

FLÁVIO YUJI TERAMATSU

ESTUDO DE DESGASTE DE CORPOS MOEDORES EM
MOINHO DE BOLAS

Trabalho apresentado à disciplina PMI-500
Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas

Orientador : Eng.diógenes Jerônimo
Co-Orientador : Prof.Dr.Arthur Pinto Chaves

SÃO PAULO 1993

EPMI
TF-1993
T34e
Lysmo 1587408

FLAVIO YUI TERAMATSU

ESTUDO DE DESGASTE DE CORPOS MOEDORES EM
MOINHO DE BOLAS

Trabalho apresentado à disciplina PMI-500
Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas

M1993d

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005934

SÃO PAULO 1993

Índice

I. Introdução	1
II. Objetivos	1
III. Noções Sobre Desgaste	2
IV. Definição do Sistema Tribológico - Moinho de Bolas	3
IV.1. Variáveis de Projeto	3
IV.2. Condições Operacionais	7
IV.3. Abrasivo	13
IV.4. Propriedades do Material	16
IV.5. Inter-Relações Entre as Variáveis do Sistema Tribológico	18
V. Principais Mecanismos de Desgaste	19
V.1. Desgaste por Abrasão	19
V.1.1. Descrição Quantitativa do Desgaste Abrasivo	20
V.2. Desgaste por Corrosão	24
V.2.1. Aspectos Quantitativos do Desgaste Corrosivo	26
V.3. Desgaste por Adesão (Metal-Metal)	27
V.4. Desgaste por Fadiga Superficial	30
VI. Ensaio para Medição do Desgaste	32
VII. Metodologia, Planejamento e Descrição dos Ensaio	36
VII.1. Características dos Corpos Moedores	36
VII.2. Avaliação do Comportamento da Taxa de Desgaste	36
VII.3. Testes com Reagente	46
VII.4. Análise dos Resultados e Conclusões	52
VIII. Bibliografia	53

I. Introdução

As operações de moagem se destacam como sendo de alto consumo energético (estima-se que apenas uma pequena porcentagem da energia fornecida seja realmente utilizada na quebra do material) e as mais caras dentro dos processos de cominuição. Este custo de moagem possui dois componentes principais: custos operacionais (energia elétrica, matéria prima, mão de obra, etc.) e custos de aquisição (onde se inclui o desgaste). Apesar disso, a moagem é muito usada por diversos setores da indústria, das quais podemos citar os setores de tintas, farmacêutica, química e mineral.

Quando se pensa em elevar a eficiência de uma indústria mineral, as atenções se voltam naturalmente para a etapa de cominuição. Esta etapa representa, em média, 50% dos custos inerentes às operações de tratamento de minérios e, particularmente para o caso do cobre, representa mais de 20 % do custo total de produção deste metal. Para se ter uma idéia da importância das operações de cominuição, basta se atentar ao fato de que uma tonelada de concentrado de minério de ferro é vendida a US\$ 25, sendo que os custos operacionais para produzi-la se situam em torno de US\$ 15, do que visto acima, aproximadamente US\$ 7 são gastos com sua moagem. Se conseguíssemos economizar US\$ 2 nessas operações, isto significaria um lucro adicional de $US\$ 2/t \times 120\,000\,000\,t/ano = US\$ 240\,000\,000$.

Dentro deste contexto, o desgaste de revestimentos e corpos moedores estão entre os principais fatores operacionais que aumentam significadamente os custos de produção; problema este agravado pelo fato de que nos últimos anos, pois a redução dos teores dos minérios lavrados tem forçado a um aumento na quantidade de minério processada, e com isso a um aumento do tamanho dos equipamentos de cominuição, podendo-se encontrar moinhos de bolas com diâmetros de até 5,5 m.

II. Objetivos

Este trabalho possui dois objetivos principais:

- a) Descrever o sistema tribológico moinho de bolas, através da listagem dos elementos envolvidos no processo de desgaste e suas propriedades relevantes ao processo e;
- b) Avaliar taxas de desgaste medidas em laboratório, procurando interpretá-las como interação entre os elementos envolvidos no processo e descritos no item a. Adicionalmente, serão feitos ensaios utilizando-se diversos reagentes cuja finalidade seria o de atuar nos agentes provocadores do desgaste, minimizando-o.

III. Noções Sobre Desgaste

Pode-se entender o desgaste com sendo uma alteração indesejável e usualmente gradual da superfície de uma peça pela perda de pequenas partículas como consequência de uma ação mecânica.

Porém, o desgaste não caracteriza uma propriedade de um material. Um engenheiro, ao fazer um projeto, utiliza valores que são inerentes ao material, como a resistência à tração ou compressão, dureza e outras propriedades. Todavia, se for procurar a propriedade relacionada com desgaste, ele, provavelmente, não vai encontrá-la, pois o desgaste é dependente do sistema tribológico.

O desgaste em corpos moedores acontece por quatro mecanismos principais: abrasão, corrosão, adesão (metal-metal) e fadiga. A contribuição individual de cada um dos mecanismos acima ainda não está perfeitamente determinada, sendo esta definição importante para o perfeito entendimento das taxas de desgaste observadas, com sua possível utilização na redução dos custos de processamento mineral.

"Para compreender adequadamente a rede de interações existentes, é conveniente organizar todos esses fatores em torno do conceito de sistema de desgaste ou tribossistema, de tal maneira que cada aspecto particular seja examinado como elemento de um todo mais amplo." (1)

O estudo do sistema tribológico moinho de bolas pode então ser dividido segundo o esquema geral mostrado na figura 1 abaixo, a partir do qual tentaremos descrever as características principais das variáveis envolvidas.

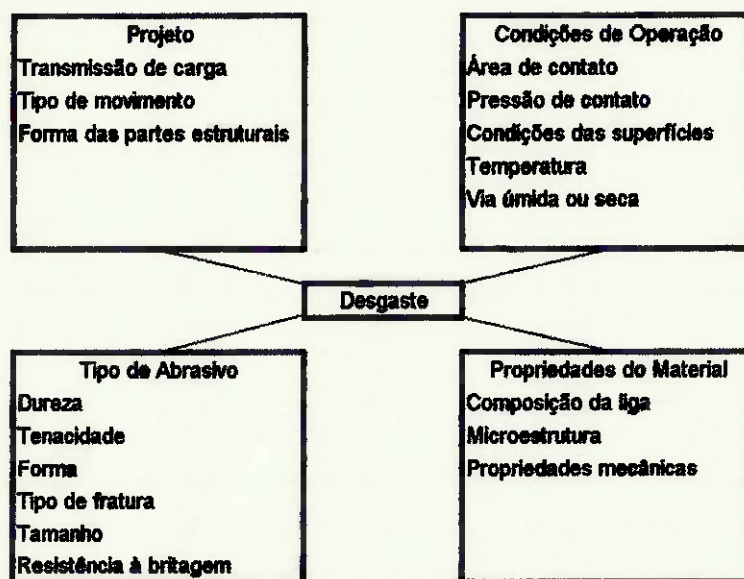


Figura 1 - Variáveis em um sistema de desgaste abrasivo

IV. Definição do Sistema Tribológico - Moinho de Bolas

IV.1. Variáveis de Projeto

a) Definição de moinho rotativo

São basicamente cilindros rotativos revestidos internamente com placas de desgaste, dentro dos quais os corpos moedores (barras, bolas, pebbles) se movem, fragmentando o material entre duas superfícies móveis que não possuem qualquer sujeição mecânica entre si. Por rotação, a carga é elevada até uma certa altura e então cai sobre o material e o próprio revestimento, resultando em três diferentes tipos de mecanismos de quebra que serão descritos posteriormente. (Sendo que a forma predominante depende das condições operacionais).

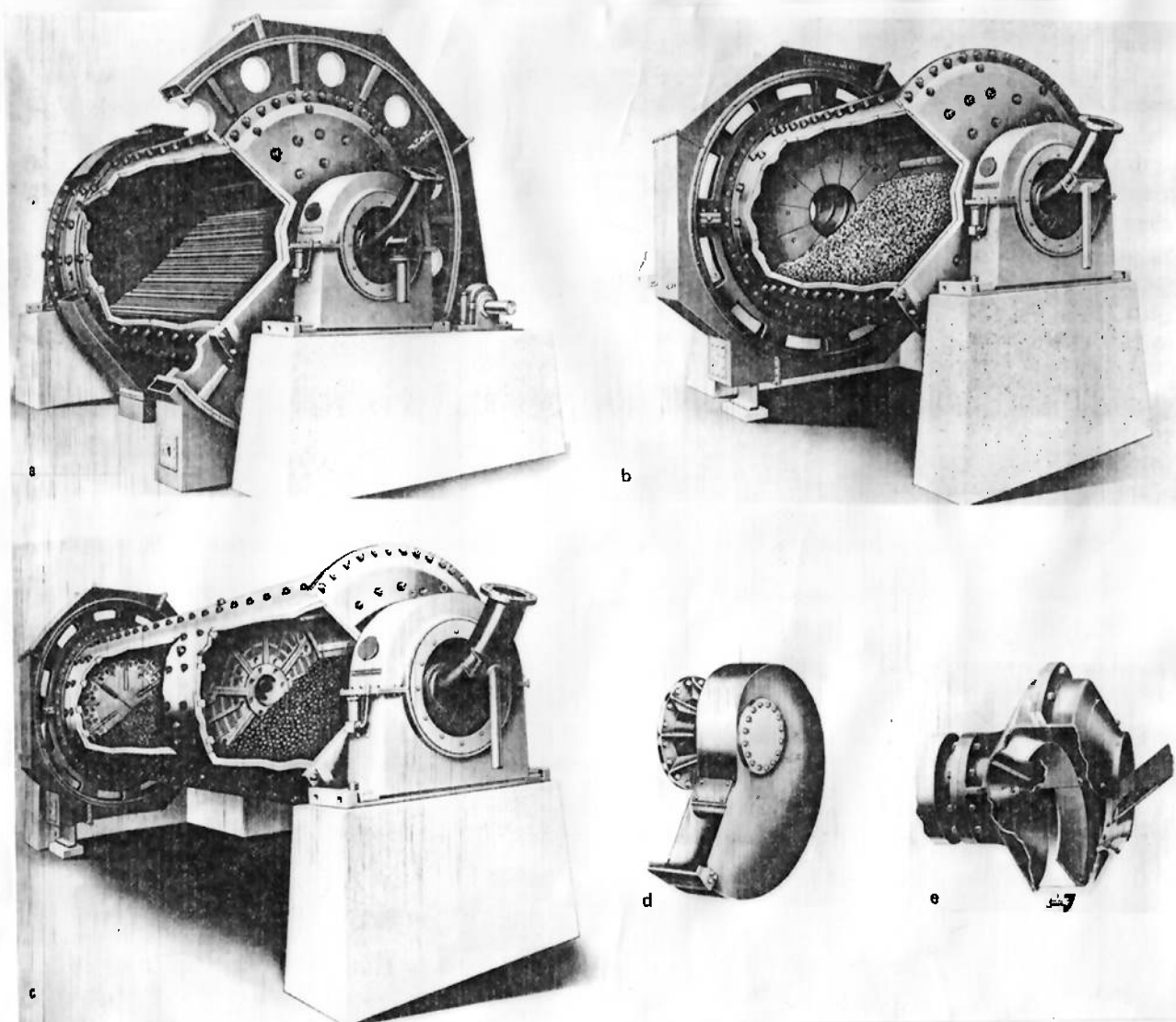
b) Forma das partes estruturais

O tamanho do moinho é expresso pelas dimensões do diâmetro interno e do comprimento externo ao revestimento. São fabricados moinhos com diâmetros padronizados, variando de meio em meio pé. Atualmente o maior moinho de bolas tem 18 pés (5,4m) de diâmetro, sendo importante salientar que existe uma relação L/D (comprimento por diâmetro) ideal para cada aplicação (vide figura 2).

A carcaça é feita usualmente de chapa de aço carbono, calandrada e soldada. A sua espessura varia de 1/100 a 1/75 do diâmetro do moinho. É normalmente fabricada em uma só peça, podendo também ser produzida em duas partes, e unidas através de um flange. Para moinhos grandes/compridos, a carcaça deve ser tratada termicamente para alívio de tensões e depois usinada de uma só vez (compreende a furação para a fixação do revestimento).

As tampas são normalmente fabricadas em aço fundido ou ferro fundido nodular em uma única peça que compreende o pescoço. Estes são cuidadosamente torneados em relação ao eixo e com superfícies altamente polidas para reduzir o atrito com os mancais.

Os mancais são amplamente dimensionados para garantir baixa pressão específica. Além disso, são auto-alinhantes para compensar a flexa do moinho e pequenos desalinhamentos (podendo ser substituídos por outros tipos de apoio). A lubrificação dos mancais em moinhos tubulares é feita por sistemas automáticos, constituídos de bombas de alta pressão (para parada e partida) e outra de baixa pressão para funcionamento normal.



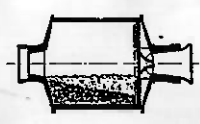
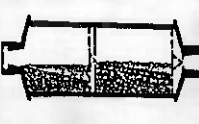
ARRANJOS DE DESCARGA			
PROCESSO DE MOAGEM	OVERFLOW SOMENTE VIA ÚMIDA	DIAFRAGMA VIA ÚMIDA OU SECA	COMPARTIMENTADO VIA ÚMIDA OU SECA
CIRCUITO	USUALMENTE FECHADO	FECHADO	FECHADO OU ABERTO
PRODUTO TÍPICO	FINO-200 MALHAS	INTERMEDIÁRIO (VIA ÚMIDA) 65-100 MALHAS FINO (VIA SECA) 325 MALHAS	FINO: 150-325 MALHAS
TAMANHO DE ALIMENTAÇÃO MÁXIMA	10-14 MALHAS	< 1/2 pol.	< 1/2 pol.
RELAÇÃO L/D	1-1,5:1	1-1,5:1	CIRC. ABERTO 3,5-50:1 CIRC. FECHADO 2,5-3,5:1
VELOCIDADE TÍPICA (% DA VEL. CRÍTICA)	65-70	68-78	VIA ÚMIDA 65-75 VIA SECA 70-78
VOLUME DE CARGA(%)	40-45	35-50	30-50

Figura 2 - Tipos de moinhos (a,b,c), de alimentadores (d,e) e características principais dos moinhos de bolas.

c) Acionamento

Normalmente é feito por transmissão por coroa e pinhão. A coroa é feita de aço fundido em duas metades para parafusamento, para maior facilidade de montagem. A coroa é parafusada a um flange na carcaça. Utiliza-se dentes retos para moinhos pequenos até 500 cv, sendo recomendável para moinhos maiores a engrenagem helicoidal. O pinhão deve ter dureza superior à da coroa.

São utilizados conjuntos de acionamento por motores assíncrono, com redutor ou síncrono de baixa velocidade.

Uma variação é acoplar o motor diretamente à carcaça ou a um flange preso nas cabeceiras (existem atualmente 30 casos no mundo). Através deste acionamento, inicia-se então a rotação do moinho, que faz com que os corpos moedores se elevem e sejam utilizados para a cominuição.

d) Alimentação e descarga

Os moinhos dispõem de diferentes sistemas de alimentação para atender aos requisitos de layout e de processo (ver figura 2).

Scoop-feeder é a mais utilizada para moinhos pequenos, quando se usa um classificador espiral. Spout-feeder é utilizado quando se possui classificação por hidrociclones, o qual necessita que os mesmos estejam montados a uma altura suficiente. Drum-feeder pode substituir o spout-feeder, requerendo alturas de queda menores.

Quanto à descarga, pode ser: por overflow, onde aplica-se a moagem fina, (quando não apresentar dificuldade de escoamento) ou descarga por diafragma (utilizada somente em moinho de bolas), utilizando-se neste caso de uma grelha perfurada que retém a saída de bolas e de um dispositivo que eleva o nível de polpa, de modo a que se proporcione um gradiente de escoamento mais elevado, sendo recomendado quando se deseja uma moagem mais grossa.

e) Revestimento

O objetivo da utilização de revestimentos no moinho é duplo: proteger a carcaça contra o desgaste e reduzir o escorregamento entre a carga de corpos moedores e a parede do moinho. Os materiais comumente utilizados serão descritos a posteriori. As formas de revestimento utilizadas dependem das condições de operação do moinho. Para revestimento mais liso há predominância de moagem por atrito (moagem mais fina), sendo que se deseja uma moagem mais grossa, deve-

se utilizar um revestimento mais rugoso. A variedade de tipos, bem como o efeito proporcionado por cada tipo pode ser visualizada na figura 3.

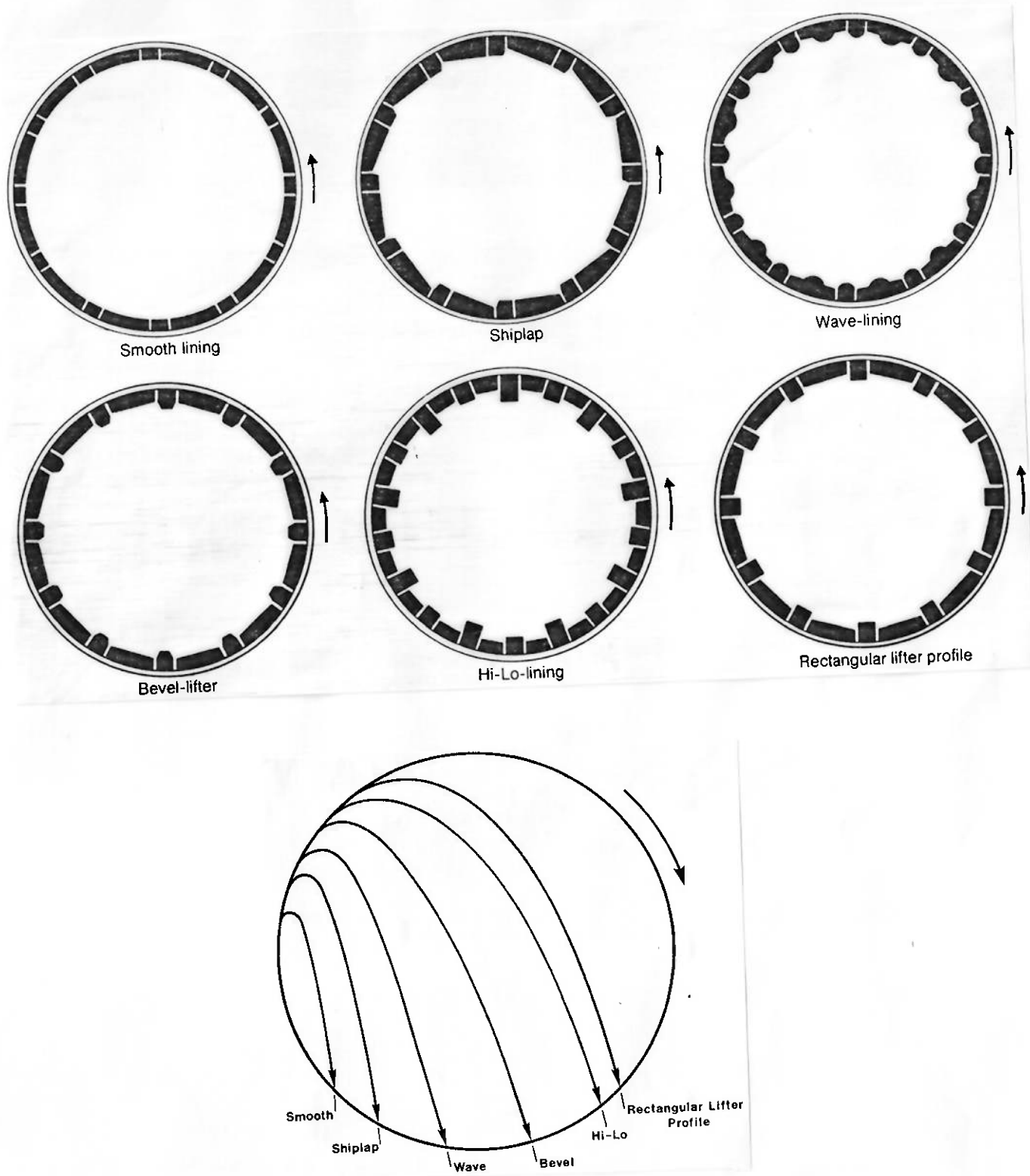


Figura 3 - Forma dos diversos tipos de revestimentos (acima) e sua influência no arremesso dos corpos moedores (abaixo)

IV.2. Condições Operacionais

a) Moagem a seco x moagem a úmido

A moagem a úmido requer somente 77% da potência necessária para a moagem a seco do mesmo material (para as mesmas granulometrias de alimentação e produto). Todavia, o desgaste dos corpos moedores e de revestimentos aumenta entre 3 e 7 vezes, comparando-se com o meio seco.

A moagem a úmido proporciona fácil controle operacional, através da porcentagem de sólidos e do nível de descarga; não necessita de sistemas despoeirizantes, mantendo a poluição em níveis aceitáveis, além de necessitar de menos espaço, uma vez que os classificadores a úmido são menores dos que a seco. A moagem a seco é normalmente utilizada em três casos: quando os processos subsequentes são a seco; quando é difícil ou caro remover a água; ou quando o material reage com a água.

b) Volume da carga

A carga de corpos moedores é geralmente expressa em porcentagem do volume interno do moinho ocupado por corpos moedores (inclui os vazios entre os corpos). A figura abaixo indica como a carga utilizada influi na energia consumida pelo moinho.

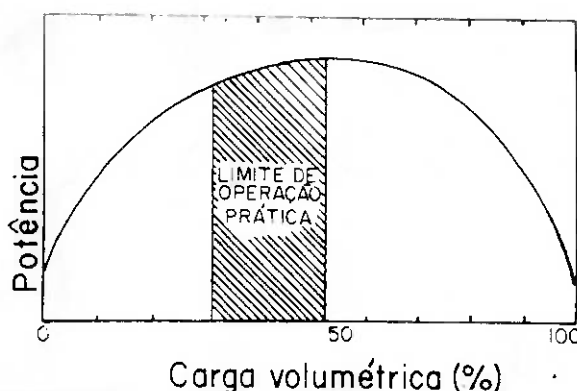


Figura 4 - Potência do moinho em função da carga de bolas (Kelly)

Somente grandes moinhos podem utilizar 50% de carga, desde que grelhas segurem as bolas dentro dele. Moinhos tipo overflow são restritos a menos de 45% para evitar transbordamento de bolas, e moinhos de barras são restritos a 32-40% porque com carga este volume passa a 40-50% devido a uma expansão volumétrica.

A densidade da carga de bolas é independente do diâmetro do moinho e

apresenta alguma variação em função com a distribuição granulométrica. Para bolas de aço forjado, está em torno de 4646 kg/m^3 e para bolas de ferro fundido 4165 kg/m^3 .

c) Tamanho dos corpos moedores

Como resultado do desgaste, todos os moinhos tubulares possuem uma distribuição contínua de diâmetros, denominada carga em equilíbrio. Existe uma relação entre o tamanho de carga e o tamanho do material que está sendo moído. Quando se diminui o diâmetro, aumenta-se a área disponível (ver tabela I), aumentando a capacidade de moagem. Por outro lado, o peso dos corpos se torna insuficiente para quebrar as partículas maiores. Esta falta de energia pode ser compensada pela velocidade do moinho e pelo diâmetro maior. Existem fórmulas que permitem calcular o diâmetro máximo da carga de corpos moedores que melhor se adequam a um determinado material.

Raramente se adiciona bolas menores que 25mm e barras menores que 60mm. Como consequência, os moinhos de barras são restritos a moagem grossa, pois barras muito finas são leves, e não resistem ao movimento imposto. Com o valor acima calculado, se pode escolher a distribuição inicial de tamanhos segundo Bond (ver tabela I).

É desejável que as bolas maiores permaneçam mais próximo da entrada, e as menores mais próximas da saída. Para isso, se dispõe de três principais métodos: uso de moinhos cônicos (para pequenos tamanhos); moinhos multi-compartimentados (por exemplo, com uma câmara com bolas maiores e outra com bolas menores) e revestimentos classificadores (que durante o movimento "separam" as bolas maiores das menores).

d) Porcentagem de sólidos

A utilização de polpa muito diluída leva a uma moagem pouco eficiente, pois as partículas se acham muito dispersas, sendo poucos os choques efetivos de bolas com partículas. Neste caso há grande intensidade de choques com bolas e com revestimentos, sendo o barulho bastante elevado.

Aumentando-se a porcentagem de sólidos haverá um aumento de eficiência até certo nível, acima do qual volta a decrescer devido a viscosidade excessiva da polpa. É possível trabalhar hoje com porcentagens de sólidos altas, graças a ação de aditivos de moagem sendo que seu uso influencia a classificação e implica em um custo adicional.

e) Pressão de contato

O desgaste é diretamente proporcional à pressão aplicada até um valor crítico, determinado ou pela deformação plástica da superfície, ou pela instabilidade superficial do abrasivo (fragmentação). Em particular, nos moinhos, geram-se pontos de alta pressão, favorecendo o desgaste.

Outra condição é o número de corpos envolvidos no contato: dois corpos - se a partícula abrasiva interage só com a superfície de desgaste; três corpos - se a partícula abrasiva interage simultaneamente com outra partícula ou outro objeto (figura 5).

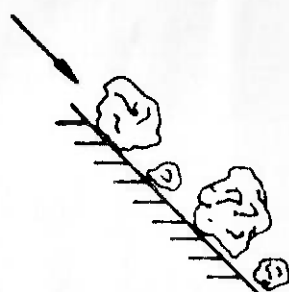
Carga inicial de bolas (Bond)

Diâmetro (mm)	Diâmetro de reposição (mm)						
	115	100	90	75	65	50	40
115	23,0	—	—	—	—	—	—
100	31,0	23,0	—	—	—	—	—
90	18,0	34,0	24,0	—	—	—	—
75	15,0	21,0	38,0	31,0	—	—	—
65	7,0	12,0	20,5	39,0	34,0	—	—
50	3,8	6,5	11,5	19,0	43,0	40,0	—
40	1,7	2,5	4,5	8,0	17,0	45,0	51,0
25	0,5	1,0	1,5	3,0	6,0	15,0	49,0
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

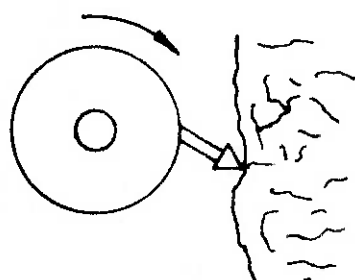
Distribuição da carga indicada como porcentagem em peso

Corpos Moedores (Valores Aproximados)				
Diâmetro (mm)	Peso Unitário (g)	Superfície/Ton (m ²)	Superfície/Unid. (m ²)	Unidades/Ton
100	4.084	7,689	0,0314	245
90	2.977	8,532	0,0254	336
80	2.091	9,612	0,0201	478
70	1.410	11,007	0,0154	709
60	880	12,841	0,0113	1136
50	510	15,392	$7,85 \times 10^{-3}$	1961
40	260	19,308	$5,02 \times 10^{-3}$	3846
30	110	25,636	$2,82 \times 10^{-3}$	9091
25	64	30,625	$1,96 \times 10^{-3}$	15625
20	33	38,182	$1,26 \times 10^{-3}$	30303
17	21	43,238	$9,08 \times 10^{-4}$	47619
15	14	50,500	$7,07 \times 10^{-4}$	71429
Cylpebs				
40 x 40	398	18,945	$7,54 \times 10^{-3}$	2513
30 x 30	171	24,795	$4,24 \times 10^{-3}$	5848
25 x 25	98	30,102	$2,95 \times 10^{-3}$	10204
20 x 20	46	40,869	$1,88 \times 10^{-3}$	21739
16 x 16	26	46,538	$1,21 \times 10^{-3}$	38462
12 x 12	11	61,727	$6,79 \times 10^{-4}$	90909

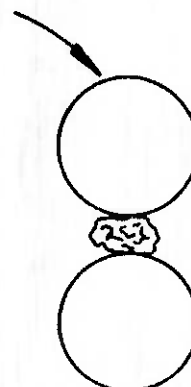
Tabela I - Distribuição inicial de bolas segundo Bond e valores aproximados sobre corpos moedores



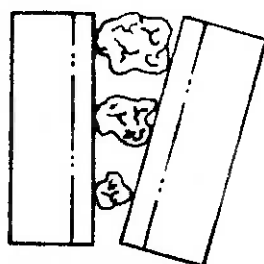
BICAS DE DESCARGA
DOIS CORPOS



ESMERIL
TRÊS CORPOS



MOINHO DE BOLAS
TRÊS CORPOS



MANDÍBULAS
TRÊS CORPOS

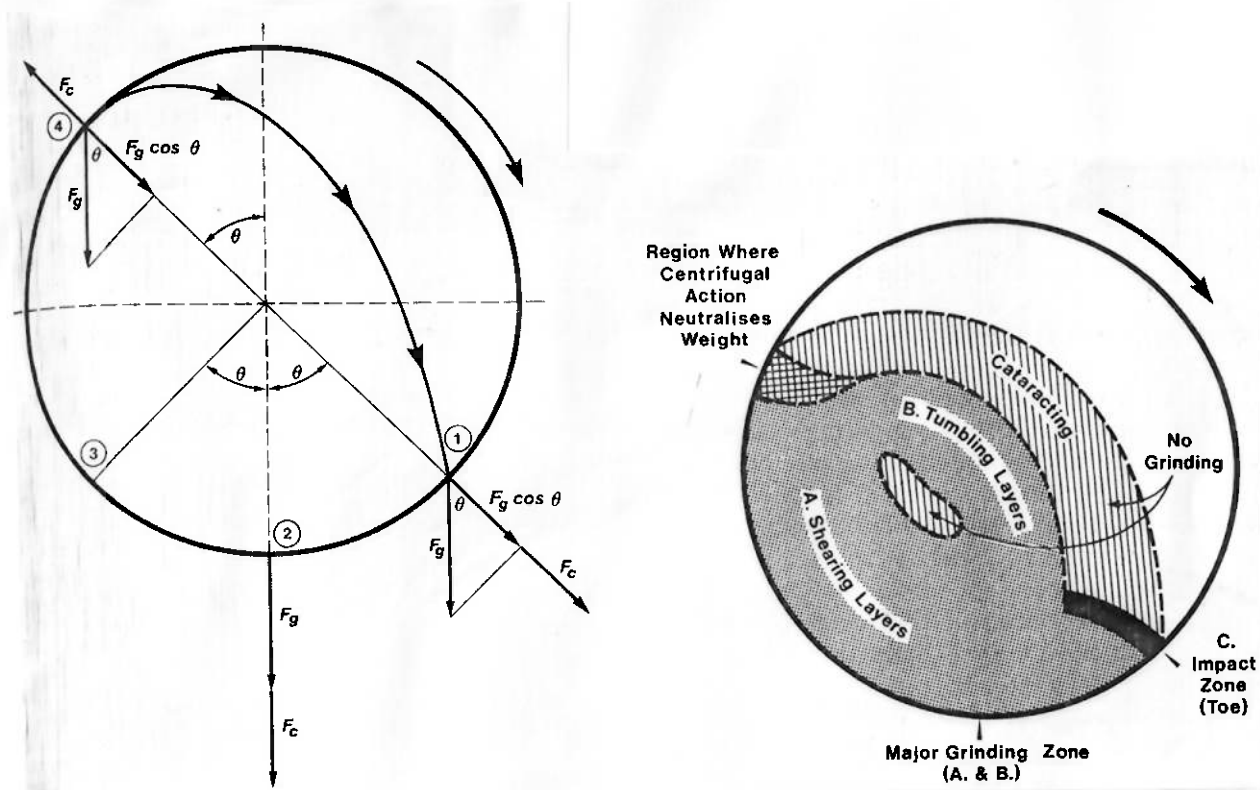
Figura 5 - Tipos de contato

f) Velocidade do moinho

A ação dos corpos moedores é bem melhor visualizada, considerando-se uma única bola com revestimento liso (vide figura 6). Define-se como velocidade crítica aquela na qual a bola consegue atingir o ponto mais elevado do moinho sem se desprender. A velocidade crítica é calculada igualando-se naquele ponto a força centrífuga ao peso da bola.

Quando se pensa em uma carga de bolas, deve-se visualizar a figura seguinte. Na região A, as bolas estão se movendo umas contra as outras em camadas concêntricas, e produzem moagem por abrasão e um pouco por compressão. O limite superior desta zona é onde a força centrífuga anula o peso das bolas. As bolas acima desta região, na zona B, rolam e produzem a quebra por choque. Para esta configuração deve-se utilizar entre 60 e 80% da velocidade crítica. Maiores velocidades fariam com que as bolas caíssem diretamente sobre o revestimento, e velocidades menores reduziriam esta parcela, aumentando o cisalhamento.

Conforme já foi mostrado, o tipo de revestimento também influi regime de operação (cascata ou catarata).



Diâmetro interno			Velocidade recomendada (% da velocidade crítica)		
m	Pés	Barras	Bolas	Multicâmara (bolas/bolas)	Multicâmara (barras/bolas)
0,91-1,83	3-6	76-73	80-78	78-75	75-72
1,83-2,74	6-9	73-70	78-75	75-72	72-70
2,74-3,66	9-12	70-67	75-72	72-70	70-68
3,66-4,57	12-15	67-64	72-69	70-68	—
4,57-5,49	15-18	—	69-66	—	—

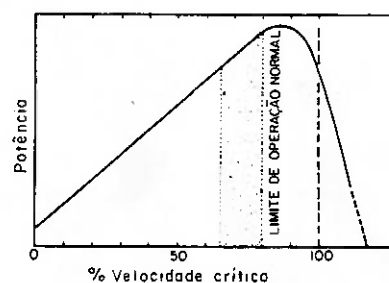


Figura 6 - Influência da velocidade do moinho no movimento da carga moedora e velocidades recomendadas por Rowland.

IV.3. Abrasivo

Esta variável do sistema tribológico tem uma influência mais significativa no desgaste abrasivo.

a) Tipo de abrasivo

Apesar de existir um consenso a respeito da importância do abrasivo como fator de desgaste, normalmente ele é pouco ou superficialmente caracterizado. Podemos dizer que equivaleira a se estudar corrosão sem se levar em conta as propriedades do meio corrosivo.

A dureza é uma das principais propriedades a se caracterizar no mineral. A tabela II mostra os valores de dureza para os minerais mais comuns e sua comparação com os constituintes microestruturais típicos.

Se a dureza do mineral se aproxima da dureza do metal, o desgaste aumenta a um nível alto, conforme a figura 6.

Experiências realizadas por Richardson e Khruschov (11) indicam que a transição ocorre aproximadamente quando a relação dureza do metal e dureza do abrasivo (H_m/H_a) alcança 0,8. As experiências realizadas com bolas marcadas em moinhos para quartzo, feldspato e calcita são coincidentes com o comportamento descrito (vide figura 7). A dureza do abrasivo é fundamental. Para a calcita o desgaste para os três metais usados é muito baixo, apesar de uma diferença percentual elevada.

Na zona de transição, os resultados são muito sensíveis às características do material ou liga usada, o que não ocorre na zona de alto desgaste. Se usamos um mineral composto de várias fases de durezas diferentes e se o metal é polifásico, a transição é pouco definida.

Esses dados são fundamentais no estudo de desgaste, pois a relação de dureza entre os silicatos e ligas, como os ferros fundidos brancos de alto cromo, estão na zona de transição e, portanto, pequenas variações na estrutura podem ter efeitos notáveis no resultado.

Deve-se, então, estudar a relação dureza do abrasivo (H_a) e dureza do metal (H_m) aproximadamente se:

$H_a/H_m < 1,1$	desgaste pequeno
$1,1 < H_a/H_m < 1,3$	desgaste moderado
$H_a/H_m > 1,3$	desgaste acentuado

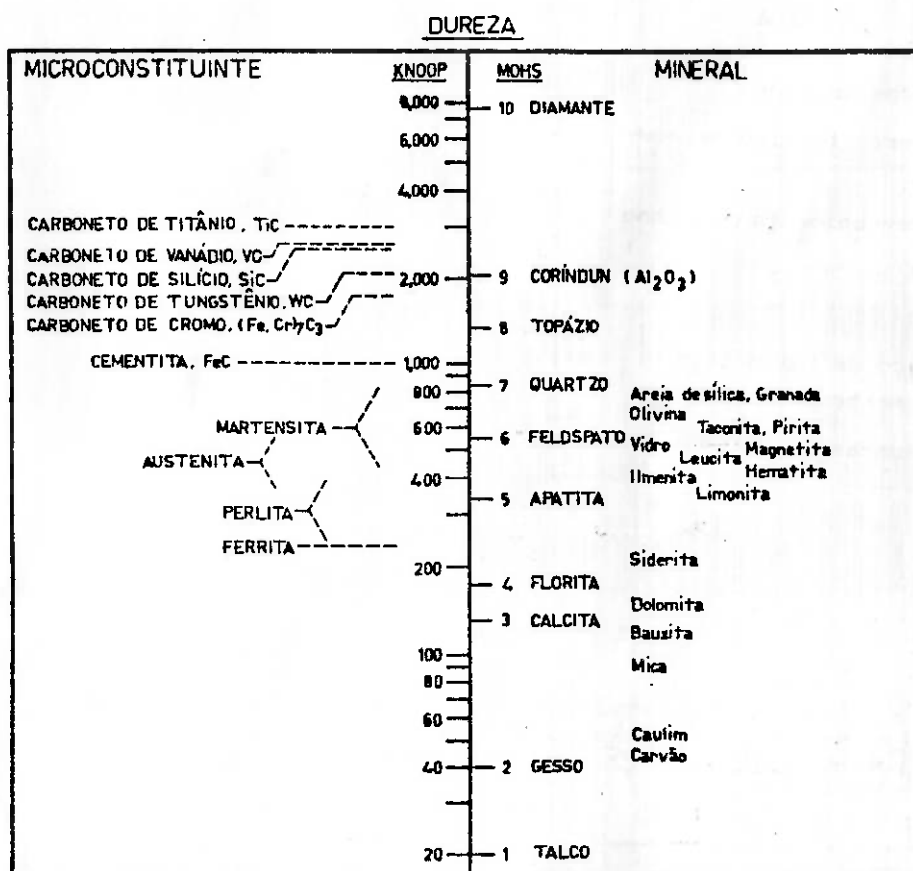
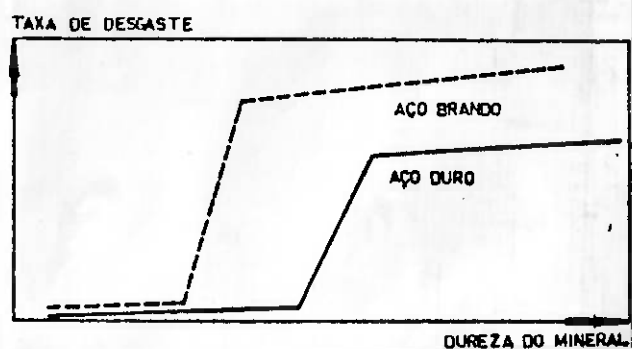
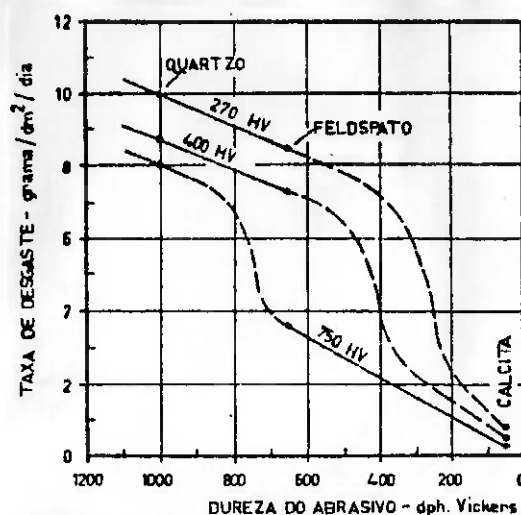


Tabela II - Escala de dureza de materiais e minerais



(a)



(b)

Figura 7 - (a) Influência da relação H_a/H_m na taxa de desgaste. (b) Taxa de desgaste em função da dureza do abrasivo para bolas de moinho com valores de dureza diversos

b) Tamanho do abrasivo

O desgaste aumenta conforme o tamanho do abrasivo até um certo ponto a partir do qual se mantém estável, sendo máximo o desgaste.

c) Forma do abrasivo

O desgaste é mais acentuado para partículas com formato angular do que com formato arredondado, pois haverá maior possibilidade de cortar o metal ao invés de sulcá-lo. É claro que se considera o abrasivo mais duro que o material.

d) Tipo de fratura

Se houver tendência de quebra em cunhas (fratura conchoideal), haverá maior possibilidade de cortar o metal ao invés de sulcá-lo.

e) Tenacidade

Um mineral mais duro e tenaz causa mais desgaste que um mineral duro, porém frágil, sob as mesmas condições de carga.

A influência do tipo de mineral sobre o desgaste foi mostrada de modo bastante definitivo no trabalho do Prof.Dr.Fernando Amos Siriani¹, que determinou

¹Tese Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de "Doutor em Engenharia" - São Paulo-1972

valores de gramas de material consumido por tonelada de mineral britado para um determinado valor de kWh/t consumida na britagem em britador de mandíbulas.

A figura 8 mostra que, para determinado valor de energia consumida na britagem de uma tonelada de mineral, há um crescente desgaste do material, na seqüência: basalto, diabásio, gnaisses, granodiorito, granito e quartzito.

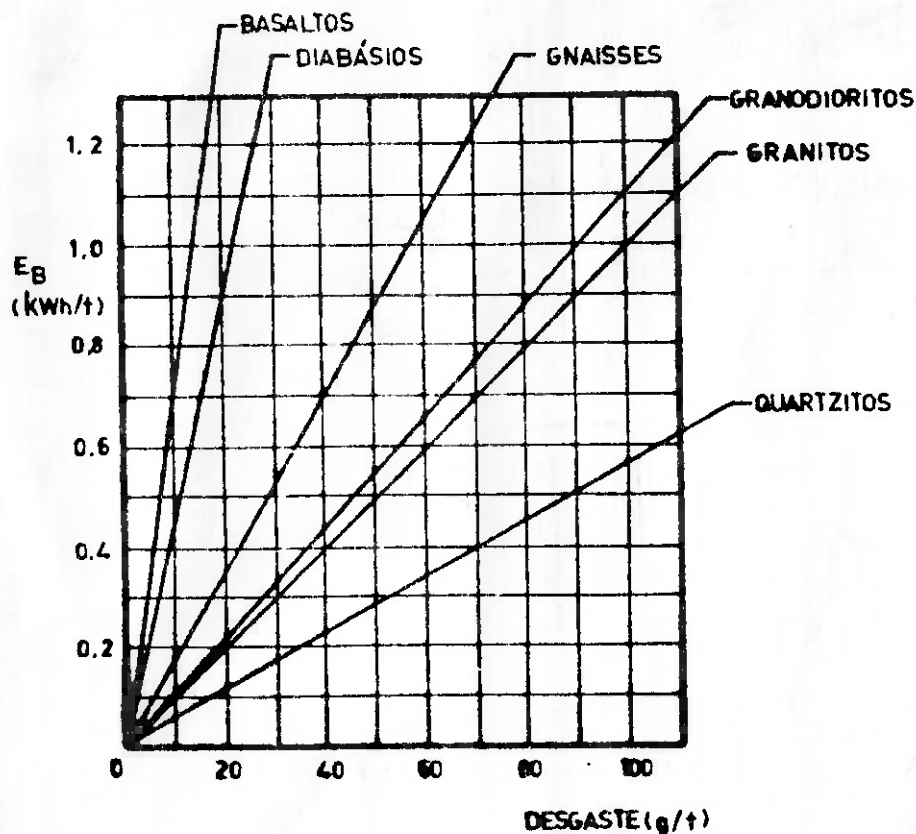


Figura 8 - Relação entre energia consumida na britagem e desgaste de diferentes materiais

IV.4. Propriedades do Material

a) Dureza do material

De maneira geral, a resistência ao desgaste aumenta com um aumento de dureza (vide figura 9). Todavia, nota-se que há várias relações dureza/resistência ao desgaste, cada uma correspondendo a uma microestrutura diferente: os metais puros, os aços, os ferros fundidos, etc. Não é aplicável quando se tratar de ligas e materiais encruados.

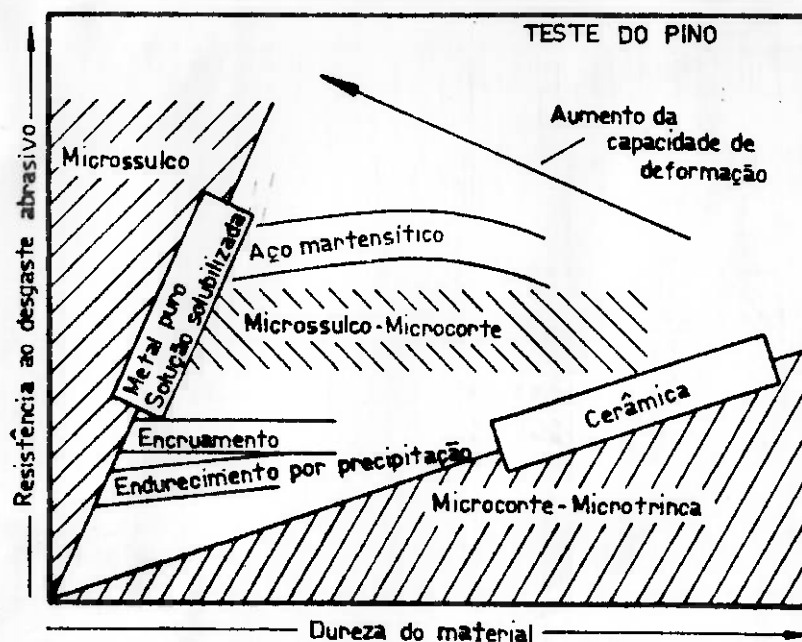


Figura 9 - Resistência ao desgaste em função da dureza para diversos materiais

b) Tenacidade

A resistência ao desgaste diminui com o aumento de tenacidade (ver figura 9).

c) Microestrutura

- Matriz: a resistência ao desgaste da ferrita, perlita, bainita e martensita aumenta progressivamente. A menor da ferrita é devido a sua baixa dureza.
- Partículas de segunda fase: no caso de carbonetos presentes em matrizes moles, a resistência ao desgaste aumenta com a elevação do teor de carbono. Isto é válido desde que não exista impacto associado.

d) Materiais normalmente utilizados em cargas de bolas

As bolas são fabricadas em aço forjado ou fundido, ou de ferro fundido ligado. A qualidade depende muito do tratamento térmico e varia entre os vários fornecedores. A dureza varia muito, de 350-450 a 700 brinell.

Há uma regra geral segundo a qual a vida da bola é tanto mais longa quanto maior a dureza, desde que ela não seja muito frágil. É muito importante o tratamento térmico adequado para se conseguir uma distribuição de dureza que não diminua muito na parte interna em relação à dureza superficial. Por outro lado, para que ela tenha suficiente tenacidade é necessário que o núcleo seja mais brando.

Composição	Tipo de aço								
	Forjados						Fundidos		
	SAE 1095	SAE 1060 Modificado	SAE 1045	SAE 52100	SAE 5165	Inox 440C	Cr/Ni	Baixo Cr	Alto Cr
C	1,01	0,61	0,46	1,01	0,65	1,05	3,11	2,80	2,53
P	0,017	0,017	0,015	0,025	0,045	0,03	0,116	0,097	-
S	0,04	0,051	0,025	0,015	0,029	0,027	0,116	0,112	-
Si	0,25	0,08	0,19	0,27	0,37	0,34	0,53	0,37	0,55
Cr	Traços	0,08	-	0,90	17,03	17,03	1,45	0,67	16,5
Cu	0,07	0,36	-	-	-	-	0,27	0,31	-
Mn	0,34	0,37	0,65	0,40	1,02	0,48	0,23	0,60	0,46
Mo	0,05	0,05	-	-	-	0,20	0,07	-	-
Ni	Traços	0,11	-	-	-	0,28	3,26	Traços	-

Materiais usados para revestimentos de moinho. Referência Kjos		
Material	Dureza BHN	Desgaste relativo
A - Ferro fundido Cr-Mo	600 - 740	100 - 105
B - Ferro fundido alto cromo	550 - 650	110 - 115
C - Ni-Hard	520 - 650	120 - 130
D - Aço martensítico Cr-Mo, de carbono médio	450 - 555	135 - 145
E - Aço austenítico ao Mn 6-Mo 1	190 - 230	150 - 175
F - Aço perlitico Cr-Mo, de alto cromo	250 - 420	155 - 200
G - Aço austenítico ao Mn 12 (Hadfield)	180 - 220	200 - 300

Tabela III - Composições químicas normalmente utilizadas na fabricação de bolas e materiais utilizados em revestimentos

IV.5. Inter-Relações Entre as Variáveis do Sistema Tribológico

Os moinhos utilizam três diferentes princípios de cominuição: impacto, atrição e compressão. A divisão entre eles depende do tipo de moinho e das variáveis operacionais, como já foi dito anteriormente. Em moinhos tubulares (hoje predominantes), os mecanismos principais são a atrição e o impacto, respectivamente. O sistema tribológico pode ser descrito em função das distribuições de pressões, pico de pressão, gradiente de velocidade de escorregamento, velocidade de impacto, e temperatura dentro da zona de moagem, conforme fizeram diversos autores, entre os quais Austin, 1984 e Scieszka, 1987.

Simplificadamente, acredita-se que o desgaste é causado por tensões de compressão concentradas no ponto de contato com o abrasivo. Seu resultado é a compressão plástica e a fadiga dos materiais dúcteis, bem como a quebra dos componentes duros da superfície do metal. Paralelamente, ocorre a progressiva fragmentação do abrasivo que, inicialmente, já era pequeno.

Esta visão simplificada não engloba fatores importantes dentro do desgaste em moagem, que são a corrosão e a adesão, além da fadiga.

V. Principais Mecanismos de Desgaste

Como já foi dito anteriormente, o desgaste ocorre devido a quatro mecanismos principais: abrasão, corrosão, adesão (metal-metal) e fadiga superficial. Descreveremos, a seguir, cada um destes mecanismos.

V.1.Desgaste por Abrasão

Dos mecanismos de desgaste citados, o desgaste por abrasão é o mais destrutivo deles, sendo responsável pelas maiores perdas econômicas.

O desgaste abrasivo pode ser definido como "a remoção indesejável do material de uma superfície pela ação mecânica de partículas duras em contato com esta superfície". Neste mecanismo de desgaste, o fator dominante no material desgastado é a distribuição e característica dos micro-constituintes no metal ou na liga.

O desgaste abrasivo pode ser devido a diversos mecanismos que causam destruição da superfície tais como corte, arranhamento e deformação plástica simples ou repetida. Uma condição essencial para o desgaste abrasivo é que no processo de atrição a superfície do material abrasivo deve ser mais duro que do material desgastado.

Observando a figura 10 e supondo uma força $\vec{F}$ aplicada a uma partícula P, nota-se que a componente F2, normal à superfície, está agindo forçando a partícula a penetrar no metal, enquanto a componente F1 paralelo à superfície causa o movimento tangencial à partícula e à superfície.

Uma infinita variedade de situações ocorre na prática, mas dois aspectos são nitidamente reconhecidos: a ação de cisalhamento, causando cortes, sulcos e riscos e a componente vertical, que envolve compressão, escoamento do metal nas bordas do abrasivo, provocando fadiga, quebras e fragmentação.

O mecanismo de desgaste pode ser explicado em uma série de casos típicos.

Para superfícies dúcteis e partículas duras com faces angulosas, ocorre o corte. Esse corte forma com que um cavaco contínuo e remove o material da superfície (figura 11A).

Partículas com formas lisas e arredondadas simplesmente amassam a superfície. O material da superfície é empurrado na direção do movimento da partícula, formando um sulco (figura 11B). A maior parte do material deslocado agrupa-se nas bordas do sulco. No caso de o material da superfície ser frágil, o sulco é formado com propagação de trincas e subsequente fragmentação do material (figura 11C).

A severidade de desgaste por esses mecanismos para um dado material abrasivo dependerá grandemente da magnitude das forças atuantes.

Quando as forças são baixas, o desgaste por partículas abrasivas é baixo. É o caso do riscamento sob baixas pressões.

Quando o abrasivo é britado, o mecanismo de remoção do material pode ser diferente do simples mecanismo do corte. Há pouca oportunidade para o abrasivo rolar e cortar antes de ser britado e, portanto, o maior efeito sobre a superfície de desgaste seria devido a esforços concentrados de compressão no ponto de contato.

Nas superfícies de materiais dúcteis, o material será deslocado plasticamente pelo abrasivo, como no caso de penetração de uma esfera no ensaio de dureza Brinell. Com muitas "impressões", com espaçamentos pequenos, a movimentação contínua do material poderá provocar sua fadiga (figura 11D). Há também a possibilidade de ocorrer algum corte durante a britagem do abrasivo, com a força de corte está sendo suprida pela energia elástica, armazenada na partícula abrasiva comprimida.

Para uma superfície de material duro, pouco deslocamento plástico ocorrerá. O desgaste nesta situação ocorre como o resultado de trincas frágeis e fragmentação da superfície (figura 11C).

Os meios de aplicação da força no abrasivo dividem-se em duas categorias: a ação direta de uma superfície, no caso de partículas presas, e a ação da energia cinética, em partículas ou superfícies em movimento.

O desgaste abrasivo pode ser combatido com materiais ou revestimentos resistentes à abrasão, uma mudança de projeto, prevenção de intrusão de partículas duras por selamento e a filtragem de ar e lubrificantes. Em vista de um grande número de máquinas estarem sujeitas ao desgaste abrasivo, o desenvolvimento de materiais resistentes à abrasão é um problema extremamente importante. Um estágio necessário na solução deste problema é o estudo compreensivo do mecanismo de desgaste abrasivo e os seus fatores de controle. O principal meio de estudos é a investigação experimental. Dados experimentais generalizados indicam uma correlação entre as propriedades de um material e o seu desempenho. Informações obtidas por experiência e experimentos servem como um guia na prática da engenharia.

V.1.1.Descrição Quantitativa do Desgaste Abrasivo

Existem várias maneiras de se medir o desgaste abrasivo, tanto do ponto de vista tecnológico como do ponto de vista dos ensaios de laboratório.

Usar a unidade de tempo de vida de um dado material como base descritiva

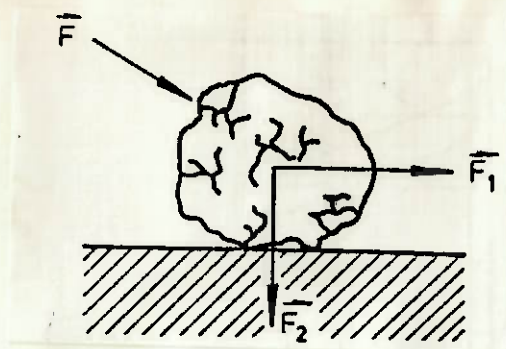


Figura 10 - Ação de uma partícula acionada por uma força $\vec{F}$ sobre uma superfície metálica

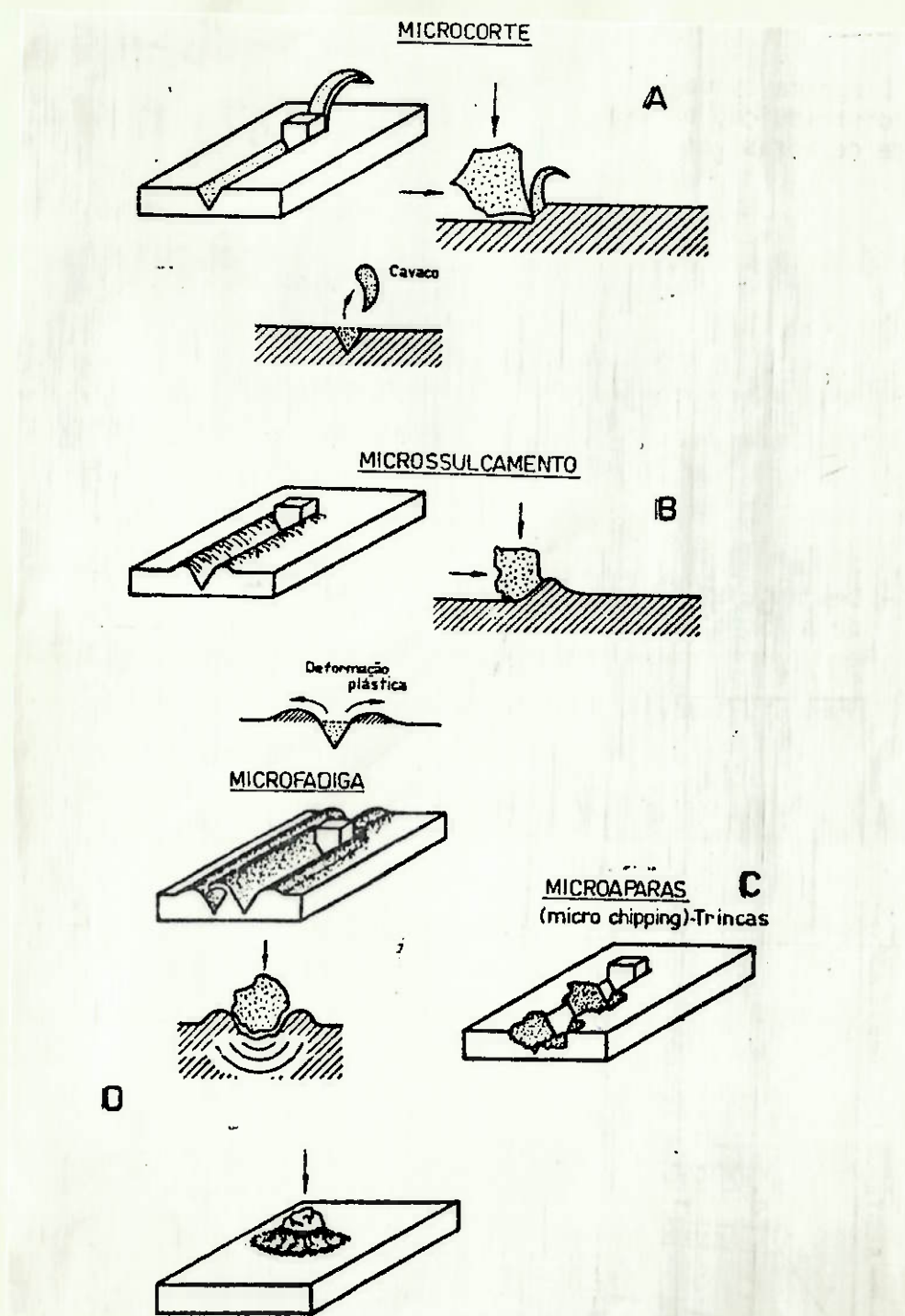


Figura 11 - Micromecanismos de desgaste abrasivo

do desgaste não tem qualquer significado fundamental, salvo a analogia cinética, pois não leva em conta as diferenças dos vários sistemas de desgaste.

As unidades de grama de material por tonelada de abrasivo processadas são muitas usadas tecnologicamente, mas somente tem sentido quando há uma caracterização bem definida do sistema tribológico.

A fórmula

$$\dot{W} = \frac{\Delta W}{LAp}$$

onde $\dot{W}$ = taxa de desgaste abrasivo
 ΔW = massa perdida pelo desgaste
 L = distância de contato
 A = área aparente de desgaste
 p = densidade do material removido

representa um valor bem significativo para um sistema tribológico definido. O recíproco de $\dot{W}$ é a resistência ao desgaste.

Um modelo para medir o desgaste abrasivo foi desenvolvido com base nas diferentes interações entre a partícula abrasiva e o material desgastado. A figura 11 mostra uma seção transversal de um sulco de desgaste produzido por uma partícula abrasiva.

A relação entre o volume de material perdido pelo volume do sulco é descrito por

$$f_{ab} = \frac{Av - (A1 + A2)}{Av}$$

onde Av = área da seção de corte do sulco de desgaste
 $(A1 + A2)$ = quantidade de material que é deslocada para os lados do sulco por deformação plástica.

O desgaste volumétrico $W4$ dividido pela distância do sulco s daria

$$\frac{W4}{s} = f_{ab} \times Av$$

e a intensidade linear de desgaste

$$\frac{W1}{s} = f_{ab} \times \frac{Av}{v}$$

Este modelo permite levar em conta os mecanismos em operação. No caso de materiais frágeis, onde há trincamento dos materiais que provocam destaque de partículas, ele propôs

$$f_{ab} = 1 + \frac{(A1 + A2)}{A_v} \quad \text{ou} \quad \frac{W1}{s} = \frac{A_v}{A} + \frac{(A1 + A2)}{A_v}$$

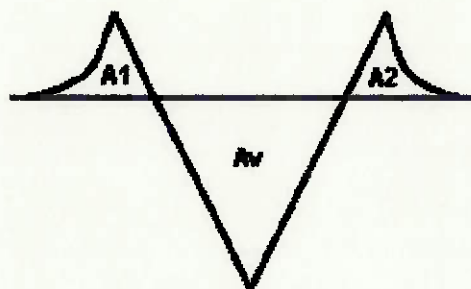


Figura 12 - Seção transversal de um sulco de desgaste produzido por uma partícula abrasiva

Bond propôs relacionar o desgaste com a energia consumida no processo abrasivo. O termo "gramas de metal gasto por tonelada britada" não é satisfatório, pois não prevê as diferenças das granulometrias do produto alimentado na máquina e as diferenças de britabilidade. O termo que ele propôs foi "gramas de metal gasto por quilowatt-hora consumido no processo".

Bond avançou mais nesse conceito e desenvolveu um teste de abrasão, que será descrito no item sobre ensaios para medição do desgaste, e correlacionou os resultados, aos quais chamou de A_i - Índice de abrasão, com experiências no campo.

Dentro de seu trabalho, Bond desenvolveu também um fator para medir a energia consumida no processo de cominuição, que é o WI (Work Index), fator de trabalho que pode ser definido como o valor do trabalho em kWh necessário para reduzir uma tonelada de um determinado material, com tamanho de alimentação teoricamente infinito, a um produto 80% passante na malha de 100 μm .

A fórmula empírica para cálculo da potência necessária a ser aplicada é a seguinte

$$W = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

onde W = potência necessária

WI = Work Index

P_{80} = malha em micra pela qual passa 80% do produto

F_{80} = malha em micra pela qual passa 80% da alimentação

Bond tentou correlacionar o A_i com o W_i , mas não conseguiu. O índice de abrasão representa um parâmetro da efetiva capacidade de riscar do mineral em realção a um metal de 500 Brinell de dureza, enquanto o W_i é um parâmetro de resistência à quebra. Não se deve esperar um fator muito próximo para esta correlação.

V.2.Desgaste por Corrosão

Esta forma de desgaste ocorre em situações na qual o meio circundante interage quimicamente com uma superfície. Se o produto da reação está desgastado da superfície, o desgaste corrosivo ocorreu.

O processo de corrosão não pode ser separado do processo de desgaste; eles operam concorrentemente e influenciam reciprocamente. A corrosão usualmente acelera o desgaste, mas não sempre. O produto da corrosão sobre a superfície baixa a taxa de corrosão no material (figura 13a). Quando essa camada é removida por abrasão, a taxa de corrosão é acelerada. Se a camada é frágil, pode ser assumido que em qualquer lugar da superfície, toda a espessura da camada é retirada de uma vez (figura 14). Pode acontecer em alguns casos que a reação química se mantenha indefinidamente na mesma taxa inicial (figura 13b), pois não há formação do filme protetor. Nestas circunstâncias a perda de material na superfície ocorre em uma taxa essencialmente independente de qualquer deslize que possa ocorrer, mas a qual é determinada pelas características do processo de corrosão.

Em poucos casos onde a camada resultante da reação é mais dúctil e flexível que a superfície da qual é formada, há uma alta probabilidade que, quando o desgaste ocorre, apenas parte da camada será removida (figura 15).

A corrosão intergranular pode enfraquecer a camada próximo à superfície e com isso acelerar o processo de desgaste. Os fragmentos do desgaste podem originar essencialmente partículas metálicas, que podem intensificar o desgaste abrasivo. Por outro lado, um produto de reação branda pode originar um lubrificante sólido. Em temperaturas elevadas, a dura camada oxidada, se bem suportada pelo substrato, pode resistir à abrasão.

A interação entre o desgaste e a corrosão é complexa. Foi introduzida aqui principalmente para servir como um aviso para considerar o fator corrosão quando na seleção de materiais resistentes ao desgaste.

O desgaste corrosivo é aparente durante a moagem a úmido na qual a baixa resistência do filme de corrosão produzido é desgastado. Quando o desgaste ocorre pelo mecanismo de corrosão, a composição química do metal é um fator dominante. A microestrutura do aço ou ferro fundido podem também influenciar na formação de

filmes oxidados. Outro tipo de desgaste corrosivo que ocorre durante a moagem a úmido envolve interação galvânica entre a eletroatividade dos minerais e do material. Partículas minerais, particularmente minerais sulfetados, agem como cátodos e o material como ânodos, e essa junção galvânica acelera o desgaste. Dependendo do pH da polpa, tamanho do moinho e corpos moedores, composição química, microestrutura, dureza do material, a atmosfera prevalente no moinho e a natureza eletroquímica e dureza do mineral, qualquer um dos itens acima podem ser dominantes no mecanismo de desgaste na moagem a úmido.

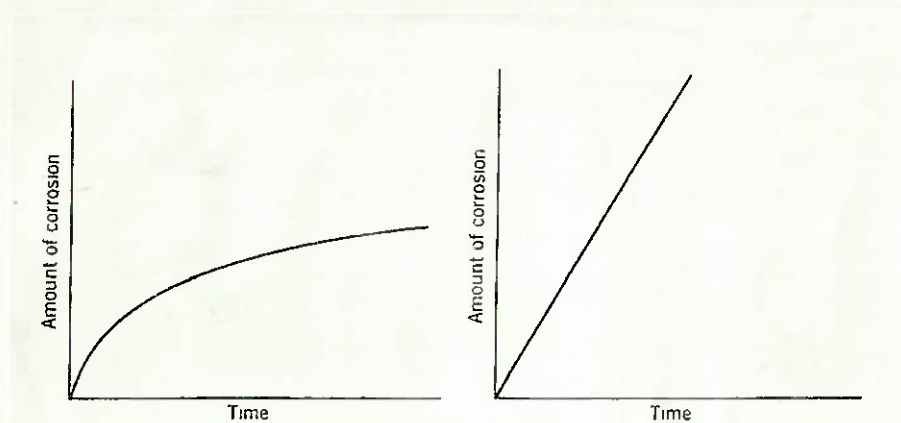


Figura 13 - Relação corrosão/tempo para um sistema com formação do filme protetor (a) e sem filme protetor (b)

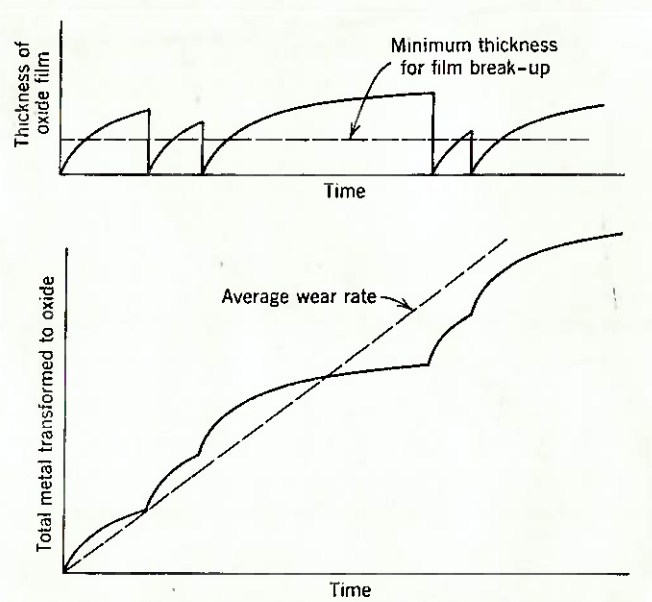


Figura 14 - Ilustração esquemática do processo de desgaste corrosivo. Assume-se que o óxido é frágil e removido completamente.

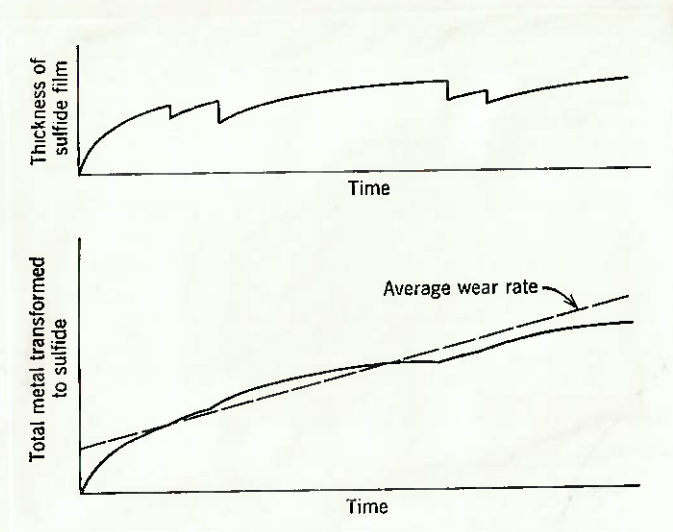


Figura 15 - Ilustração esquemática do processo de desgaste corrosivo. Assume-se que o sulfeto é desbastado inteiramente sem expor o metal puro. Note que a taxa de desgaste é menor que na figura 14.

V.2.1. Aspectos Quantitativos do Desgaste Corrosivo

Está claro nas figuras 14 e 15 que, se nós temos um processo em que um filme se forma na superfície, este filme é removido continuamente durante o deslizamento, a taxa de desgaste a cada passo deve ser menor que a espessura do filme. Desde que a espessura do filme é tipicamente da ordem de 10^{-6} cm, e desde que o diâmetro da junção pode ser assumido ser 10^{-3} cm, nós podemos escrever

$$\text{Espessura Desgastada (h)} = \frac{k}{3} \times \text{Distância de Deslizamento (x)}$$

onde k = constante de desgaste

Se substituirmos $h=10^{-6}$ ou menos e $x=10^{-3}$, nós obtemos $k=3 \times 10^{-3}$ como um máximo valor da taxa de desgaste. Talvez $k=10^{-6}$ a 10^{-6} poderia ser típicos valores na prática, estes sendo menores que para deslizamentos não lubrificados, mas maiores que para superfícies revestidas por uma camada efetiva de lubrificante.

Naturalmente o caso de uma excessiva corrosão não pode ser analisado por este caminho, desde que nenhum filme é formado.

V.3.Desgaste por Adesão (Metal-Metal)

O desgaste por adesão ocorre quando há o deslizamento de uma superfície sobre outra, estando estas superfícies submetidas a uma pressão. Esta pressão e o cisalhamento que ocorre entre as superfícies (que possuem uma certa rugosidade) causa uma deformação plástica na superfície de contato, adesão das partículas de uma região dos materiais em contato e, conseqüentemente, a formação de uma junção localizada (vide figura 16).

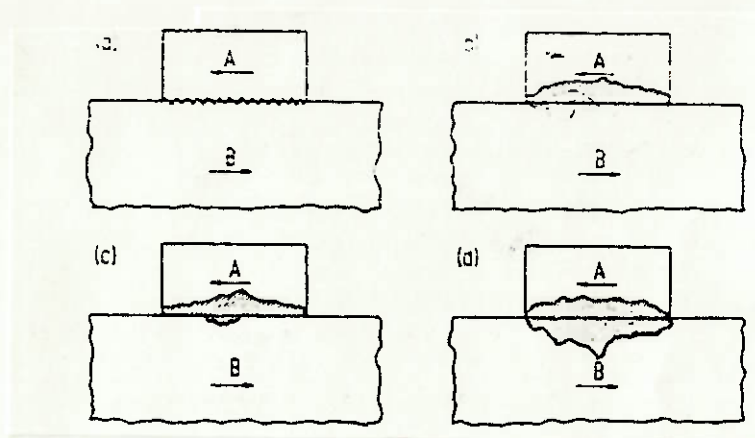


Figura 16 - Formação da junção no mecanismo de desgaste adesivo

O deslizamento relativo entre os dois corpos em contato causa a ruptura desta junção, e pode haver transferência de material de um corpo para outro.

No caso da figura 16, admitindo que A tem dureza menor que B, a junção se formará inicialmente em A e posteriormente em B, em menor ou maior quantidade dependendo de sua dureza.

A separação da junção ocorrerá somente em A se sua resistência ao cisalhamento for menor que a resistência de B.

Se a junção tiver a resistência ao cisalhamento muito mais elevada que a resistência de A e B, e estas forem aproximadas, ela pode se desprender em partes iguais de ambos, havendo transferência de material em ambos os sentidos.

Este material transferido pode depois ser arrancado, devido a rugosidade da superfície de contato, ficando livre nesta superfície, como é mostrado na figura 17.

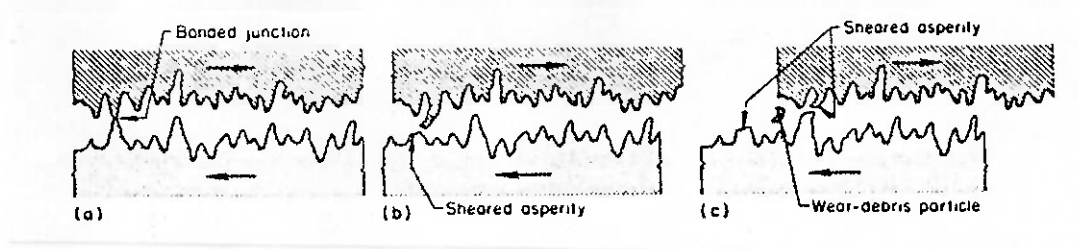


Figura 17 - Arrancamento da partícula transferida

Os primeiros experimentos sobre desgaste adesivo foram realizados com metais, e o processo de adesão foi referido como "welding". Isto foi, de certo modo, uma infeliz escolha de palavra, desde que entre os metalurgistas o termo "welding" é usualmente restringido para junções entre metais, produzido a altas temperaturas, e acompanhado pela interdifusão e recristalização de material próximo a interface original dos átomos da superfície dos dois metais (figura 18A). No caso de desgaste adesivo as temperaturas nas regiões de contato real podem ser muito baixas, e a interdifusão e recristalização atômica podem ser ausentes. As condições da interface durante o desgaste adesivo são muito similares, entretanto, àqueles prevalecendo no processo de "welding frio", na qual pedaços puros de metais são unidos por serem juntamente pressionados enquanto a área de contato deles é deformado e estirado.

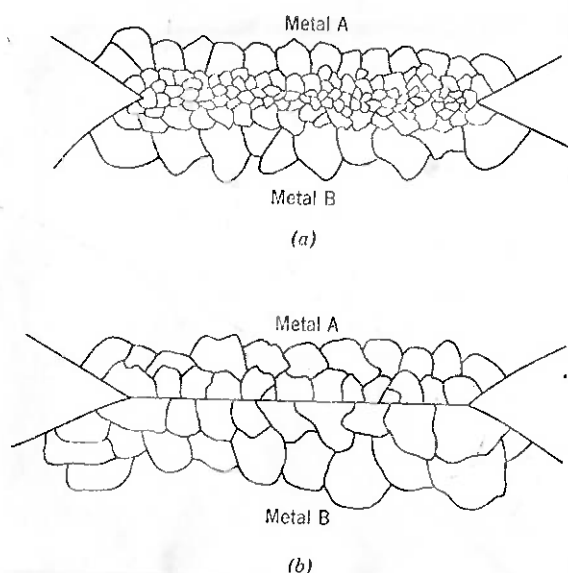


Figura 18 - (A) Um típico weld metalúrgico. (B) Uma típica junção adesiva

As teorias que procuram explicar a formação da junção estão representadas na figura 19.

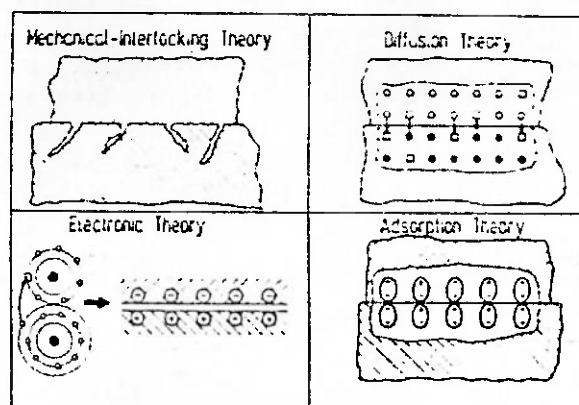


Figura 19 - Representação das diferentes teorias que explicam a adesão das partículas

- Teoria do Travamento Mecânico Mútuo

Propõe que a junção se forme devido ao travamento mecânico existente entre as superfícies irregulares.

- Teoria da Difusão

Ocorre difusão de átomos e moléculas através da superfície de contato entre os dois corpos até uma determinada região, causando a adesão das partículas desta região e formando a junção.

- Teoria Eletrônica

Há uma transferência de elétrons através da superfície de contato entre os dois corpos, que resulta na formação de duas camadas eletrônicas carregadas nesta superfície. A adesão das partículas se dá devido às forças eletrostáticas destas camadas.

- Teoria da Adsorção

Atribui a adesão das partículas às ligações secundárias como a força de Van der Waals.

V.4.Desgaste por Fadiga Superficial

Dois tipos de desgaste por fratura são comuns. O primeiro é observado normalmente em engrenagens e mancais, e o segundo é observado em materiais frágeis, cerâmicos sob movimento de rotação ou ondulação ou condições de deslizamento.

O primeiro destes, genericamente referido como desgaste por fadiga superficial, é de grande importância prática pois constitui a principal maneira de falha de elementos de contatos giratórios. Esta forma de desgaste é atentamente ligado com o fenômeno geral de fadiga dos materiais, na qual há uma interrelação característica entre a pressão exercida sobre o material e o número de ciclos requeridos para produzir a fratura.

A fadiga dos materiais ocorre na sequência que inicia com a deformação plástica, depois o encruamento e finalmente a nucleação e crescimento de trincas.

As duas importantes diferenças entre a fadiga comum e a fadiga superficial são, primeiro, que as flutuações na vida são muito mais severas na situações de contato rolantes. Segundo, há um fenômeno importante da pressão limite de fadiga a qual é observada no teste de capacidade comum, em consequência da qual existe uma pressão (usualmente entre $1/3$ e $1/2$ da pressão cedida) abaixo da qual um material desfruta de uma duração à fadiga infinita. Não existe tais limites no caso de fadiga superficial. Será apreciado que ambas as diferenças causam mais dificuldade em projetar elementos de contato rolantes para predizer uma vida longa motivado pela alta pressão de carregamento. Desta forma nós estamos incapazes de projetar elementos de contatos rolantes cujas pressões de contato estão abaixo de algum valor definitivo e ganha a segurança a qual nós eliminamos a falha por fadiga.

O estudo experimental do desgaste por fadiga superficial é um pouco difícil. Até que ocorram lascamentos existem poucas observações as quais podem ser feitas, embora alguns investigadores fizeram estudos metalográficos de materiais de contatos rolantes e descobriram que a quebra a qual iniciou do lascamento é às vezes localizada na superfície, e outras vezes abaixo da superfície (figura 20). A ocorrência da quebra sub-superficial é provavelmente relativo ao fato que o ponto com máxima pressão de desgaste e, portanto, o ponto com máxima tendência à plasticidade é localizado a uma pequena distância abaixo da superfície (figura 21).

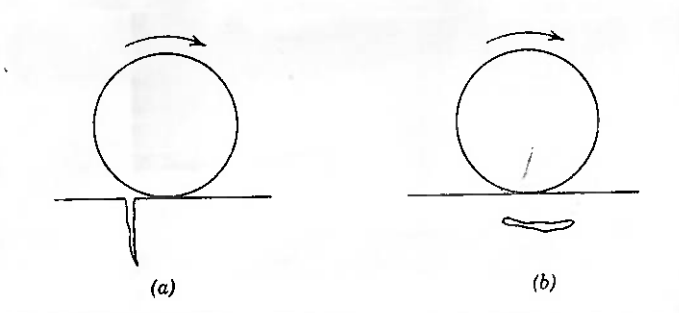


Figura 20 - Aspecto de típica falha por fadiga superficial em seus estágios iniciais. (a) Quebra superficial e (b) Quebra sub-superficial.

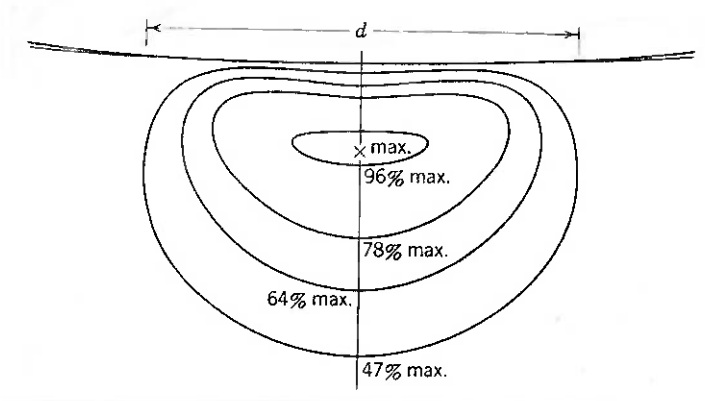


Figura 21 - Posição de máxima pressão para contato elástico de esfera e superfície horizontal

Quando o desgaste por fadiga é um problema, é geralmente aliviado por melhorias na qualidade do aço produzido ou reduzindo o carregamento. Quase nada é conhecido a cerca do problema de reduzir a dissipação entre repetidas corridas. Isto é um importante problema, uma vez que em muitas aplicações é vital ser capaz de eliminar falhas iniciais.

VI. Ensaios para Medição do Desgaste

Pode-se considerar como o teste ideal aquele que um material sofre quando é posto em serviço em condições reais. Todavia, tem um custo alto, leva, normalmente, tempos muito longos e o controle das variáveis é difícil.

Os testes de laboratório permitem construir sistemas de desgaste simples, onde se consegue alto grau de controle das variáveis e saber, de forma rápida e econômica, o efeito dessas variáveis sobre o desgaste de materiais.

O teste de laboratório ideal deve ser simples, rápido, pequeno em escala, reproduzível e similar em uma grande parte das condições de campo.

No trabalho de Blickensderfer (12) para o "Bureau of Mines" dos EUA, descrevem-se os principais e mais significativos testes hoje propostos e ainda é feita uma análise comparativa entre eles. A figura 22 mostra, em esquema, alguns dos principais testes utilizados.

Blickensderfer conclui, em seu trabalho, que existe sérias questões sobre a utilidade dos testes de laboratório. A principal delas seria que as condições de campo, com as quais cada teste se correlaciona, não estão bem definidas. Postula que o tipo de abrasivo encontrado no campo pode ser um fator mais importante que os parâmetros de laboratório para afetar o desgaste e propõe um novo enfoque do problema, ou seja, a correlação com o campo, o que levaria à diminuição no número de testes e à sua simplificação.

Alguns testes estão padronizados, como é o caso do teste de mandíbulas pela ASTM. É um teste que praticamente simula as condições de campo, pois utiliza em equipamento semelhante ao industrial. É, todavia, difícil de se realizar, pois o mineral testado deve estar na granulometria correta e os volumes utilizados são, relativamente, muito grandes.

Neste teste o corpo de prova é a mandíbula do britador. Pode-se usar a mandíbula fixa ou móvel, dando-se preferência à fixa, onde desgaste é maior.

Pode-se dividir a mandíbula em duas (figura 23), de modo a poder se comparar diferentes materiais ao mesmo tempo, diminuindo-se, assim, as pequenas variações que possam ocorrer no teste.

O teste da roda de borracha é o mais usado nos EUA que qualquer outro teste. O motivo não é que ele seja o melhor teste, mas que o equipamento é relativamente fácil e barato de construir, o teste é razoavelmente antigo e foi um dos primeiros a serem aprovados pela ASTM (G65-81). A condição do teste é classificado como três corpos de desgaste sob carga moderada. É suposto simular condições de campo tais como minerais liberados ou deslizamentos de terra e quedas para baixo de um chute ou sobre um fundo de caminhão.

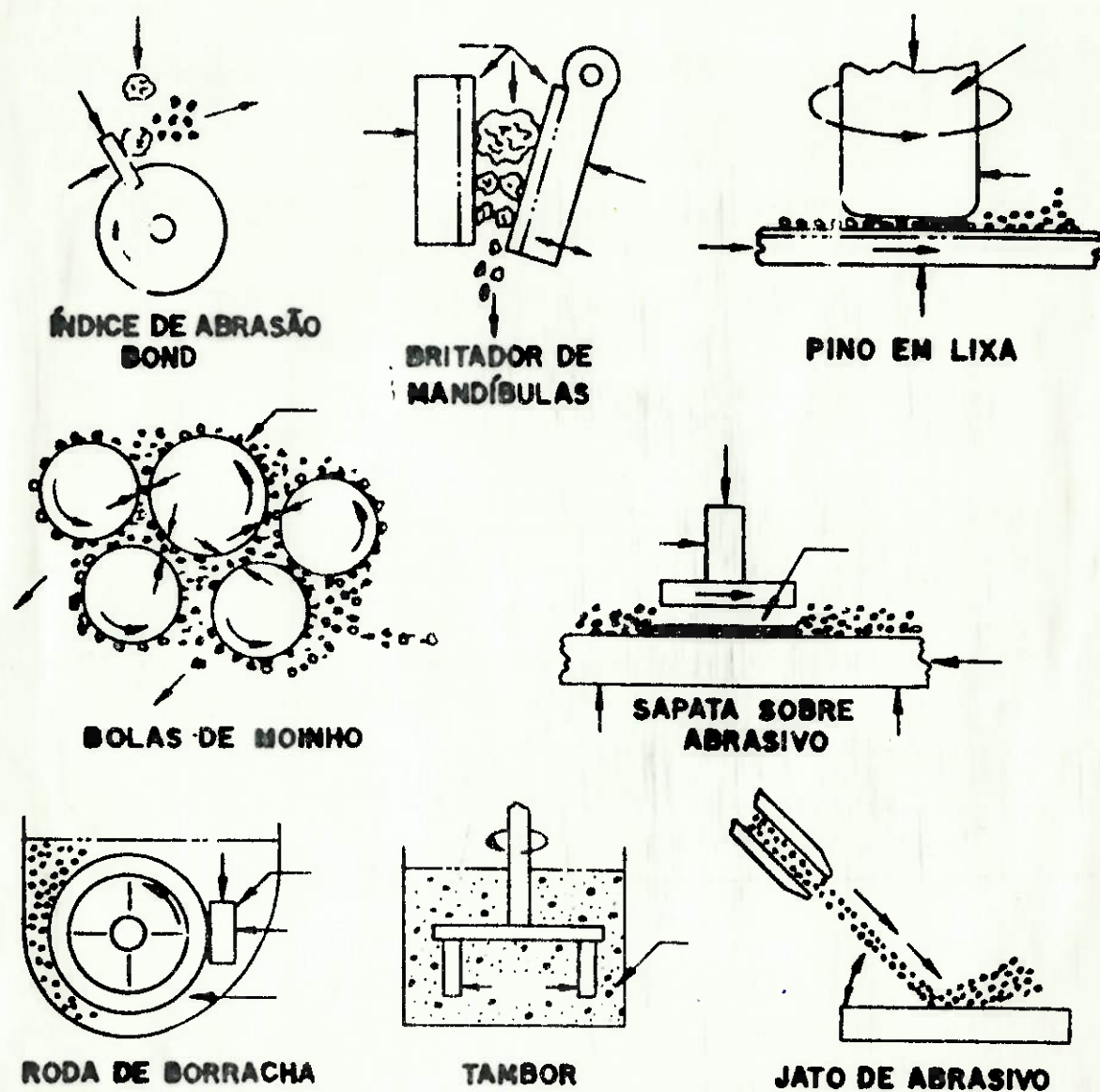


Figura 22 - Alguns ensaios para medição de desgaste

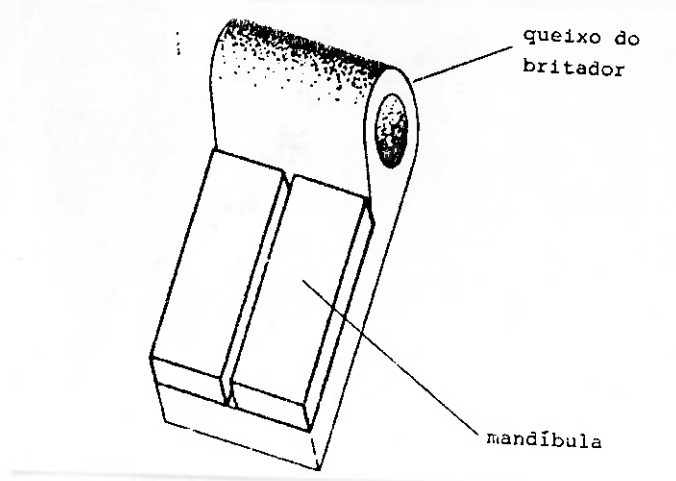


Figura 23 - Detalhe da mandíbula do britador

Testes de desgaste na qual o fim de uma espécie de pino é movimentado sobre um tecido abrasivo ou papel que é muito comum. A condição do teste é considerado como dois corpos sob carga relativamente alta (porque as partículas abrasivas são quebradas drasticamente). As vantagens do teste de pino são:

- Pinos são pequenos e fáceis de preparar
- O teste é simples de se conduzir
- O tempo do teste é muito curto (uns poucos minutos)
- Reprodução é excelente, ao redor de $\pm 1\%$

Outras variações do equipamento utilizado no teste do pino fazem uso de uma correia, mesa ou tambor para suportar o abrasivo. É importante que o pino é movimentado em um molde tal que abrasivo novo é sempre encontrado. Os abrasivos disponíveis comercialmente mais comuns são carbeto de silício, alundum, granada e sílex. A configuração do equipamento é mostrado na figura 24.

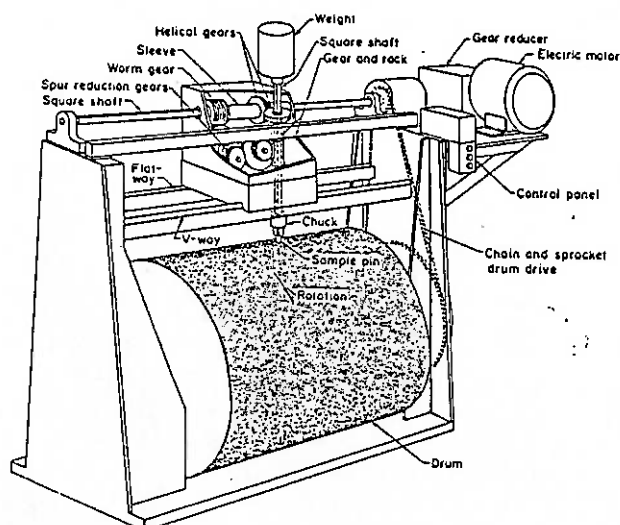


Figura 24 - Máquina de teste de pino por tambor do Bureau of Mines

O teste de abrasão de Bond é efetuado em um pequeno tambor rotativo com um rotor concêntrico no seu interior, onde é fixada uma placa de aço padrão. O objetivo é desgastar a placa, acionando o tambor e o rotor juntamente com a amostra. O Índice de abrasão é numericamente igual ao peso em gramas perdido pela placa. Abaixo são dados os índices de abrasão de alguns minerais. Observe-se que, quanto maior o teor de SiO₂, maior é o Ai.

Material	Índice de Abrasão (Ai)	SiO ₂ contida (%)
Dolomita	0,01 – 0,05	0 – 10
Gnaise	0,50 ± 0,10	60 – 70
Granito	0,55 ± 0,11	55 – 75
Quartzito	0,75 ± 0,12	85 – 99
Basalto	0,20 ± 0,09	40 – 50

Tabela IV - Índices de abrasão de alguns minerais

Para possibilitar o uso prático do Ai, foram feitos estudos de desgaste de peças como: mandíbulas, mantos, bolas, barras, revestimentos de moinhos, em função do índice de abrasão, determinando a relação entre desgaste de peças, em função da energia aplicada. Os resultados poderão ser encontrados na tabela abaixo.

Máquina	Peça de Desgaste	Fórmula (q em g/kWh)
Britadores de mandíbulas de um eixo	Mandíbula fixa	$q = 5,81 \times e^{4,74 \times Ai}$
	Mandíbula móvel	$q = 3,38 \times e^{4,74 \times Ai}$
Britadores de mandíbulas de dois eixos	Mandíbula fixa	$q = 1,94 \times e^{4,74 \times Ai}$
	Mandíbula móvel	$q = 1,55 \times e^{4,74 \times Ai}$
Britadores giratórios 1 ^{os} e 2 ^{os}	Manto e revestimento	$q = e^{4,16 \times Ai}$
Hydrocones	Manto e côncavo	$q = 0,72 \times e^{4,16 \times Ai}$
Cones	Manto e côncavo	$q = 0,87 \times e^{4,16 \times Ai}$
Britadores de rolos	Revestimento dos rolos	$q = 48,6 \times Ai^{0,66}$
Moinho de barras (via úmida)	Barras	$q = 155 \times (Ai - 0,02)^{0,2}$
	Revestimentos	$q = 15,5 \times (Ai - 0,015)^{0,3}$
Moinho de bolas (via úmida)	Bolas	$q = 155 \times (Ai - 0,015)^{0,33}$
	Revestimentos	$q = 11,6 \times (Ai - 0,015)^{0,3}$
Moinho de bolas (via seca)	Bolas	$q = 22,2 \times \sqrt{Ai}$
	Revestimentos	$q = 2,22 \times \sqrt{Ai}$

Notas: 1- As fórmulas se aplicam para $0,02 < Ai < 0,8$

2- Foram consideradas como material das peças de desgaste as seguintes ligas:

- britadores/cones/hydrocones - aço manganês tipo Hatfield
- bolas de moinhos - aço liga com dureza 400 HB
- barras - SAE 1090
- revestimento - ligas com dureza 300-350 HB

Tabela V - Fórmulas empíricas para determinação de desgaste em função do índice de abrasão

Posteriormente, com a utilização de ferros fundidos brancos, principalmente na moagem, as relações acima perderam a validade. Todavia, é um campo a ser pesquisado.

O teste com jato de abrasivo pretende simular o desgaste que ocorre em bicas, ciclones e outros equipamentos que conduzem material particulado dentro de uma corrente de gás. É classificado como desgaste com dois corpos.

VII. Metodologia, Planejamento e Descrição dos Ensaios

Os ensaios para medição das taxas de desgaste foram divididos em duas partes:

- i. Avaliação do comportamento da taxa de desgaste
- ii. Testes com reagentes

VII.1. Características dos Corpos Moedores

As bolas utilizadas em todos os ensaios que serão descritos posteriormente são bolas de 1 ½".

O material utilizado para confecção das bolas é ferro fundido branco com alto cromo, cuja composição química média é dada na tabela VI.

C	Si	Mn	Cr
2,72%	1,24%	0,80%	17,9%

Tabela VI - Composição química média das bolas de 1 ½"

VII.2. Avaliação do Comportamento da Taxa de Desgaste

O objetivo destes ensaios é o de observar o comportamento da taxa de desgaste mediante várias corridas de uma hora cada, medindo a massa perdida pelas bolas após cada corrida. Cada corrida foi executada sempre com uma nova carga de minério de ferro.

Para a realização destes ensaios foram utilizados:

- Minério de ferro (itabirito) em alíquotas de 1,5 kg;
- 180 bolas de 1 ½" novas (aproximadamente 30 kg);
- Água destilada;
- Moinho de laboratório de 20 cm x 25 cm;
- Balança analítica para pesagem das bolas.

Todo o minério de ferro foi homogeneizado em pilha alongada e, em seguida, dividido em alíquotas de 1,5 kg.

Primeiramente, realizou-se uma série de 8 (oito) moagens a seco, utilizando-se uma carga de 60 bolas novas. A quantidade de minério utilizada em cada corrida foi de 1,5 kg. Antes de iniciar-se os ensaios, pesou-se uma a uma as 60 bolas em balança analítica, obtendo-se, assim, a massa inicial das bolas. Após cada moagem, lavaram-se as bolas e novamente pesaram-se as mesmas. O desgaste foi medido pela perda de massa por cada bola após cada corrida. Tem-se, assim, a perda média ocorrida em cada ensaio.

Posteriormente, realizou-se uma série de 10 (dez) moagens a úmido, utilizando-se outras 60 bolas novas. Nestes ensaios, a quantidade de minério utilizado e de água foram, respectivamente, 1,5 kg e 1 litro, o que resulta em uma porcentagem de sólidos de 60% (w/w). A água possui um pH em torno de 6. Procedimento para medida do desgaste foi a mesma que nos ensaios de moagem a seco.

Todos os resultados podem ser observado nas figuras 25 e 26 e nas tabelas VII, VIII, IX e X.

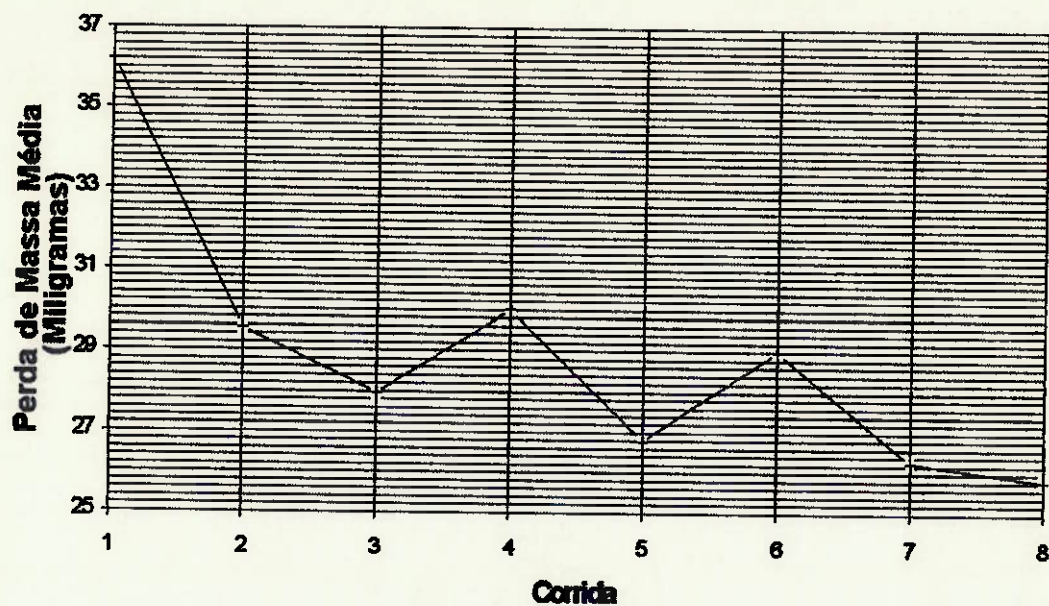


Figura 25 - Taxa de desgaste horário na moagem a seco

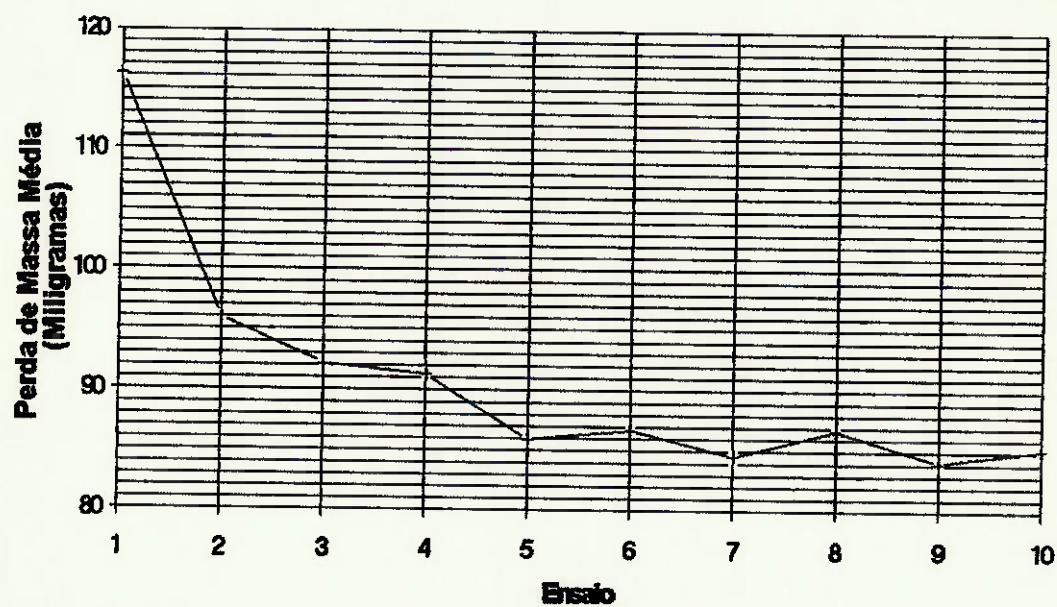


Figura 26 - Taxa de desgaste horário na moagem a úmido

Bola	Massa Inicial	Massa de Bolas Após os Ensaios (gramas)							
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
1	159,0598	159,0116	158,9825	158,9550	158,9260	158,9000	158,8735	158,8491	158,8246
2	159,6344	159,5958	159,5643	159,5352	159,5069	159,4796	159,4519	159,4262	159,4008
3	159,7307	159,6902	159,6596	159,6309	159,6001	159,5729	159,5449	159,5178	159,4906
4	160,3710	160,3270	160,2943	160,2659	160,2364	160,2096	160,1838	160,1570	160,1318
5	160,5222	160,4800	160,4486	160,4212	160,3923	160,3654	160,3378	160,3128	160,2884
6	160,8755	160,8362	160,8037	160,7741	160,7428	160,7154	160,6870	160,6598	160,6328
7	161,0200	160,9760	160,9479	160,9167	160,8853	160,8552	160,8270	160,8000	160,7740
8	161,3983	161,3559	161,3269	161,2970	161,2684	161,2420	161,2144	161,1891	161,1624
9	161,8939	161,8572	161,8304	161,8042	161,7750	161,7508	161,7282	161,7012	161,6780
10	162,3144	162,2656	162,2344	162,2050	162,1759	162,1502	162,1214	162,0961	162,0718
11	163,1072	163,0739	163,0480	163,0171	162,9909	162,9647	162,9391	162,9139	162,8906
12	163,1543	163,1128	163,0812	163,0501	163,0174	162,9890	162,9537	162,9306	162,9031
13	163,2600	163,2163	163,1850	163,1544	163,1229	163,0947	163,0655	163,0380	163,0103
14	163,5109	163,4720	163,4412	163,4104	163,3802	163,3516	163,3232	163,2970	163,2689
15	164,4514	164,4071	164,3767	164,3453	164,3145	164,2873	164,2536	164,2314	164,2037
16	164,6186	164,5843	164,5550	164,5203	164,4886	164,4571	164,4239	164,3934	164,3635
17	164,6472	164,6083	164,5824	164,5508	164,5233	164,4972	164,4705	164,4482	164,4210
18	164,6510	164,6270	164,6048	164,5864	164,5370	164,5115	164,4736	164,4525	164,4320
19	164,9580	164,9067	164,8740	164,8436	164,8140	164,7879	164,7605	164,7345	164,7089
20	165,2997	165,2717	165,2519	165,2256	165,2025	165,1787	165,1525	165,1262	165,0982
21	165,3515	165,3099	165,2760	165,2454	165,2142	165,1844	165,1544	165,1298	165,1064
22	165,3771	165,3351	165,3040	165,2768	165,2482	165,2204	165,1932	165,1679	165,1412
23	165,3884	165,3444	165,3128	165,2834	165,2536	165,2246	165,1963	165,1686	165,1432
24	165,5054	165,4676	165,4339	165,4030	165,3706	165,3410	165,3078	165,2792	165,2511
25	165,8155	165,7734	165,7413	165,7083	165,6760	165,6467	165,6163	165,5876	165,5594
26	166,0457	166,0029	165,9721	165,9421	165,9121	165,8846	165,8559	165,8291	165,8023
27	166,5512	166,5075	166,4759	166,4454	166,4130	166,3832	166,3529	166,3231	166,2943
28	166,8996	166,8756	166,8504	166,8329	166,8060	166,5866	166,5669	166,5403	166,5191
29	167,5495	167,5207	167,4904	167,4655	167,4389	167,4128	167,3853	167,3613	167,3364
30	168,0565	168,0224	167,9906	167,9628	167,9345	167,9046	167,8758	167,8498	167,8233
31	168,6564	168,6152	168,5840	168,5530	168,5210	168,4915	168,4603	168,4312	168,4022
32	169,0591	169,0321	169,0050	168,9718	168,9388	168,9070	168,8758	168,8488	168,8201
33	169,0851	169,0399	169,0133	168,9838	168,9583	168,9370	168,9103	168,8866	168,8645
34	169,1484	169,1087	169,0820	169,0506	169,0173	168,9875	168,9556	168,9269	168,8991
35	169,1676	169,1195	169,0859	169,0526	169,0193	168,9900	168,9570	168,9315	168,9048
36	169,1764	169,1548	169,1300	169,1092	169,0830	169,0622	169,0349	169,0145	168,9921
37	169,2791	169,2385	169,2096	169,1768	169,1459	169,1171	169,0905	169,0627	169,0361
38	169,3092	169,2653	169,2349	169,2101	169,1830	169,1576	169,1303	169,1051	169,0810
39	169,5264	169,4826	169,4503	169,4220	169,3909	169,3633	169,3348	169,3084	169,2809
40	169,5732	169,5480	169,5264	169,5013	169,4721	169,4502	169,4220	169,3999	169,3764
41	169,6338	169,6075	169,5893	169,5599	169,5207	169,4899	169,4634	169,4276	169,4040
42	169,9357	169,8994	169,8713	169,8395	169,8081	169,7783	169,7470	169,7189	169,6902
43	170,0919	170,0548	170,0233	170,0069	169,9773	169,9523	169,9236	169,8992	169,8750
44	170,1482	170,1173	170,0767	170,0604	170,0228	169,9940	169,9637	169,9311	169,9044
45	170,7199	170,6768	170,6473	170,6153	170,5846	170,5510	170,5169	170,4873	170,4609
46	170,8394	170,7986	170,7704	170,7470	170,7170	170,6881	170,6610	170,6361	170,6117
47	171,0966	171,0690	171,0387	171,0171	170,9882	170,9638	170,9359	170,9095	170,8850
48	171,2846	171,2649	171,2394	171,2166	171,1936	171,1673	171,1418	171,1173	171,0951
49	171,5066	171,4815	171,4482	171,4301	171,4004	171,3769	171,3500	171,3247	171,3000
50	171,8451	171,8141	171,7851	171,7618	171,7340	171,7112	171,6835	171,6585	171,6343
51	172,0844	172,0407	172,0062	171,9718	171,9380	171,9082	171,8760	171,8469	171,8191
52	172,2710	172,2367	172,2047	172,1799	172,1490	172,1214	172,0941	172,0672	172,0411
53	172,6900	172,6583	172,6273	172,5962	172,5617	172,5305	172,4960	172,4632	172,4340
54	172,9331	172,9051	172,8764	172,8506	172,8219	172,7983	172,7674	172,7422	172,7155
55	173,7889	173,7578	173,7317	173,7045	173,6760	173,6522	173,6250	173,6001	173,5756
56	174,7253	174,6867	174,6575	174,6313	174,6033	174,5787	174,5505	174,5249	174,4999
57	176,8685	176,8468	176,8338	176,8081	176,7646	176,7388	176,7058	176,6813	176,6540
58	178,3982	178,3757	178,3453	178,3224	178,2948	178,2717	178,2435	178,2186	178,1966
59	179,7453	179,7284	179,7042	179,6777	179,6442	179,6231	179,5922	179,5672	179,5402
60	179,9029	179,8730	179,8423	179,8170	179,7894	179,7656	179,7348	179,7084	179,6818
Total	10063,3052	10061,1326	10059,3607	10057,6831	10055,8825	10054,2742	10052,5343	10050,9573	10049,4077
Média	167,7218	167,6855	167,6560	167,6281	167,5980	167,5712	167,5422	167,5160	167,4901
Desvio	4,9621	4,9667	4,9674	4,9688	4,9696	4,9693	4,9687	4,9688	4,9687

Tabela VII - Massa de bolas obtidas por ensaio - moagem a seco

Bola	Perda de Massa por Ensaio (miligramas)							
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
1	48,20	29,10	27,50	29,00	26,00	26,50	24,40	24,50
2	38,60	31,50	29,10	28,30	27,30	27,70	25,70	25,40
3	40,50	30,60	28,70	30,80	27,20	28,00	27,10	27,20
4	44,00	32,70	28,40	29,50	26,80	25,80	26,80	25,20
5	42,20	31,40	27,40	28,90	26,90	27,60	25,00	24,40
6	39,30	32,50	29,60	31,30	27,40	28,40	27,20	27,00
7	44,00	28,10	31,20	31,40	30,10	28,20	27,00	26,00
8	42,40	29,00	29,90	28,60	26,40	27,60	25,30	26,70
9	36,70	26,80	26,20	29,20	24,20	22,60	27,00	23,20
10	48,80	31,20	29,40	29,10	25,70	28,80	25,30	24,30
11	33,30	25,90	30,90	26,20	26,20	25,60	25,20	23,30
12	41,60	31,60	31,10	32,70	28,40	35,30	23,10	27,60
13	43,70	31,30	30,60	31,50	26,20	29,20	27,50	27,70
14	36,90	30,80	30,80	30,20	28,60	28,40	26,20	28,10
15	44,30	30,40	31,40	30,80	27,20	33,80	22,10	27,70
16	34,30	29,30	34,70	33,50	29,70	33,20	30,50	29,90
17	38,90	26,90	31,60	27,50	26,10	26,70	24,30	25,20
18	24,00	22,20	38,40	29,40	25,60	37,90	21,10	20,50
19	51,30	32,70	30,40	29,60	26,10	27,40	26,00	25,60
20	28,00	19,80	26,30	23,10	23,80	26,20	26,30	28,00
21	41,60	33,90	30,60	31,20	29,80	30,00	24,60	23,40
22	42,00	31,10	27,20	30,60	25,80	27,20	25,30	26,70
23	42,00	31,60	29,40	29,80	29,00	28,30	26,70	26,40
24	37,80	33,70	30,90	32,40	29,60	33,20	28,60	28,10
25	42,10	32,10	33,00	32,30	29,30	30,40	28,70	28,20
26	42,80	30,80	30,00	30,00	27,50	28,70	26,80	26,80
27	43,70	31,60	30,50	32,40	29,80	30,30	29,80	28,80
28	24,00	25,20	17,50	26,90	19,40	19,70	26,60	21,20
29	28,80	30,30	24,90	26,60	26,30	27,30	24,00	24,90
30	34,10	31,80	27,80	28,30	29,90	28,80	26,00	26,50
31	41,20	31,20	31,00	32,00	29,50	31,20	29,10	29,00
32	27,00	27,10	33,20	33,20	31,60	31,20	27,00	28,70
33	45,20	26,60	29,50	25,50	21,30	26,70	23,70	22,10
34	37,70	26,70	31,40	33,30	29,80	31,90	28,70	27,80
35	48,10	33,60	33,30	33,30	29,30	33,00	25,50	26,70
36	21,60	24,80	20,80	26,20	20,80	27,30	20,40	22,40
37	40,60	28,90	32,80	30,90	28,80	26,60	27,80	26,60
38	43,90	30,40	24,80	27,10	25,40	27,30	25,20	24,10
39	43,80	32,30	28,30	31,10	27,60	28,50	26,40	27,50
40	25,20	21,60	25,10	29,20	21,90	28,20	22,10	23,50
41	26,30	38,20	18,40	30,20	30,80	26,60	35,80	23,60
42	36,30	28,10	31,80	31,40	29,80	31,30	28,10	28,70
43	37,10	31,50	16,40	29,60	25,00	28,70	24,40	24,20
44	30,90	40,60	16,30	37,60	28,80	30,30	32,60	26,70
45	43,30	29,30	32,00	30,70	33,60	34,10	29,60	26,40
46	40,80	28,20	23,40	30,00	28,90	27,10	24,90	24,40
47	27,60	30,30	21,60	28,90	24,40	27,90	26,40	24,50
48	19,70	25,50	22,80	23,00	26,30	25,50	24,50	22,20
49	25,10	33,30	18,10	29,70	23,50	26,90	25,30	24,70
50	31,00	29,00	23,30	27,80	22,80	27,70	25,00	24,20
51	43,70	34,50	34,40	33,80	29,80	32,20	29,10	27,80
52	34,30	32,00	24,80	30,90	27,60	27,30	26,90	26,10
53	31,70	31,00	29,10	36,50	31,20	34,50	32,80	29,20
54	28,00	28,70	25,80	28,70	23,60	30,90	25,20	26,70
55	31,10	26,10	27,20	28,50	23,80	27,20	24,90	24,50
56	38,60	29,20	26,20	28,00	24,60	28,20	25,60	25,00
57	21,70	13,00	38,70	33,50	25,80	33,00	24,50	27,30
58	22,50	30,40	22,90	27,80	22,90	28,20	23,90	23,00
59	16,90	24,20	26,60	33,50	21,10	30,90	25,00	27,00
60	29,90	30,70	25,30	27,60	23,80	30,80	26,40	26,60
Total	2172,60	1771,90	1677,60	1800,60	1608,30	1739,90	1577,00	1549,60
Média	36,21	29,53	27,96	30,01	26,81	29,00	26,28	25,83
Desvio	8,28	4,16	4,74	2,72	2,95	3,05	2,65	2,11

Tabela VIII - Perda de massa por ensaio - moagem a seco

Bola	Massa Inicial	Massa de Bolas Após os Ensaio (gramas)									
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
1	159,5974	159,4842	159,3906	159,2997	159,2127	159,1281	159,0421	158,9610	158,8788	158,7991	158,7147
2	161,3893	161,2766	161,1823	161,0890	160,9996	160,9133	160,8235	160,7362	160,6460	160,5588	160,4695
3	161,3958	161,3005	161,2237	161,1493	161,0756	161,0053	160,9299	160,8576	160,7822	160,7099	160,6334
4	162,1172	161,9974	161,8948	161,7967	161,6967	161,6016	161,5081	161,4151	161,3182	161,2251	161,1276
5	162,6069	162,5131	162,4265	162,3412	162,2563	162,1737	162,0939	162,0145	161,9300	161,8510	161,7693
6	163,2925	163,1783	163,0819	162,9898	162,8994	162,8148	162,7300	162,6468	162,5602	162,4733	162,3869
7	163,5384	163,4148	163,3153	163,2186	163,1235	163,0320	162,9399	162,8512	162,7584	162,6655	162,5729
8	163,8010	163,6896	163,5850	163,5062	163,4305	163,3579	163,2873	163,2158	163,1472	163,0760	162,9869
9	163,9867	163,8553	163,7510	163,6514	163,5348	163,4605	163,3646	163,2712	163,1764	163,0828	163,0074
10	164,1824	164,0608	163,9581	163,8575	163,7564	163,6620	163,5620	163,4650	163,3670	163,2731	163,1771
11	164,1828	164,0652	163,9707	163,8848	163,8014	163,7277	163,6536	163,5835	163,5128	163,4403	163,3763
12	164,4287	164,3084	164,2100	164,1166	164,0242	163,9342	163,8406	163,7491	163,6540	163,5630	163,4668
13	164,4363	164,3180	164,2172	164,1230	164,0250	163,9394	163,8494	163,7600	163,6718	163,5884	163,5024
14	165,8534	165,5539	165,4714	165,3898	165,3122	165,2378	165,1636	165,0938	165,0245	164,9483	164,8493
15	165,8714	165,7446	165,6367	165,5334	165,4310	165,3338	165,2369	165,1415	165,0432	164,9585	164,8691
16	165,9897	165,8383	165,7485	165,6568	165,5720	165,4917	165,4142	165,3371	165,2575	165,1848	165,0895
17	166,0558	165,9375	165,8350	165,7386	165,6365	165,5423	165,4475	165,3544	165,2610	165,1743	165,0779
18	166,0659	165,9427	165,8404	165,7407	165,6451	165,5521	165,4581	165,3633	165,2667	165,1869	165,1113
19	166,2125	166,0892	165,9831	165,8804	165,7774	165,6816	165,5849	165,4901	165,3944	165,3023	165,2076
20	166,5219	166,4325	166,3615	166,2904	166,2180	166,1502	166,0805	166,0138	165,9432	165,8779	165,8098
21	166,7764	166,6555	166,5575	166,4685	166,3854	166,3058	166,2295	166,1565	166,0805	166,0073	165,9349
22	166,9280	166,8030	166,7012	166,6044	166,5098	166,4197	166,3316	166,2393	166,1533	166,0677	165,9753
23	167,1454	167,0233	166,9259	166,8369	166,7529	166,6729	166,5972	166,5225	166,4459	166,3745	166,3006
24	167,3134	167,2112	167,1211	167,0312	166,9414	166,8523	166,7638	166,6768	166,5880	166,5027	166,4116
25	167,4291	167,3093	167,2208	167,1424	167,0705	167,0049	166,9391	166,8597	166,7803	166,7031	166,6186
26	167,4922	167,3742	167,2792	167,1903	167,1039	167,0216	166,9416	166,8613	166,7828	166,7086	166,6251
27	167,5102	167,4004	167,3095	167,2238	167,1353	167,0534	166,9688	166,8829	166,8209	166,7649	166,7085
28	167,7342	167,6125	167,5161	167,4259	167,3367	167,2531	167,1731	167,0945	167,0142	166,9365	166,8569
29	168,0189	167,8928	167,7849	167,6816	167,5784	167,4779	167,3777	167,2796	167,1779	167,0785	166,9772
30	168,0585	167,9444	167,8521	167,7637	167,6783	167,5983	167,5193	167,4423	167,3655	167,3013	167,2168
31	168,2280	168,1063	168,0014	167,9023	167,8025	167,7084	167,6142	167,5193	167,4180	167,3246	167,2239
32	168,2642	168,1363	168,0279	167,9254	167,8232	167,7207	167,6221	167,5232	167,4221	167,3251	167,2275
33	168,3167	168,1964	168,0925	167,9951	167,8982	167,8038	167,7116	167,6192	167,5218	167,4259	167,3361
34	168,5078	168,4006	168,3039	168,2072	168,1098	168,0185	167,9207	167,8271	167,7334	167,6415	167,5445
35	168,6642	168,5318	168,4257	168,3276	168,2317	168,1405	168,0483	167,9629	167,8716	167,7855	167,6962
36	168,9293	168,8279	168,7487	168,6714	168,5788	168,4874	168,3939	168,3047	168,2113	168,1183	168,0301
37	168,9900	168,8663	168,7670	168,6722	168,5967	168,5272	168,4578	168,3913	168,3225	168,2578	168,1926
38	169,2647	169,1630	169,0683	168,9715	168,8749	168,7845	168,6941	168,6059	168,5123	168,4260	168,3332
39	169,3948	169,2889	169,1590	169,0504	168,9542	168,8566	168,7553	168,6570	168,5594	168,4630	168,3628
40	169,5141	169,3912	169,2970	169,2105	169,1291	169,0530	168,9793	168,9012	168,8115	168,7266	168,6372
41	169,5949	169,4719	169,3688	169,2707	169,1718	169,0809	168,9887	168,9084	168,8359	168,7680	168,6989
42	169,8768	169,7796	169,7058	169,6339	169,5604	169,4779	169,3960	169,3139	169,2314	169,1510	169,0671
43	169,9228	169,8138	169,7294	169,6464	169,5662	169,5031	169,4396	169,3809	169,3193	169,2631	169,2039
44	170,7085	170,5750	170,4711	170,3709	170,2716	170,1790	170,0872	169,9981	169,9054	169,8175	169,7266
45	170,7449	170,6222	170,5259	170,4374	170,3528	170,2735	170,1943	170,1190	170,0465	169,9763	169,8982
46	170,7963	170,6913	170,5992	170,5072	170,4165	170,3299	170,2414	170,1553	170,0683	169,9841	169,9034
47	170,8789	170,7867	170,6876	170,5898	170,4880	170,3751	170,2797	170,1878	170,0920	169,9985	169,9036
48	171,4295	171,3277	171,2357	171,1425	171,0482	170,9563	170,8623	170,7730	170,6785	170,5845	170,4912
49	171,9088	171,8013	171,7059	171,6093	171,5154	171,4257	171,3320	171,2420	171,1480	171,0558	170,9602
50	172,5241	172,4225	172,3436	172,2685	172,1930	172,1206	172,0496	171,9804	171,9105	171,8433	171,7760
51	172,6674	172,5689	172,4840	172,3982	172,3133	172,2337	172,1485	172,0649	171,9813	171,8992	171,8170
52	173,1839	173,0803	172,9850	172,8897	172,7920	172,6966	172,6007	172,5069	172,4053	172,3088	172,2127
53	173,8742	173,7380	173,6302	173,5325	173,4403	173,3535	173,2675	173,1830	173,0981	173,0186	172,9378
54	174,0989	173,9569	173,8430	173,7382	173,6350	173,5365	173,4422	173,3525	173,2605	173,1760	173,0899
55	174,1770	174,0484	173,9408	173,8354	173,7328	173,6390	173,5375	173,4375	173,3358	173,2431	173,1463
56	174,3898	174,2793	174,1811	174,0841	173,9845	173,8921	173,7993	173,7069	173,6118	173,5208	173,4258
57	176,0126	175,9168	175,8258	175,7339	175,6415	175,5466	175,4586	175,3669	175,2706	175,1075	175,0503
58	176,5033	176,3875	176,2555	176,1558	176,0560	175,9607	175,8677	175,7752	175,6818	175,5953	175,5042
59	177,1755	177,0615	176,9725	176,8843	176,7992	176,7181	176,6376	176,5577	176,4754	176,3999	176,3204
60	179,0521	178,9518	178,8684	178,7807	178,6985	178,6194	178,5376	178,4616	178,3839	178,3100	178,2320
Total	10103,3073	10096,3356	10090,5787	10085,0496	10079,5730	10074,4157	10069,2136	10064,1401	10058,9350	10053,8880	10048,7779
Média	168,3885	168,2723	168,1763	168,0842	167,9929	167,9068	167,8202	167,7357	167,6489	167,5648	167,4766
Desvio	4,1453	4,1458	4,1452	4,1443	4,1437	4,1422	4,1415	4,1407	4,1367	4,1397	4,1395

Tabela IX - Massa de bolas por ensaio - moagem a úmido

Bola	Perda de Massa por Ensaio (miligramas)									
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
1	113,2	93,6	90,9	87,0	84,6	86,0	81,1	82,2	79,7	84,4
2	112,7	94,3	93,3	89,4	86,3	89,8	87,3	90,2	87,2	89,3
3	95,3	76,8	74,4	73,7	70,3	75,4	72,3	75,4	72,3	76,5
4	119,8	102,6	98,1	100,0	95,1	93,5	93,0	96,9	93,1	97,5
5	95,8	86,6	85,3	84,9	82,6	79,8	79,4	84,5	79,0	81,7
6	114,2	96,4	92,1	90,4	84,6	84,8	83,2	86,6	86,9	86,4
7	123,8	99,5	96,7	95,1	91,6	92,1	88,7	92,8	92,9	92,6
8	131,4	84,6	78,8	75,7	72,6	70,6	71,5	68,6	71,2	89,1
9	131,4	104,3	99,6	116,6	74,3	95,9	93,4	94,8	93,6	75,4
10	121,6	102,7	100,6	101,1	94,4	100,0	97,0	98,0	93,9	96,0
11	117,6	94,5	85,9	83,4	73,7	74,1	70,1	70,7	66,5	70,0
12	118,3	98,4	93,4	92,4	90,0	93,6	91,5	95,1	91,0	96,2
13	120,3	98,8	94,2	98,0	85,6	90,0	89,4	88,2	83,4	86,0
14	99,5	82,5	81,6	77,6	74,4	74,2	69,8	69,3	76,2	100,0
15	126,8	107,9	103,3	102,4	97,2	96,9	95,4	98,3	84,7	69,4
16	131,4	91,8	89,7	84,8	80,3	77,5	77,1	79,6	92,7	95,3
17	118,3	102,5	98,4	100,1	94,2	94,8	93,1	93,4	86,7	96,4
18	123,2	102,3	99,7	95,6	93,0	96,0	92,8	96,6	79,8	75,6
19	123,3	106,1	102,7	103,0	96,8	96,7	94,8	95,7	92,1	94,7
20	89,4	71,0	71,1	72,4	67,8	69,7	66,7	70,6	65,3	68,1
21	120,9	98,0	89,0	83,1	79,6	76,3	73,0	76,0	73,2	72,4
22	123,0	101,8	96,8	94,6	90,1	88,1	92,3	86,0	85,8	92,4
23	122,1	97,4	89,0	84,0	80,0	75,7	74,7	76,6	71,4	73,9
24	102,2	90,1	89,9	89,8	89,1	88,5	87,0	88,8	85,3	91,1
25	119,8	88,5	78,4	71,9	65,6	65,8	79,4	79,4	77,2	84,5
26	118,0	95,0	88,9	86,4	82,3	80,0	60,3	88,5	84,2	83,5
27	109,8	90,9	85,7	88,5	81,9	84,6	85,9	62,0	56,0	58,4
28	121,7	96,4	90,2	89,2	83,6	80,0	78,6	80,3	77,7	79,6
29	126,1	107,9	103,3	105,2	98,5	100,2	98,1	101,7	99,4	101,3
30	115,1	92,3	88,4	85,4	80,0	79,0	77,0	76,8	64,2	84,5
31	121,7	104,9	99,1	99,8	94,1	94,2	94,9	101,3	93,4	100,7
32	127,9	108,4	102,5	102,2	102,5	98,6	98,9	101,1	97,0	97,8
33	120,3	103,9	97,4	98,9	92,4	92,2	92,4	97,4	95,9	89,8
34	107,2	96,7	96,7	97,4	93,3	95,8	93,6	93,7	91,9	97,0
35	132,4	106,1	98,1	95,9	91,2	92,2	85,4	91,3	86,1	89,3
36	101,4	79,2	77,3	92,6	91,4	93,5	89,2	93,4	93,0	88,2
37	123,7	99,3	94,8	75,5	69,5	69,4	66,5	68,8	64,7	65,2
38	101,7	94,7	96,8	96,6	90,4	90,4	88,2	93,6	86,3	92,8
39	125,9	109,9	102,6	102,2	97,6	101,3	98,3	97,6	96,4	100,1
40	122,9	94,2	86,5	81,4	76,1	73,7	78,1	89,7	84,9	89,4
41	123,0	103,1	98,1	98,9	90,9	92,2	80,3	72,5	67,9	69,1
42	99,2	73,8	71,9	73,5	82,5	81,9	82,1	82,5	80,4	83,9
43	109,0	84,4	83,0	80,2	63,1	63,5	68,7	61,6	56,2	59,2
44	133,5	103,9	100,2	99,3	92,5	91,8	89,1	92,7	87,9	90,9
45	122,7	96,3	88,5	84,6	79,3	79,2	75,3	72,5	70,2	78,1
46	105,0	92,1	92,0	90,7	86,6	88,5	86,1	87,0	84,2	80,7
47	112,2	99,1	97,8	101,8	92,9	95,4	91,9	95,8	93,5	94,9
48	101,8	92,0	93,2	94,3	91,9	94,0	89,3	96,5	92,0	93,3
49	107,5	95,4	96,6	93,9	89,7	93,7	90,0	94,0	92,2	95,6
50	101,6	78,9	75,1	75,5	72,4	71,0	69,2	69,9	67,2	67,3
51	98,5	84,9	85,8	84,9	79,6	87,2	81,6	83,6	82,1	82,2
52	103,6	95,3	95,3	97,7	95,4	95,9	93,8	101,6	96,5	97,1
53	136,2	107,8	97,7	92,2	86,8	86,0	84,5	84,9	78,8	81,8
54	142,0	113,9	104,8	103,2	98,5	94,3	89,7	92,0	84,5	86,1
55	128,6	107,6	105,4	102,6	94,8	100,5	100,0	101,7	92,7	96,8
56	110,5	98,2	97,0	99,6	92,4	92,8	92,4	95,1	91,0	95,0
57	95,8	91,0	91,9	92,4	94,9	88,0	91,7	96,3	163,1	57,2
58	135,8	112,0	99,7	99,8	95,3	93,0	92,5	93,4	86,5	91,1
59	114,0	89,0	88,2	85,1	81,1	80,5	79,9	82,3	75,5	79,5
60	100,3	85,4	85,7	82,2	79,1	81,8	76,0	77,7	73,9	78,0
Total	6971,7	5756,9	5529,1	5476,6	5157,3	5202,1	5073,5	5205,1	5047,0	5110,1
Média	116,20	95,95	92,15	91,28	85,95	86,70	84,56	86,75	84,12	85,17
Desvio	12,04	9,46	8,39	9,72	9,22	9,62	9,95	10,74	14,71	11,30

Tabela X - Perda de massa por ensaio - moagem a úmido

Adicionalmente, foram realizados ensaios de desgaste somente com bolas, isto é, sem o minério de ferro e sem água. Estes ensaios foram realizados para que se pudesse observar o fenômeno do desgaste por adesão.

Foi utilizada uma carga de 60 bolas novas e foram realizados 5 (cinco) corridas de uma hora cada. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 27 e nas tabelas XI e XII.

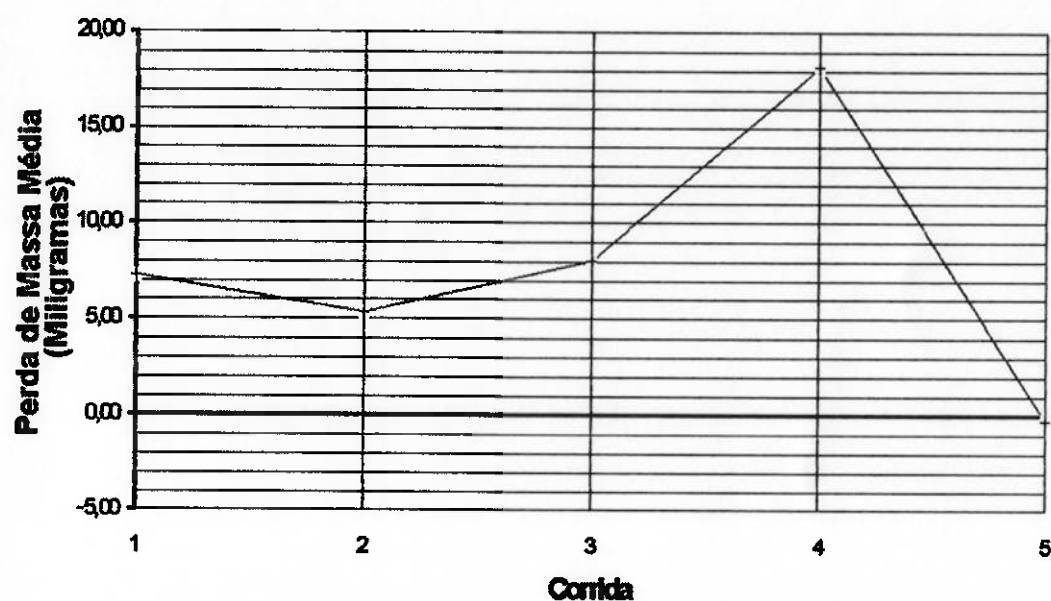


Figura 27 - Taxa de desgaste nos ensaios só com bolas

Bola	Massa Inicial	Massa de Bolas Após os Ensaios (gramas)				
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
1	158,7480	158,7509	158,7504	158,7470	158,7255	158,7304
2	159,6316	159,6374	159,6386	159,6353	159,6189	159,6254
3	159,8920	159,8983	159,7002	159,8972	159,6795	159,6870
4	161,5651	161,5722	161,5709	161,5673	161,5504	161,5564
5	162,0471	162,0535	162,0555	162,0525	162,0320	162,0405
6	162,0564	162,0600	162,0564	162,0535	162,0374	162,0409
7	162,3369	162,3364	162,3363	162,3328	162,3195	162,3223
8	162,7995	162,7907	162,7853	162,7781	162,7605	162,7609
9	162,8807	162,8883	162,8891	162,8871	162,8674	162,8756
10	163,4878	163,4932	163,4938	163,4900	163,4742	163,4796
11	163,5745	163,5617	163,5496	163,5368	163,5164	163,5103
12	163,6942	163,6889	163,6864	163,6803	163,6708	163,6707
13	164,1488	164,1441	164,1380	164,1278	164,1058	164,1065
14	164,2011	164,2092	164,2115	164,2082	164,1882	164,1964
15	164,3600	164,3649	164,3642	164,3615	164,3426	164,3493
16	164,5797	164,5705	164,5648	164,5567	164,5381	164,5358
17	164,7100	164,7059	164,7049	164,7013	164,6863	164,6878
18	164,9158	164,9005	164,8920	164,8832	164,8714	164,8682
19	164,9403	164,9458	164,9491	164,9476	164,9269	164,9325
20	165,1606	165,1557	165,1523	165,1475	165,1374	165,1358
21	165,2953	165,2904	165,2876	165,2828	165,2758	165,2744
22	165,3050	165,3168	165,3188	165,3159	165,2941	165,3029
23	165,4258	165,4142	165,4088	165,4025	165,3900	165,3885
24	165,7965	165,7950	165,7941	165,7898	165,7744	165,7787
25	165,9568	165,9494	165,9447	165,9384	165,9209	165,9234
26	166,2183	166,2103	166,2082	166,2020	166,1889	166,1904
27	166,3806	166,3881	166,3909	166,3882	166,3686	166,3768
28	166,4618	166,4451	166,4379	166,4297	166,4107	166,4106
29	166,8343	166,8313	166,8276	166,8209	166,8100	166,8092
30	167,0251	167,0094	166,9986	166,9858	166,9658	166,9611
31	167,2084	167,2025	167,1996	167,1930	167,1805	167,1820
32	167,2689	167,2616	167,2584	167,2529	167,2425	167,2427
33	167,4415	167,4533	167,4553	167,4512	167,4288	167,4348
34	167,8899	167,8903	167,8905	167,8857	167,8691	167,8737
35	167,9520	167,9273	167,9187	167,9085	167,8937	167,8916
36	167,9560	167,9413	167,9326	167,9228	167,9039	167,9022
37	168,0176	168,0228	168,0234	168,0187	167,9990	168,0051
38	168,3110	168,2989	168,2911	168,2829	168,2690	168,2655
39	168,4550	168,4402	168,4328	168,4188	168,4014	168,3979
40	168,5390	168,5289	168,5215	168,5128	168,4988	168,4960
41	168,8415	168,8308	168,8201	168,8094	168,7869	168,7804
42	169,4024	169,3979	169,3958	169,3903	169,3804	169,3807
43	169,4790	169,4661	169,4523	169,4374	169,4169	169,4083
44	169,6490	169,6119	169,5958	169,5862	169,5660	169,5653
45	170,8505	170,8456	170,8384	170,8306	170,8089	170,8104
46	170,9446	170,9297	170,9211	170,9059	170,8823	170,8777
47	171,7208	171,7068	171,6994	171,6892	171,6688	171,6690
48	172,2675	172,2512	172,2437	172,2311	172,2084	172,2046
49	172,3141	172,3016	172,2957	172,2878	172,2661	172,2674
50	172,5873	172,5744	172,5603	172,5432	172,5173	172,5092
51	172,8767	172,8664	172,8587	172,8421	172,8235	172,8210
52	173,5883	173,5690	173,5594	173,5525	173,5314	173,5320
53	173,7821	173,7786	173,7736	173,7656	173,7459	173,7464
54	174,2394	174,2228	174,2022	174,1773	174,1396	174,1234
55	174,3246	174,2964	174,2866	174,2747	174,2538	174,2521
56	175,9319	175,8924	175,8772	175,8640	175,8439	175,8365
57	176,3837	176,3603	176,3384	176,3135	176,2841	176,2746
58	176,3957	176,3916	176,3882	176,3785	176,3665	176,3586
59	178,0973	178,0824	178,0715	178,0561	178,0422	178,0342
60	182,3784	182,3640	182,3580	182,3509	182,3320	182,3339
Total	10065,3215	10064,8851	10064,5648	10064,0823	10062,9898	10063,0057
Média	167,7554	167,7481	167,7427	167,7347	167,7165	167,7168
Desvio	4,8487	4,8431	4,8396	4,8364	4,8346	4,8318

Tabela XI - Massa de bolas obtidas após os ensaios - ensaios somente com bolas

Bola	Perda de Massa por Ensaio (miligramas)				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
1	-2,90	0,50	3,40	21,50	-4,90
2	-5,80	-1,20	3,30	16,40	-6,50
3	-6,30	-1,90	3,00	17,70	-7,50
4	-7,10	1,30	3,60	16,90	-6,00
5	-6,40	-2,00	3,00	20,50	-8,50
6	-3,60	3,60	2,90	16,10	-3,50
7	0,50	0,10	3,50	13,30	-2,80
8	8,80	5,40	7,20	17,60	-0,40
9	-7,60	-0,80	2,00	19,70	-8,20
10	-5,40	-0,60	3,80	15,80	-5,40
11	12,80	12,10	12,80	20,40	6,10
12	5,30	2,50	6,10	9,70	-0,10
13	4,70	6,10	10,20	22,00	-0,70
14	-8,10	-2,30	3,30	20,00	-8,20
15	-4,90	0,70	2,70	18,90	-6,70
16	9,20	5,70	8,10	18,60	2,30
17	4,10	1,00	3,60	15,00	-1,50
18	15,30	8,50	8,80	11,80	3,20
19	-5,50	-3,30	1,50	20,70	-5,60
20	4,90	3,40	4,80	10,10	1,60
21	4,90	2,80	4,80	7,00	1,40
22	-11,80	-2,00	2,90	21,80	-8,80
23	11,60	5,40	6,30	12,50	1,50
24	1,50	0,90	4,30	15,40	-4,30
25	7,40	4,70	6,30	17,50	-2,50
26	8,00	2,10	6,20	13,10	-1,50
27	-7,50	-2,80	2,70	19,60	-8,20
28	16,70	7,20	8,20	19,00	-0,10
29	3,00	3,70	6,70	10,90	0,80
30	15,70	10,80	12,80	20,00	4,70
31	3,90	2,90	6,60	12,50	-1,50
32	7,30	3,20	5,50	10,40	-0,20
33	-11,80	-2,00	4,10	22,40	-6,00
34	-0,40	-0,20	4,80	16,60	-4,60
35	24,70	8,60	9,20	15,80	2,10
36	14,70	8,70	9,80	18,90	1,70
37	-5,20	-0,60	4,70	19,70	-6,10
38	12,10	7,80	8,20	13,90	3,50
39	14,80	7,40	14,00	17,40	3,50
40	10,10	7,40	8,70	14,00	2,80
41	10,70	10,70	10,70	22,50	6,50
42	4,50	2,10	5,50	9,90	-0,30
43	12,90	13,80	14,90	20,50	8,60
44	37,10	16,10	9,60	20,20	0,70
45	4,90	7,20	7,80	21,70	-1,50
46	14,90	8,60	15,20	23,60	4,60
47	13,80	7,40	10,20	20,40	-0,20
48	16,30	7,50	12,60	22,70	3,80
49	12,50	5,90	7,90	21,70	-1,30
50	12,90	14,10	17,10	25,90	8,10
51	10,30	7,70	16,60	18,60	2,50
52	19,30	9,60	6,90	21,10	-0,60
53	3,50	5,00	8,00	19,70	-0,50
54	16,60	20,60	24,90	37,70	16,20
55	28,20	9,80	11,90	20,90	1,70
56	39,50	15,20	13,20	20,10	7,40
57	23,40	23,90	22,90	29,40	9,50
58	4,10	3,40	9,70	22,00	-2,10
59	14,90	10,90	15,40	13,90	8,00
60	14,40	6,00	7,10	18,90	-1,90
Total	436,40	320,30	482,50	1092,50	-15,90
Média	7,27	5,34	8,04	18,21	-0,27
Desvio	11,07	5,78	5,00	5,03	5,19

Tabela XII- Perda de massa por ensaio - ensaios somente com bolas

VII.3. Testes com Reagente

O objetivo destes ensaios é o de utilizar um reagente que teria por finalidade atuar nos mecanismos provocadores do desgaste, minimizando-o.

Para a realização destes ensaios foram utilizados:

- Minério de ferro abaixo de 8 mesh em alíquotas de 1,5 kg;
- 97 bolas de 1 ½" (aproximadamente 16 kg);
- Água destilada;
- Moinho de laboratório de 20 cm x 25 cm;
- Balança analítica;
- Reagente.

O minério de ferro (aproximadamente 30 kg) foi inicialmente peneirado em peneira de 8 mesh. A fração retida foi moída em moinho de rolos e o produto da moagem foi repassada na peneira de 8 mesh. Esse procedimento foi realizado até se obteve uma amostra completamente abaixo dessa malha.

Em seguida, o minério de ferro foi homogeneizado em pilha alongada sendo, então, subdividida em alíquotas de 1,5 kg cada.

Primeiramente, rodou-se as 97 bolas com 1,5 kg de areia durante 1 hora para retirar qualquer rebarba ou sinais de corrosão existentes. Após passar as bolas na areia, lavou-se as mesmas com água e pesou-se uma a uma em balança analítica, obtendo-se assim a massa inicial de todas as bolas.

As moagens são realizadas com 1,5 kg de minério de ferro com 1 litro de água destilada, o que resulta uma polpa com 60% de sólidos. O moinho trabalhou em todos os ensaios com cerca de 40% de carga. Foram realizados 4 ensaios, sendo o tempo de moagem de 1, 2 e 3 horas em cada ensaio. Sempre a cada novo ensaio utilizou-se uma nova carga de minério de ferro.

O moinho em questão trabalhou durante todos os ensaios com 40% de carga. Após a moagem, as bolas foram limpas e novamente pesadas obtendo-se, assim, a perda de massa ocorrida no ensaio.

Com isso, obtém-se uma perda média de massa das bolas em cada ensaio. Com isso plotam-se esses valores em função do tempo de moagem.

Depois, repetiu-se todos os passos anteriores com o uso de um reagente que teria por finalidade minimizar o desgaste das bolas. Compara-se, assim, a curva de perda de massa média em função do tempo com a curva obtida nos ensaios de desgaste sem reagente, avaliando-se, assim, o benefício ou não do reagente no desgaste das bolas.

A solução de reagente foi preparada da seguinte forma: pesou-se 10 gramas do reagente e diluiu-se o mesmo a 100 ml de água destilada, obtendo-se uma solução de 10 g de reagente/ml de solução.

A dosagem recomendada pelo fabricante do reagente é de 100 g de reagente/t de minério, o que resulta em 0,15 g de reagente, pois é utilizado 1,5 kg de minério. Logo, utiliza-se em cada moagem cerca de 1,5 ml da solução preparada anteriormente.

Os resultados obtidos podem ser observados logo abaixo, na figura 28 e nas tabelas XIII, XIV, XV e XVI.

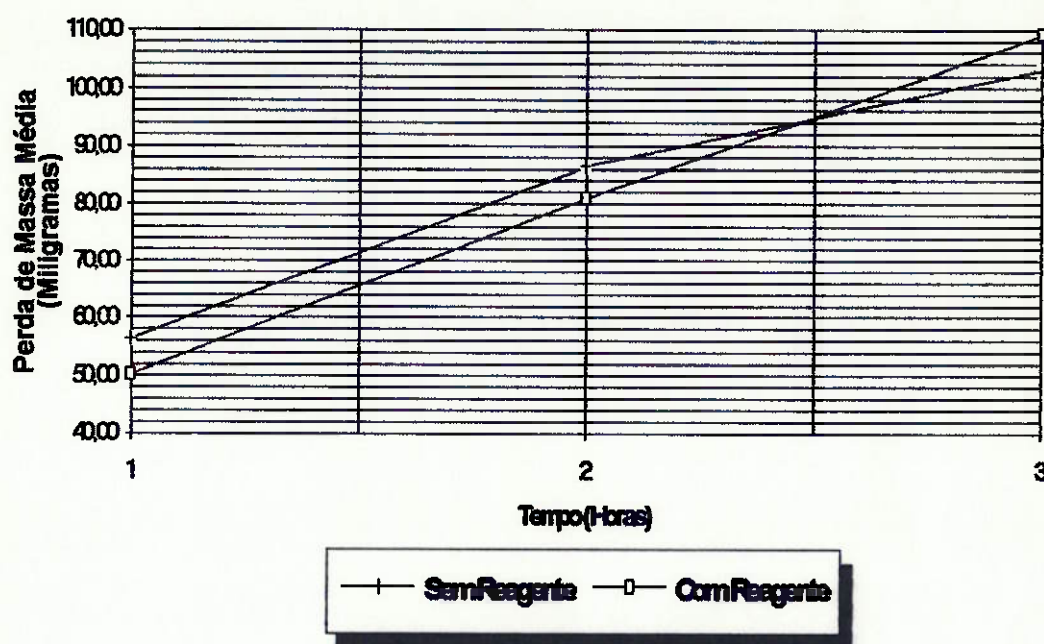


Figura 28 - Teste do reagente no ensaio de desgaste

Massa de Bolas Após os Ensaios (gramas)				
Bola	Massa Inicial	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
1	158,9886	158,9066	158,8144	158,7026
2	158,6937	158,6558	158,6001	158,5361
3	159,2410	159,1774	159,0795	158,9613
4	159,2589	159,2049	159,1209	159,0183
5	159,3388	159,2792	159,1882	159,0782
6	159,9910	159,9382	159,8548	159,7501
7	160,0238	159,9801	159,8644	159,7518
8	160,1505	160,1057	160,0356	159,9328
9	160,1579	160,1129	160,0441	159,9514
10	160,2135	160,1484	160,0490	159,9611
11	160,2780	160,2145	160,1201	160,0080
12	160,5254	160,4887	160,3829	160,2886
13	160,6276	160,5717	160,4832	160,3783
14	161,0293	160,9848	160,9182	160,8389
15	161,5370	161,4896	161,4142	161,3249
16	161,8623	161,8134	161,7324	161,6359
17	161,9296	161,8891	161,8262	161,7589
18	162,4273	162,3703	162,2806	162,1689
19	162,6008	162,5435	162,4486	162,3360
20	162,6742	162,6125	162,5201	162,4100
21	162,7481	162,6881	162,6199	162,5300
22	162,8633	162,8081	162,7218	162,6166
23	162,9788	162,9300	162,8510	162,7581
24	163,1208	163,0653	162,9753	162,8680
25	163,3108	163,2450	163,1497	163,0350
26	163,8139	163,7520	163,6544	163,5406
27	164,0050	163,9530	163,8791	163,7983
28	164,0566	163,9973	163,9078	163,7987
29	164,0970	164,0291	163,9294	163,8029
30	164,2727	164,2204	164,1278	164,0128
31	164,2777	164,2284	164,1568	164,0778
32	164,5053	164,4460	164,3550	164,2432
33	164,5501	164,4835	164,3829	164,2627
34	164,6150	164,5727	164,5093	164,4304
35	164,9429	164,8823	164,7884	164,6692
36	164,9917	164,9370	164,8496	164,7446
37	165,0358	164,9776	164,8895	164,7904
38	165,0561	164,9988	164,9123	164,8150
39	165,0985	165,0399	164,9479	164,8359
40	165,4088	165,3451	165,2519	165,1333
41	165,4407	165,3997	165,3361	165,2614
42	165,6587	165,6007	165,5136	165,4088
43	165,8670	165,8134	165,7304	165,6292
44	166,1263	166,0641	165,9649	165,8434
45	166,3075	166,2557	166,1813	166,0972
46	166,3467	166,3041	166,2400	166,1623
47	166,3679	166,3268	166,2626	166,1864
48	166,4680	166,4189	166,3130	166,1919
49	166,6582	166,6019	166,5129	166,4017
50	166,8996	166,8362	166,7422	166,6180

Massa de Bolas Após os Ensaios (gramas)				
Bola	Massa Inicial	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
51	166,7112	166,6436	166,5423	166,4337
52	166,7183	166,6819	166,6221	166,5528
53	167,0328	166,9734	166,8875	166,7937
54	167,1818	167,1267	167,0405	166,9367
55	167,4698	167,4171	167,3297	167,2240
56	167,6023	167,5366	167,4384	167,3222
57	167,6676	167,6120	167,5310	167,4347
58	167,7329	167,6715	167,5845	167,4822
59	167,7805	167,7253	167,6407	167,5371
60	168,2162	168,1648	168,0624	167,9362
61	168,2325	168,1808	168,0909	167,9742
62	168,2454	168,1857	168,1243	168,0584
63	168,6671	168,6081	168,5164	168,4050
64	168,7089	168,6606	168,5788	168,4706
65	168,7302	168,6697	168,5853	168,4722
66	168,7399	168,6773	168,5905	168,5075
67	168,8263	168,7752	168,6972	168,6092
68	168,8753	168,8188	168,7365	168,6384
69	168,9233	168,8690	168,7849	168,6839
70	168,9319	168,8728	168,7879	168,6901
71	169,1240	169,0712	168,9701	168,8472
72	169,1391	169,0718	168,9909	168,8971
73	169,2188	169,1595	169,0686	168,9647
74	169,4586	169,3975	169,3035	169,2009
75	169,5126	169,4469	169,3439	169,2254
76	169,5164	169,4575	169,3662	169,2593
77	169,5599	169,4936	169,3914	169,2708
78	169,7135	169,6628	169,5812	169,4748
79	169,7294	169,6720	169,5818	169,4846
80	169,9230	169,8672	169,7776	169,6689
81	170,2752	170,2150	170,1240	170,0242
82	170,4433	170,3909	170,3093	170,2107
83	170,7209	170,6621	170,5726	170,4612
84	170,9280	170,8690	170,7769	170,6681
85	171,1401	171,0857	171,0009	170,8970
86	171,4235	171,3551	171,2518	171,1242
87	171,4510	171,3947	171,3028	171,1944
88	171,6615	171,6033	171,5091	171,3929
89	171,8862	171,8326	171,7529	171,6584
90	172,4064	172,3646	172,2895	172,2215
91	172,5300	172,4679	172,3711	172,2551
92	173,4272	173,3690	173,2821	173,1755
93	174,3259	174,2669	174,1763	174,0689
94	176,4592	176,3934	176,2888	176,1637
95	178,0307	177,9783	177,9000	177,8071
96	179,3551	179,2939	179,1935	179,0764
97	179,5029	179,4427	179,3473	179,2367
Total	16157,0963	16151,6324	16143,2412	16133,2444
Média	166,5680	166,5117	166,4252	166,3221
Desvio	4,5131	4,5119	4,5097	4,5072

Tabela XIII - Massa de bolas após os ensaios - moagem a úmido sem reagente

Perda de Massa por Ensaio (miligramas)			
Bola	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
1	63,00	92,20	111,80
2	37,90	55,70	64,00
3	63,60	97,90	118,20
4	54,00	84,00	102,60
5	59,60	91,00	110,00
6	52,80	83,40	104,70
7	63,70	95,70	112,60
8	44,80	70,10	102,80
9	45,00	68,80	92,70
10	65,10	99,40	87,90
11	63,50	94,40	112,10
12	56,70	85,80	94,30
13	55,90	88,50	104,90
14	44,50	66,60	79,30
15	47,40	75,40	89,30
16	48,90	81,00	96,50
17	40,50	62,90	67,30
18	57,00	89,70	111,70
19	57,30	94,90	112,60
20	61,70	92,40	110,10
21	50,00	78,20	89,90
22	55,20	86,30	105,20
23	48,80	79,00	92,90
24	55,50	90,00	109,30
25	65,80	95,30	114,70
26	61,90	97,60	113,80
27	52,00	73,90	80,80
28	59,30	89,50	109,10
29	67,90	99,70	126,50
30	52,30	92,60	115,00
31	51,30	69,60	79,00
32	59,30	91,00	111,80
33	66,60	100,60	120,20
34	42,30	63,40	78,90
35	60,60	93,90	119,20
36	54,70	87,40	105,00
37	58,20	88,10	99,10
38	57,30	86,50	97,30
39	58,60	92,00	112,00
40	61,70	93,20	118,60
41	41,00	63,60	74,70
42	58,00	87,10	106,80
43	53,60	83,00	101,20
44	62,20	99,20	121,50
45	51,80	74,40	84,10
46	42,60	64,10	77,70
47	41,10	64,20	76,20
48	70,10	105,90	121,10
49	57,30	89,00	111,20
50	63,40	94,00	124,20

Perda de Massa por Ensaio (miligramas)			
Bola	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
51	67,60	101,30	108,60
52	36,40	59,80	69,30
53	59,40	85,90	93,80
54	55,10	86,20	103,80
55	52,70	87,40	105,70
56	65,70	98,20	116,20
57	55,60	81,00	96,30
58	61,40	87,00	102,30
59	55,20	84,60	103,60
60	51,40	102,40	126,20
61	51,70	89,90	116,70
62	59,70	61,40	65,90
63	59,00	91,70	111,40
64	48,30	81,80	108,20
65	60,50	84,40	113,10
66	62,60	86,80	83,00
67	51,10	78,00	88,00
68	56,50	82,30	98,10
69	54,30	84,10	101,00
70	59,10	84,90	97,80
71	52,80	101,10	122,90
72	67,30	80,90	93,80
73	59,30	89,90	104,90
74	61,10	94,00	102,60
75	65,70	103,00	118,50
76	58,90	91,30	106,90
77	66,30	102,20	120,60
78	50,70	81,60	106,40
79	57,40	90,20	97,20
80	55,80	89,60	108,70
81	60,20	91,00	99,80
82	52,40	81,60	98,60
83	58,80	89,50	111,40
84	59,00	92,10	108,80
85	54,40	84,80	103,90
86	68,40	103,30	127,60
87	56,30	91,90	108,40
88	58,20	94,20	116,20
89	53,60	79,70	94,50
90	41,80	65,10	78,00
91	62,10	96,80	116,00
92	58,20	86,90	106,60
93	59,00	90,60	107,40
94	65,80	104,60	125,10
95	52,40	78,30	92,90
96	61,20	100,40	117,10
97	60,20	95,40	110,60
Total	5463,90	8391,20	9996,80
Média	56,33	86,51	103,06
Desvio	7,25	11,24	14,61

Tabela XIV - Perda de massa por ensaio - moagem a úmido sem reagente

Massa de Bolas Após os Ensaios (gramas)				
Bola	Massa Inicial	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
1	156,5711	156,5185	156,4320	156,3105
2	158,4639	158,4304	158,3818	158,3120
3	158,8191	158,7656	158,6724	158,5410
4	158,8949	158,8443	158,7602	158,6486
5	158,9422	158,8879	158,7952	158,6750
6	159,6132	159,5595	159,4691	159,3490
7	159,6308	159,5800	159,4971	159,3868
8	159,7923	159,7368	159,6452	159,5174
9	159,8580	159,8163	159,7302	159,6103
10	159,8840	159,8194	159,7515	159,6637
11	159,8722	159,8211	159,7537	159,6639
12	160,1795	160,1350	160,0652	159,9715
13	160,2482	160,1957	160,1081	159,9906
14	160,7483	160,7106	160,6489	160,5664
15	161,2172	161,1720	161,0984	160,9984
16	161,5181	161,4702	161,3910	161,2855
17	161,6800	161,6457	161,5940	161,5186
18	162,0340	161,9817	161,8935	161,7737
19	162,1964	162,1402	162,0470	161,9232
20	162,2798	162,2282	162,1447	162,0299
21	162,4218	162,3760	162,2998	162,1987
22	162,4914	162,4395	162,3569	162,2445
23	162,6437	162,5969	162,5200	162,4137
24	162,7355	162,6808	162,5942	162,4746
25	162,8980	162,8452	162,7570	162,6405
26	163,4047	163,3510	163,2610	163,1428
27	163,6533	163,5979	163,5006	163,3689
28	163,6681	163,6119	163,5231	163,3992
29	163,7117	163,6707	163,6115	163,5363
30	163,8732	163,8177	163,7250	163,6011
31	163,9863	163,9463	163,8860	163,8076
32	164,1077	164,0549	163,9637	163,8409
33	164,1163	164,0614	163,9682	163,8409
34	164,3376	164,2956	164,2290	164,1441
35	164,5283	164,4687	164,3721	164,2460
36	164,6157	164,5634	164,4753	164,3575
37	164,6757	164,6302	164,5562	164,4402
38	164,7010	164,6481	164,5602	164,4580
39	164,7043	164,6570	164,5866	164,4926
40	164,9913	164,9348	164,8408	164,7100
41	165,1729	165,1338	165,0733	164,9882
42	165,2782	165,2285	165,1379	165,0224
43	165,5076	165,4562	165,3747	165,2659
44	165,6982	165,6413	165,5475	165,4189
45	166,0089	165,9728	165,8721	165,7385
46	166,0330	165,9730	165,9169	165,8423
47	166,0719	166,0326	165,9707	165,8871
48	166,1115	166,0715	166,0157	165,9450
49	166,2655	166,2116	166,1151	165,9966
50	166,2892	166,2121	166,1215	165,9985

Massa de Bolas Após os Ensaios (gramas)				
Bola	Massa Inicial	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
51	166,3070	166,2570	166,1740	166,0597
52	166,4709	166,4319	166,3745	166,2948
53	166,6938	166,6491	166,5854	166,4976
54	166,8145	166,7640	166,6843	166,5730
55	167,0944	167,0425	166,9586	166,8427
56	167,1855	167,1317	167,0415	166,9216
57	167,3223	167,2743	167,2030	167,0994
58	167,3659	167,3169	167,2385	167,1374
59	167,4152	167,3632	167,2817	167,1679
60	167,7881	167,7303	167,6340	167,5009
61	167,8315	167,7762	167,6831	167,5581
62	167,9801	167,9449	167,8888	167,8110
63	168,2746	168,2204	168,1344	168,0198
64	168,3336	168,2794	168,1875	168,0649
65	168,3434	168,2912	168,2094	168,0941
66	168,4092	168,3668	168,3027	168,2128
67	168,5048	168,4578	168,3869	168,2960
68	168,5233	168,4758	168,4004	168,2993
69	168,5699	168,5243	168,4472	168,3367
70	168,5732	168,5256	168,4475	168,3498
71	168,6997	168,6413	168,5471	168,4150
72	168,7875	168,7412	168,6691	168,5714
73	168,8485	168,7953	168,7193	168,6169
74	169,0847	169,0285	168,9336	168,8117
75	169,0871	169,0379	168,9671	168,8519
76	169,1250	169,0701	168,9764	168,8606
77	169,1360	169,0858	168,9050	168,8977
78	169,3470	169,2933	169,2075	169,0954
79	169,3679	169,3170	169,2402	169,1410
80	169,5388	169,4854	169,3974	169,2802
81	169,9082	169,8572	169,7801	169,6818
82	170,0949	170,0425	169,9609	169,8601
83	170,3287	170,2736	170,1869	170,0696
84	170,5409	170,4878	170,4061	170,2938
85	170,7719	170,7212	170,6416	170,5300
86	170,9710	170,9119	170,8135	170,6787
87	171,0844	171,0109	170,9266	170,8160
88	171,2540	171,1995	171,1064	170,9841
89	171,5502	171,5039	171,4326	171,3349
90	172,1162	172,0589	171,9685	171,8431
91	172,1283	172,0873	172,0250	171,9419
92	173,0465	172,9935	172,9060	172,7893
93	173,9404	173,8860	173,8014	173,6925
94	176,0111	175,9496	175,8532	175,7221
95	177,7008	177,6546	177,5883	177,4991
96	178,9359	178,8783	178,7867	178,6624
97	179,1008	179,0460	178,9573	178,8350
Total	16121,3901	16116,5213	16108,6790	16098,0992
Média	166,1999	166,1497	166,0689	165,9598
Desvio	4,5045	4,5031	4,5020	4,5008

Tabela XV - Massa de bolas após os ensaios - moagem a úmido com reagente

Perda de Massa por Ensaio (miligramas)			
Bola	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
1	52,60	86,50	121,50
2	33,50	48,60	69,80
3	53,50	93,20	131,40
4	50,60	84,10	111,60
5	54,30	92,70	120,20
6	53,70	90,40	120,10
7	50,60	82,90	110,30
8	55,50	91,60	127,80
9	41,70	86,10	119,90
10	44,60	67,90	87,80
11	51,10	67,40	89,80
12	44,50	69,80	93,70
13	52,50	87,60	117,50
14	37,70	61,70	82,50
15	45,20	73,60	102,00
16	47,90	79,20	105,50
17	34,30	51,70	75,40
18	52,30	88,20	119,80
19	56,20	93,20	123,80
20	50,60	84,50	114,80
21	45,80	76,20	101,10
22	51,90	82,60	112,40
23	46,80	76,90	106,30
24	54,70	86,60	119,60
25	52,80	88,20	116,50
26	53,70	90,00	118,20
27	55,40	97,30	131,70
28	54,20	88,80	123,90
29	41,00	59,20	75,20
30	55,50	92,70	123,90
31	40,00	60,30	78,40
32	52,80	91,20	122,80
33	54,90	93,20	127,30
34	42,00	66,60	84,90
35	57,60	96,60	126,10
36	52,30	88,10	117,80
37	45,50	74,00	116,00
38	52,90	87,90	102,20
39	47,30	70,40	94,00
40	56,50	94,00	130,80
41	39,10	60,50	85,10
42	51,70	88,60	115,50
43	51,40	81,50	108,80
44	56,90	93,80	128,60
45	37,10	100,70	133,60
46	60,00	56,10	74,60
47	39,30	61,90	83,60
48	40,00	55,80	70,70
49	53,90	96,50	128,50
50	57,10	90,60	123,00

Perda de Massa por Ensaio (miligramas)			
Bola	Ensaio 1 (1 hora)	Ensaio 2 (2 horas)	Ensaio 3 (3 horas)
51	50,00	83,00	114,30
52	39,00	57,40	79,70
53	44,70	63,70	87,80
54	50,50	79,70	111,30
55	51,90	83,90	115,90
56	53,80	90,20	119,90
57	48,00	71,30	103,60
58	49,00	78,40	101,10
59	52,00	81,50	113,80
60	57,80	96,30	133,10
61	55,30	93,10	125,00
62	35,20	56,10	77,80
63	54,20	86,00	114,60
64	54,20	91,90	122,60
65	52,20	81,80	115,30
66	42,40	64,10	89,90
67	47,00	70,90	90,90
68	47,50	75,40	101,10
69	45,60	77,10	110,50
70	47,60	78,10	97,70
71	58,40	94,20	132,10
72	46,30	72,10	97,70
73	53,20	76,00	102,40
74	56,20	94,90	121,90
75	49,20	70,80	115,20
76	54,90	93,70	115,80
77	50,20	80,80	107,30
78	53,70	85,80	112,10
79	50,90	76,80	99,20
80	53,40	88,00	117,20
81	51,00	77,10	98,30
82	52,40	81,60	100,80
83	55,10	86,70	117,30
84	53,10	81,70	112,30
85	50,70	79,60	111,60
86	59,10	98,40	134,80
87	53,50	84,30	110,60
88	54,50	93,10	122,30
89	46,30	71,30	97,70
90	57,30	90,40	125,40
91	41,00	62,30	83,10
92	53,00	87,50	116,70
93	54,40	84,60	108,90
94	61,50	96,40	131,10
95	46,20	66,30	89,20
96	57,60	91,60	124,30
97	54,80	88,70	122,30
Total	4868,80	7842,30	10579,80
Média	50,19	80,85	109,07
Desvio	6,10	12,23	16,58

Tabela XVI - Perda de massa por ensaio - moagem a úmido com reagente

VII.4. Análise dos Resultados e Conclusões

Nos ensaios para avaliação do comportamento da taxa de desgaste, pode-se observar que o desgaste em ambos os casos começa com um valor alto e, a cada ensaio, esse valor vai decrescendo até atingir um valor médio constante (± 85 mg na moagem a úmido e ± 28 mg na moagem a seco). Isto se deve ao fato de que na confecção da bola, há a formação de zonas distintas durante a solidificação. Na superfície, forma-se a zona coquilhada, de espessura muito pequena, devido ao rápido resfriamento. Ainda na superfície da bola ocorre a descarbonetação, isto é, queda no teor de carbono que ocorre quando a bola, logo após a solidificação, entra em contato com uma atmosfera oxidante, como o ar. A zona coquilhada serve como base para a formação da zona lacunar, onde a velocidade de resfriamento é mais lento. Finalmente, mais no centro da bola, forma-se a zona nuclear.

No início, ocorre o desgaste das zonas oxidada e coquilhada, que foi mais alto. A medida que se desgasta a zona coquilhada e se chega na zona lacunar, a taxa de desgaste diminui e, finalmente, se torna praticamente constante pois os ensaios se realizam numa região praticamente homogênea da bola.

Observou-se, também, que a taxa de desgaste na moagem a seco é menor que na moagem a úmido (ao redor de três vezes maior). Acredita-se que, na moagem a seco, forma-se uma película em torno das bolas, protegendo-as. Já a presença de água não permitiria a formação dessa película, o que pode aumentar a taxa de desgaste. A água favoreceria, também, a corrosão atuando como meio eletrolítico. Entretanto, nos dias atuais, praticamente não ocorre corrosão nestes processos, pois se adicionam reagentes que inibem a corrosão. Constata-se, também, como o desgaste depende do sistema tribológico. A mudança de uma das condições operacionais (de moagem a seco para moagem a úmido) influencia na taxa de desgaste. Nas moagens apenas com as bolas, pode-se observar na tabela XII que se obteve algumas perdas de massa negativa. Isto se deve justamente à adesão que ocorreu no contato entre as bolas.

Nos ensaios em que se testou o reagente que atuaria nos agentes provocadores no desgaste, pode-se observar que, no início, houve uma ligeira queda percentual na taxa de desgaste (cerca de 10%). Entretanto, com um tempo de moagem mais longo, o reagente não estaria mais surtindo o efeito desejado, chegando até a aumentar a taxa de desgaste, como é o caso na moagem em 3 horas.

O que se irá tentar posteriormente, é variar o pH da água utilizada, que nos ensaios foi ao redor de 6, entre ácido (apenas para averiguar a corrosão) e básico (com e sem reagente).

VIII. Bibliografia

01. Rotondaro, Roberto G., "Mecanismos de desgaste abrasivo", Tese apresentada à EPUSP para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia, São Paulo, 1988.
02. Gundewar, C.S., Natarajan, K.A., Nayak, U.B. e Satyanarayana, K. "Laboratory studies on ball wear in grinding of a hematite-magnetite ore", International Journal of Mineral Processing, 29(1990) 121-139.
03. Beraldo, José Juiz, "Moagem de minérios em moinhos tubulares, Editora Edgard Blucher LTDA, 1987.
04. Spottiswood, K., "Introduction to mineral processing", John Wiley and Sons; 1982.
05. Duda, W.H., "Cement Data Book", Bauverlag, 1976.
06. Azzaroni, Ettore, "Tamanho de los médios de molienda y pratica de recarga multiple", III Simposium de molienda, da Armco, Chile, 1980.
07. Lynch, A.J., "Mineral Crushing and grinding circuits", Elsevier Scientific Publishing Co., 1977.
08. Bond, F.C., "Crushing and grinding calculations", Allis-Chalmers, 1961.
09. Metals Handbook, volume 1, "Wear Resistance", p 597 - 638.
10. Rowland, C.A., "Selection of rod mills, ball mills, pebble mills and regrind mills", Design and installation of Comminution Circuits; SME-AIME; 1982.
11. Khrushchov, M.M., "Principles of Abrasive Wear", Elsevier Sequoia S.A., Lausanne, p 69-87, 1973.
12. Blickensderfer, R. ; Madsen, B. W. ; Tylczac, J. H. "Comparasion of Several Types of Abrasive Wear Tests". Wear of Materials International Conference - Abril 1985 - p.313-323.
13. Rabinowicz, E. "Friction and Wear of Material" - Cap.5, 6, 7.