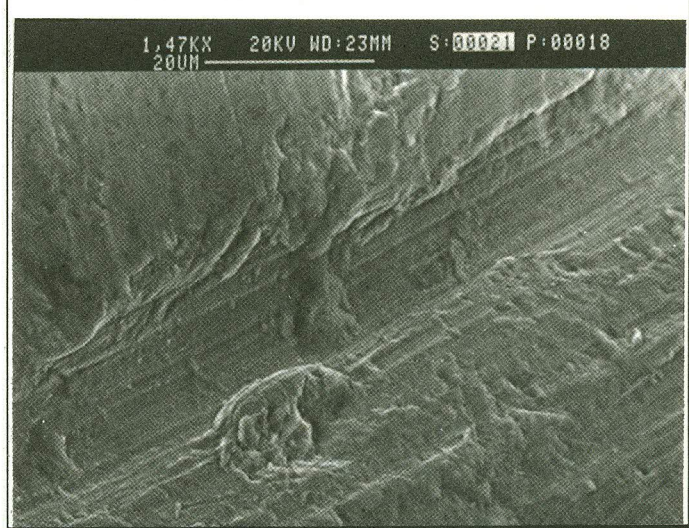
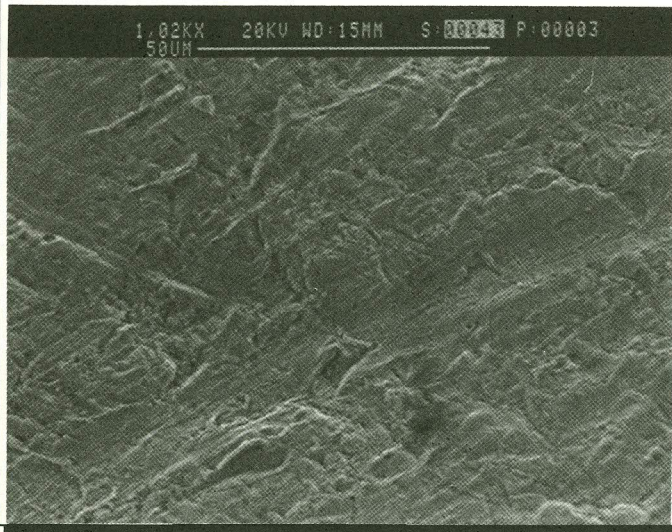


Figura 18. Superfícies desgastadas com Quartzo. Liga E.



b) Nos ensaios com Apatita ou Hematita, a evolução do comportamento das ligas com o aumento da Vvk foi muito semelhante, com maiores taxas de desgaste para a segunda. Nestes ensaios, os FFBAC apresentaram melhora gradual da resistência ao desgaste à medida que a Vvk aumentou, até a liga eutética. Desta liga para a hipereutética houve súbito aumento da taxa de desgaste quando se passa do aço-matriz para a liga A.

c) Ao contrário dos demais abrasivos, o quartzo provocou desgaste tanto mais rápido quanto maior a Vvk. A liga eutética fugiu à tendência geral, mostrando uma resistência ao desgaste comparável à da liga de mais baixa Vvk.

É interessante comparar os resultados do ensaio com Apatita com aqueles do trabalho de Barros e colaboradores⁸, principalmente considerando que na pesquisa foi utilizada uma amostra de minério fornecida pela mesma empresa que realizou o trabalho citado.

Figura 19. Diminuição do diâmetro com o tempo de ensaio. Moagem de Apatita.

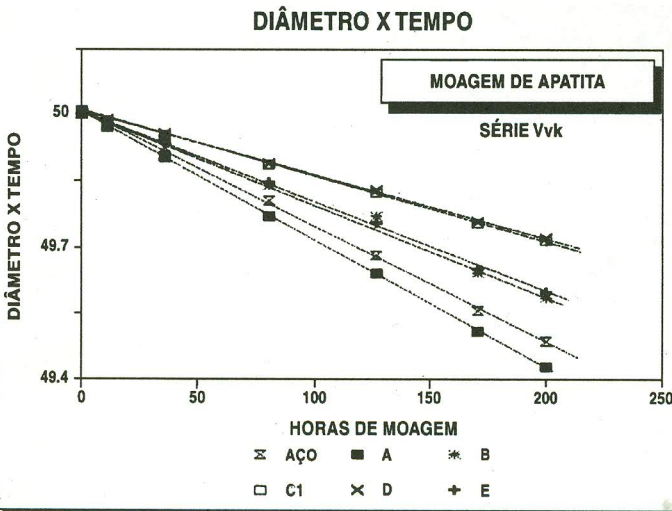


Figura 20. Diminuição do diâmetro com o tempo de ensaio. Moagem de Hematita.

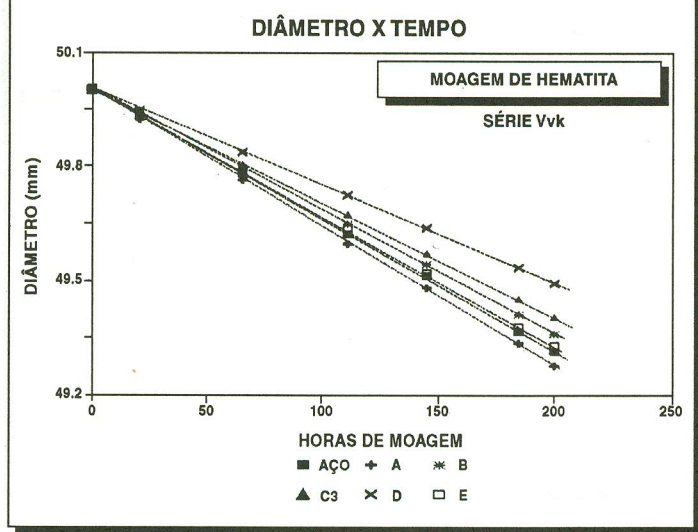
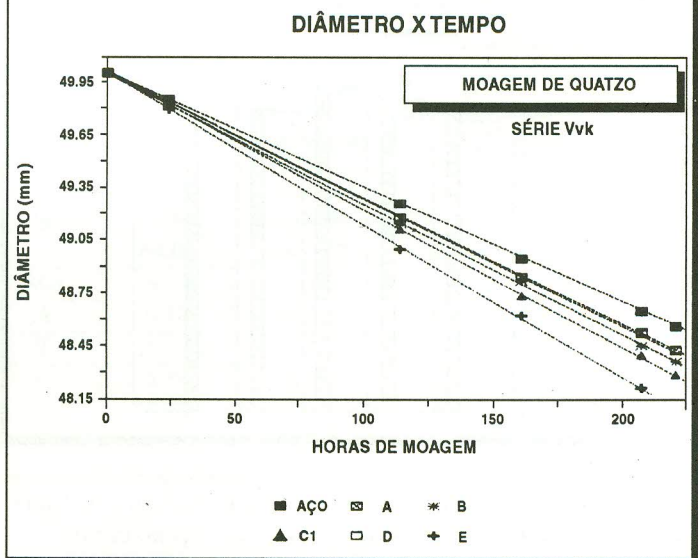
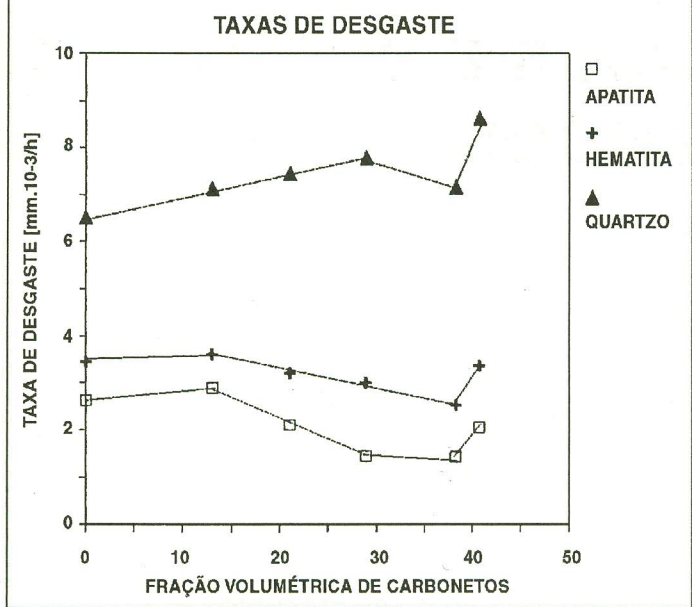


Figura 21. Diminuição do diâmetro com o tempo de ensaio. Moagem de Quartzo.



As taxas de desgaste, obtidas no moinho industrial de 3 metros de diâmetro, variaram de 2,5 a 7,3mm. 10⁻³/h. Nos ensaios da presente pesquisa, as bolas martensíticas apresentaram taxas de desgaste entre 1,43 e 2,89mm. 10⁻³/h. Para se comparar estes resultados é necessário levar em conta os respectivos diâmetros de moinho. De acordo com Hukki^[17], o desgaste é proporcional à raiz quadrada do diâmetro do moinho, supondo-se que a operação ocorra com a mesma porcentagem da velocidade crítica. Neste caso, portanto, o desgaste no moinho industrial deveria ser 2,7 vezes mais rápido do que no moinho de laboratório utilizado. Os resultados obtidos no ensaio corresponderiam então a taxas de desgaste, no moinho de 3m de diâmetro, entre 3,8 e 7,8mm. 10⁻³/h, indicando um bom potencial de transferibilidade dos resultados deste ensaio.

Figura 22. Taxas de desgaste em função da Vvk.



5. CONCLUSÕES

1) Os ensaios em moinho de bolas mostraram boa reprodutibilidade e capacidade de ordenar ligas de acordo com o desempenho contra o desgaste.

2) O progresso do desgaste nos ensaios efetuados pôde ser descrito através de retas de diminuição do diâmetro com o tempo. A inclinação destas retas é a taxa de desgaste em cada caso.

3) O aumento da fração volumétrica de carbonetos provocou aumento da resistência ao desgaste dos ferros fundidos brancos de alto cromo frente aos abrasivos apatita e hematita.

4) O aumento da fração volumétrica de carbonetos provo-

cou diminuição da resistência ao desgaste dos ferros fundidos brancos de alto cromo frente ao abrasivo quartzo.

5) A liga eutética apresentou comportamento diferenciado no ensaio com quartzo, mostrando uma resistência ao desgaste relativamente alta.

6) A liga hipereutética apresentou sempre desempenho pior do que a liga eutética ou liga com 30% de Vvk

Referências Bibliográficas

1. AVERY, H.S. Classification and precision of abrasion tests. *Proc. Int. Conf. Wear of Materials*, 1979, Duarborn, M.I., K.C. Ludema, ed. p. 148-157.
2. MUSCARA, J.; SINNOT, J. Construction and evaluation of a versatile abrasive wear testing apparatus. *Metals Engineering Quarterly*, May, p. 21-32.
3. AVERY, H.S. Work hardening in relation to abrasion resistance. IN: *Material for the Mining Industry Symposium*, Vail, Co; EUA, 1976, p. 43-78.
4. BORIK, F. Using tests to define the influence of metallurgical variables on abrasion. *Metals Engineering Quarterly*, May 1972, p. 33-39.
5. LOPES, A.J. et al. Study of white cast iron grinding balls. *Comission Nacional de Energia Atômica. Argentina*, 20p.
6. WESNER, A.L. et al. Study of grinding-ball wear employing a radioactive-tracer technique. *Trans. ASME*, 217, 1960, p. 429-434.
7. LEIVA, H.A.; ESTAY, S.H. Evaluacion experimental de fundiciones blancas de bajo cromo aplicadas en molienda secundaria. In: *Simposium de Ingenieria de Minas*, 7., Depto. de Ingenieria de Minas, Univ. de Santiago de Chile, p. 39-57, 1990.
8. BARROS^{Fº}, O. et al. Testes de avaliação de corpos moedores. IN: *Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste*, 2., Uberlândia, MG, 1991. ABM e Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M.G., 570p.
9. NORMAN, T.E.; LOEB, C.M. Wear tests on grinding balls. *Trans. AIME*, 176, 1948, p. 490-526.
10. NORDQUIST, D.E.; MOELER, J.E. Relative wear rates of various diameter grinding balls in production mills. *Trans. Soc. Min. Eng. AIME*, 187, 1950, p. 712-715.
11. CARPINETTI COSTA, P.H. Efeito do nióbio em ferros fundidos brancos ligados ao cromo e molibdênio. São Paulo, 1985. 109p. *Dissertação (Mestrado)*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
12. GUESSER, W.L. et al. Nióbio em ferros fundidos ligados ao cromo para aplicações em desgaste abrasivo. *Metalurgia ABM*, 45, n. 381, agosto 1989, p. 323-39.
13. MOORE, M.A. et al. Factors affecting wear in tumbling mills: influence of composition and microstructures. *International J. of Mineral Processing*, 222, 1983, p. 313-343.
14. VERMEULEN, L.A.; HOWAT, D.D. Theories of ball wear and results of a marked-ball test in ball milling. *J. South African Institute of Mining and Metallurgy*, 83(8) Aug. 1983, p. 189-97.
15. ROTONDARO, R.G. *Mecanismos de desgaste abrasivo*. São Paulo, 1988. 125p. *Tese (Doutorado)* - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
16. SAE - Society of Automobile Engineers - *Abrasive Wear* - 1965. Aug. 1966, Nova Iorque, 16 p.
17. HUKKI, R.T. Correlation between principal parameters affecting mechanical ball wear. *Trans. Soc. Min. Eng. AIME*, 199, 1954, p. 642-644.

Tabela 12 - Taxas de desgaste - série Vvk

ENSAIO	LIGA	K(mm ³ 10 ⁻³ /h)
APATITA	aço	2,63
	A	2,89
	B	2,13
	C	1,46
	D	1,43
HEMATITA	aço	3,44
	A	3,61
	B	3,21
	C	2,99
	D	2,53
QUARTZO	aço	6,52
	A	7,12
	B	7,44
	C	7,77
	D	7,15
	E	8,62