

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE FERROS FUNDIDOS
BRANCO ALTO CROMO – ENSAIO ABRASIVO A TRÊS CORPOS.

Por:
Leandro Almeida Dutra

Vitória, ES
Dezembro/2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE FERROS FUNDIDOS
BRANCO ALTO CROMO – ENSAIO ABRASIVO A TRÊS CORPOS.

Por:

Leandro Almeida Dutra

Projeto de Graduação apresentado à Universidade Federal do Espírito Santo
Como Requisito à Obtenção do Título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Vitória, ES
Dezembro/2005

TÍTULO: Resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos branco
alto cromo – Ensaio abrasivo a três corpos.

NOME: Leandro Almeida Dutra.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. M.Sc. Rodrigo Coutinho del Piero

Prof. M.Sc. Flávio José da Silva

Vitória (ES), 22, Dezembro de 2005.

Prof. Dr. Cherlio Scandian

Sumário:

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Ferro fundido branco com alto teor de cromo	3
2.2. Tribologia	4
2.3. Desgaste	5
2.3.1. Principais tipos de desgaste	5
2.3.2. Desgaste abrasivo	6
2.3.3. Técnicas de avaliação da resistência ao desgaste abrasivo	7
2.4. Parâmetros topográficos	8
3. Procedimento Experimental	11
3.1. Obtenção dos corpos de prova	11
3.2. Procedimento de limpeza	14
3.3. Procedimento de pesagem	14
3.4. Procedimento de ensaio	15
4. Resultados e Discussões	19
4.1. Microscopia óptica	19
4.2. Dureza	20
4.3. Taxa de desgaste	21
4.4. Topografia	22
4.5. Micromecanismo	23
5. Conclusões	28
6. Referências Bibliográficas	30

1. Introdução

Os ferros fundidos branco alto cromo têm grande aplicação nas indústrias siderúrgicas, de mineração, de cimento e de papel em função da sua elevada resistência ao desgaste e custo de produção relativamente competitivo.

Em plantas siderúrgicas, em especial na Cia. Siderúrgica de Tubarão, esses materiais são usados nas barras de grelha da sinterização e submetidos a altas cargas e elevadas temperatura. A sinterização é um processo de aglomeração de finos de minério de ferro, com composição química definida, destinados à redução posterior no alto forno. Durante o processo, até dez toneladas de matéria prima, que podem chegar a 1400°C, são apoiadas em carros formados por grelhas que se locomovem sobre trilhos.

Ao atingir o final do processo os carros chegam a um ponto de inversão levando o sinter a deslizar numa declividade de 30°. Caracterizando uma importante abrasão sobre as barras de grelha.

A abrasão provocada pelo sinter nas barras de grelha foi a motivação do trabalho de Del Piero [2004]. Este autor avalia a resistência ao desgaste abrasivo de barras de grelha como fundidas e envelhecidas em diferentes temperaturas através da técnica de esclerometria pendular.

Visando a continuação deste estudo, neste trabalho foi avaliada a resistência ao desgaste abrasivo dos ferros fundidos branco alto cromo através do Ensaio a três corpos LTM.

Foram analisadas quatro amostras com composição químicas semelhantes, denominadas C0, J0, X4 e J4. As duas primeiras se apresentam no estado bruto de fusão já as duas últimas envelhecidas após três anos e meio.

Foi verificado que os materiais C0, X4 e J0 possuem estatisticamente as mesmas taxas de desgaste quando submetidos ao ensaio proposto. As ligas X4, J0 e J4 também são estatisticamente iguais, todavia as ligas C0 e J4 são diferentes.

Observamos, também, uma tendência de redução da taxa de desgaste de acordo com o envelhecimento do material.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão teórica sobre tribologia, desgaste abrasivo e parâmetros topográficos usados para verificar o perfil das superfícies desgastadas.

O capítulo 3 apresenta o procedimento experimental usado, os parâmetros dos testes de macro-dureza, micro-dureza e interferometria a laser além da descrição detalhada do ensaio de desgaste abrasivo à três corpos – máquina LTM.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos testes e os valores obtidos através dos ensaios.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados.

O capítulo 6 apresenta as fontes de referência utilizadas no trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ferro fundido branco com alto teor de cromo

Os Ferros Fundidos são ligas que contêm basicamente ferro, carbono e silício. Caracterizam-se por apresentarem uma reação eutética durante a solidificação [SANTOS E CASTELLO BRANCO, 1989]. Podem apresentar outros elementos de liga tais como: manganês, cobre e níquel.

O Ferro fundido Branco com alto teor de cromo (FFBAC) é comumente aplicado na indústria onde excelente resistência ao desgaste e moderada absorção de impacto são necessários. O desempenho desse material é função não somente da microestrutura e das propriedades, mas também do tribosistema onde está inserido.

A microestrutura dos FFBAC é constituída por um sistema ternário envolvendo o Fe-Cr-C. Dependendo da concentração de cromo, de carbono, dos elementos de liga e do tratamento térmico posterior podem ser formadas matrizes ferríticas, perlíticas, austeníticas ou martensíticas e carbonetos da forma $(\text{Fe-Cr})_3\text{C}$, $(\text{Fe-Cr})_7\text{C}_3$ e $(\text{Fe-Cr})_{23}\text{C}_6$.

Para as concentrações de cromo mais comuns, os carbonetos presentes são M_7C_3 precipitados dentro das dendritas eutéticas de uma matriz austenítica durante a solidificação. Apresentam uma dureza de 1200-1600 HV [HUTCHINGS, 1992] e uma seção transversal hexagonal [TABRETT, 1996].

Apesar do caráter sistêmico do desgaste, alguns parâmetros que influenciam fortemente o comportamento desse material foram investigados.

Sobre a matriz, cujo principal papel é de oferecer suporte mecânico aos carbonetos, verificou-se que a austenita apresentou menores taxas de desgaste que a martensita e a perlita quando usado abrasivos de alta dureza, ao passo que, quando usado

abrasivos mais macios, a martensita apresentou a menor taxa de desgaste que a austenita e a perlita [TABRETT, 1996].

Sobre os carbonetos, podemos citar como principais parâmetros: o tipo, a dureza, a fração volumétrica, a orientação e o caminho livre entre carbonetos [TABRETT, 1996]. A fração volumétrica dos carbonetos foi estudada por Zum Gahr (1987) quando se verificou um ponto ótimo para a taxa de desgaste de aproximadamente trinta por cento de carbonetos M_7C_3 em matrizes tanto austeníticas como martensíticas.

2.2. Tribologia

A tribologia é “a ciência e tecnologia de interação de superfícies em movimento relativo, o qual envolve o atrito, a lubrificação e o desgaste” [ZUM GAHR, 1987]. Este conceito foi introduzido em 1966 por Jost, no Reino Unido. A palavra “Tribologia” deriva do grego, Tribos, e significa “esfregação” [HUTICHINGS, 1992].

O estudo “empírico” da tribologia data de longo tempo. As leis básicas do atrito, por exemplo, foram cunhadas por Da Vinci (1445-1519), Amontons (1699) e Coulomb (1785), embora Bolden e Tabor, entre 1930 e 1970, tenha imprimido um caráter mais científico ao atrito.

A lubrificação tem sido estudada de modo sistemática a mais ou menos um século, a partir dos trabalhos experimentais de Beauchamp Tower (1884), e os trabalhos teóricos de Reynolds (1886) e Petroff (1883).

Já o desgaste é um assunto mais recente que o atrito e a lubrificação, e foi inicialmente estabelecido sobre bases empíricas.

Os estudos científicos do desgaste adesivo ou por deslizamento foram desenvolvidos a partir da metade do século passado por Holm (1946) e Archard (1954) [STACHOWIACK, 200; BRUSHAN, 2002]. Contudo o desgaste abrasivo teve uma nova abordagem através dos trabalhos realizados por Zum Gahr (1980).

Um assunto de grande destaque e que deve ser ressaltado é a importância industrial da tribologia.

Em 1966, Peter Jost estimou que com a aplicação dos princípios básicos da tribologia, a economia, no Reino Unido, poderia ter alcançado cerca de 515 milhões de Libras, no ano anterior [STACHOWIACK, 2000].

Um relatório similar publicado na Alemanha Ocidental, em 1976, revelou que as perdas econômicas causadas pelo atrito e desgaste representaram cerca de 10 milhões de Marcos no ano anterior. Este valor equivale à cerca de 1% do produto nacional deste país. Nos Estados Unidos, por sua vez, estima-se que cerca de 11 % da energia gasta anualmente poderia ser economizada através do desenvolvimento da tribologia [STACHOWIACK, 2000].

2.3. Desgaste

A norma DIN 50320 define o desgaste como sendo “a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é, como consequência do contato e do movimento relativo contra um outro corpo sólido, um meio líquido ou gasoso”.

O desgaste, assim como o atrito, é uma quantidade sistêmica, pois depende das características do projeto, das condições operacionais e do material.

Usualmente, um sistema tribológico pode consistir basicamente de: um corpo sólido (que sofre desgaste), um contra-corpo (corpo sólido, meio líquido ou gasoso ou uma mistura destes), um elemento interfacial (lubrificante, poeira, camadas adsorvidas) e ambiente (local).

2.3.1. Principais tipos de desgaste

O grande número de termos, utilizados para descrever os processos de desgaste, dificulta a discussão de problemas relacionados ao mesmo [ZUM GAHR, 1987]. A

classificação de acordo com a norma DIN 50320 relaciona quatro tipos de desgaste, podendo haver uma combinação entre os mesmos. Os tipos de desgaste são:

- Desgaste Adesivo ou por deslizamento: Ocorre quando as superfícies deslizam uma contra a outra. Altas pressões localizadas nas asperezas causam deformação plástica, adesão e consequentemente o crescimento das junções (espécie de soldagem localizada).
- Desgaste por Fadiga superficial: É caracterizado pela formação de trincas sub-superficiais, causadas por carregamentos alternados na superfície sólida.
- Desgaste por Reação Triboquímica: É caracterizado pelo contato entre duas superfícies sólidas, que reagem com o meio, que pode ser gasoso ou líquido.
- Desgaste Abrasivo: A ser discutido mais detalhadamente.

2.3.2. Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo é o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras, de partículas duras entre, ou embebidas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo, ou pela presença de protuberâncias duras entre uma ou ambas as superfícies em movimento relativo [PETERSON e WINER, 1980]. Segundo Eyre [1976], o desgaste abrasivo representa cerca de 50% entre os tipos de desgaste na indústria.

Pela definição [ZUM GAHR, 1987], de acordo com a maneira com que as partículas duras e/ou protuberâncias duras se apresentam, o desgaste pode ser classificado em:

- Abrasão a dois corpos: quando é causado por protuberâncias duras ou partículas duras embebidas na superfície de dois corpos;
- Abrasão a três corpos: quando as partículas podem se mover livremente (rolar ou deslizar) entre as superfícies de contato.

Ainda, para o desgaste abrasivo, quatro micromecanismos básicos são possíveis: o microsulcamento, o microcorte, o microsulcamento repetido e o microtrincamento.

No microsulcamento idealizado, um simples passe de uma partícula abrasiva não resultaria de desprendimento de material da região desgastada. Com o deslocamento da partícula dura sobre a superfície do material, este é deslocado plasticamente, formando “rugos” adjacentes aos sulcos produzidos.

Porém, no caso de situações onde o material sofre sulcamento repetidamente, os sulcos podem ser quebrados devido ao microsulcamento repetido.

Para o caso de microcorte, a perda de material corresponde ao mesmo volume dos riscos de desgaste produzidos pelas partículas.

O microsulcamento e o microcorte são micromecanismos dúcteis e estão associados com a deformação plástica da superfície desgastada.

Em relação ao microtrincamento, tensões concentradas são impostas pelas partículas abrasivas. Neste caso, grandes fragmentos de desgaste são desprendidos da superfície do material devido à formação e propagação de trincas. As perdas volumétricas por desgaste, neste caso, são maiores do que o próprio volume dos sulcos de desgaste feitos pelas partículas abrasivas.

2.3.3. Técnicas de avaliação da resistência ao desgaste abrasivo

Devido à característica sistêmica do desgaste, tenta-se reproduzir através de técnicas experimentais, em laboratório, os micromecanismos de desgaste verificados em campo.

Essas verificações podem ser realizadas através da microscopia ótica e, sobretudo, a microscopia eletrônica de varredura. Para isso, diversos equipamentos de teste (“Abrasômetros”) são construídos para simular estes micromecanismos, com o objetivo de classificar os materiais quanto à resistência ao desgaste.

Diversos abrasômetros são reportados na literatura, embora os normalizados em organismos internacionais, como o roda-de-borracha (ASTM G65), sejam poucos [ZUM GAHR, 1987].

Outras técnicas podem ainda ser citadas como a microabrasão, que se apresenta como uma nova tendência no estudo do desgaste em pequenas escalas e o LTM que simula a abrasão a três corpos e apresenta resultados semelhantes ao teste de roda de borracha.

O micromecanismo de desgaste estudado nesse projeto foi “abrasão a três corpos” simulado através do Ensaio LTM, cuja descrição detalhada encontra-se na seção seguinte.

2.4. Parâmetros topográficos

O conhecimento da topografia é de fundamental importância para a compreensão do mecanismo de desgaste atuante em um ensaio. Uma vez que o estudo do desgaste é experimental, são calculados parâmetros estatísticos os quais permitem inferir o perfil topográfico da superfície de uma amostra.

Os parâmetros abordados são: a Altura Aritmética Média, o RMS, o Assimetria e o Kurtosis, apesar de existirem uma vasta variedade.

A altura aritmética média (R_a) é o parâmetro universalmente utilizado para a medição da rugosidade. É definido como a variação da altura absoluta da superfície em relação a uma referência denominada linha média. A linha média é definida como a linha tal que a área do perfil acima dela é igual à área do perfil abaixo dela.

O RMS (R_q) é o parâmetro estatístico definido como sendo o quadrado da altura aritmética média. Seu valor será equivalente ao desvio padrão se a linha média coincidir com a linha adotada como referencial na mediação. A figura 2.1 ilustra um perfil topográfico.

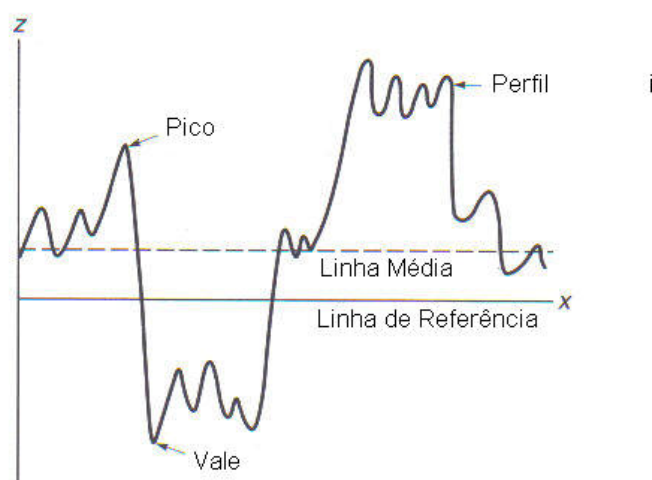


Figura 2.1- Ilustração de um perfil topográfico e suas referências

O parâmetro de Assimetria (R_{sk}) é usado para medir a simetria do perfil em relação à linha média. É muito sensível a vales profundos e a asperezas elevadas. Uma distribuição simétrica dos picos e dos vales em relação à linha média nos fornece uma assimetria zero. Perfis que apresentam asperezas removidas ou indentações profundas levam a valores negativos de assimetria, por outro lado, perfis que apresentam vales preenchidos ou asperezas elevadas levam a valores positivos de assimetria. A Figura 2.2 exemplifica as superfícies descritas.

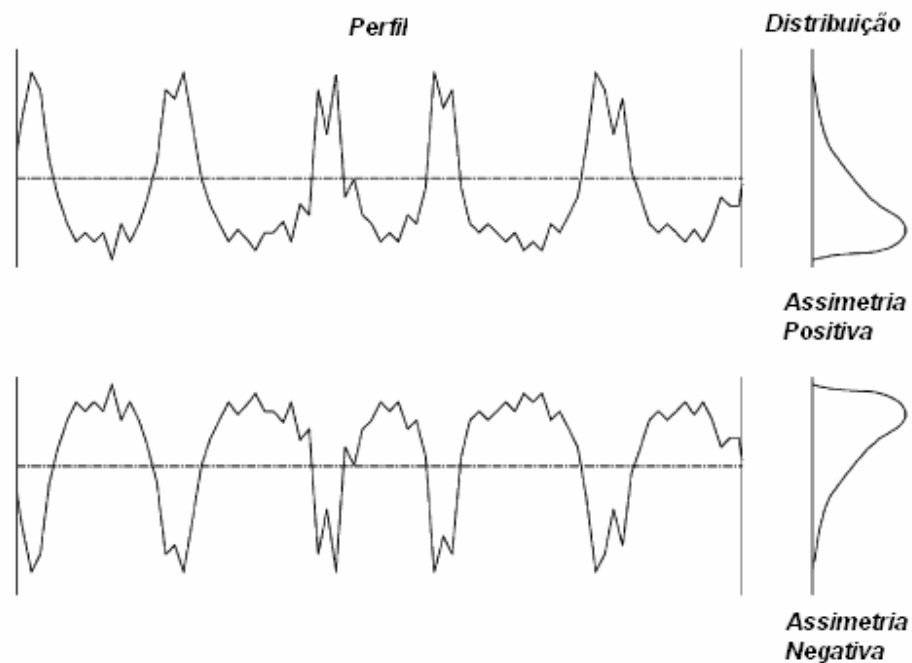


Figura 2.2 - Superfícies com Assimetria positiva e negativa.

O parâmetro de Kurtosis (R_{ku}) descreve a forma da transição entre as asperezas e os vales. Para valores de kurtosis menores que três a curva de distribuição é chamada de *platykurtic*, caracterizando a presença de poucas asperezas elevadas e poucos vales profundos. Logo, a transição é mais suave. Para valores de kurtosis maiores que três a curva de distribuição é chamada de *leptokurtic*, caracterizando a predominância de asperezas elevadas e vales profundos. Logo, a transição é mais brusca. A Figura 2.3 exemplifica o tipo de superfície descrita.

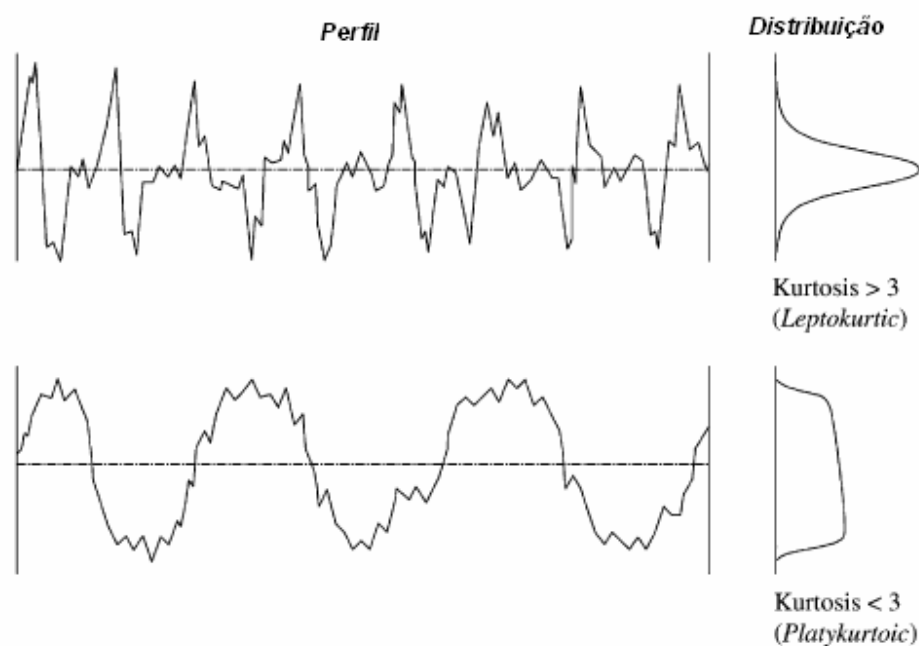


Figura 2.3 - Ilustração de superfícies em função do valor de Kurtosis.

3. Procedimento Experimental

3.1. Obtenção dos corpos de prova

Os materiais usados nos ensaios foram retirados das barras de grelha da sinterização da Cia. Siderúrgica de Tubarão. Além de apresentarem três composições químicas diferentes mostradas na tabela 3.1 à tabela 3.3, foram retiradas amostras em dois estados diferentes. Portanto, foram separados quatro conjuntos diferentes de materiais, descritos na tabela 3.4.

Tabela 3.1 - Composição química do material C.

%C	%Cr	%Si	%Ti	%V	%Mo	%P	%S	%Mn
1,7-1,8	25-27	0,5-0,7	0,12-0,18	0,15-0,25	0,3-0,5	0,04	0,03	0,7-0,9

Tabela 3.2 - Composição química do material J.

%C	%Cr	%Si	%Mn	%P	%S
1,4-1,6	25-28	1,25	0,8	0,02	0,015

Tabela 3.3 - Composição química do Material X.

%Cr	%Si	%Mn	%V	%S
35,73	0,70	0,87	0,38	0,23

Tabela 3.4 - Nomenclatura das amostras.

C0	Conjunto C recém fundido.
X4	Conjunto X com 3,5 anos de trabalho.
J0	Conjunto J recém fundido.
J4	Conjunto J com 3,5 anos de trabalho.

Cada conjunto possui três corpos de prova cilíndricos que foram retirados das barras de grelha a partir da região delimitada acima do corte A, como mostra a Figura 3.1.

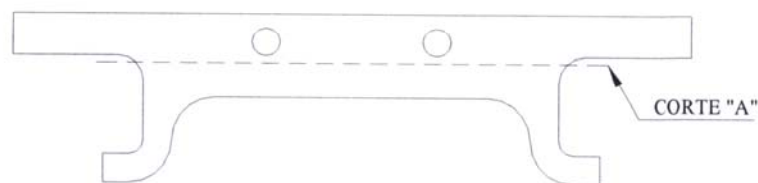


Figura 3.1 - Região retirada da amostra.

Em seguida, os corpos de prova foram usinados com uma seção transversal circular a fim de evitar um desgaste heterogêneo nas extremidades e suas superfícies de ensaio foram retificadas. A Figura 3.2 ilustra os corpos de prova e os valores de diâmetro e altura de cada corpo de prova estão listados na tabela 3.5.

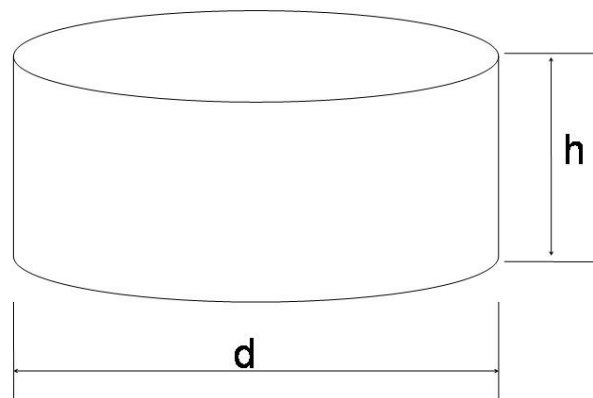


Figura 3.2 - Forma dos corpos de prova.

Tabela 3.5 - Dimensões dos Corpos de Prova.

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
C01	13,98	9,40
C02	14,22	9,40
C03	14,20	9,40
X41	14,42	8,70
X42	14,22	8,70
X43	14,05	8,70
J01	14,05	8,40
J02	14,08	8,40
J03	13,90	8,45
J41	14,17	8,80
J42	13,90	8,80
J43	14,07	8,80

3.2. Procedimento de limpeza

A limpeza dos corpos de prova foi realizada seguindo as etapas:

- 1) A amostra, dentro de um béquer contendo álcool, foi colocada em um dispositivo de ultra-som durante cinco minutos a fim de remover resíduos de usinagem, óleos e gorduras aderidos à mesma;
- 2) A amostra foi limpa com água corrente, a fim de retirar os resíduos depositados sobre a superfície;
- 3) A amostra, dentro de um béquer contendo acetona, foi colocada em um dispositivo de ultra-som durante cinco minutos a fim de remover resíduos de usinagem, óleos, gorduras e reduzir a umidade;
- 4) A amostra foi seca em ar quente a fim de evaporar rapidamente a acetona e evitar a contaminação por poeira ou qualquer outro elemento que possa influenciar na pesagem;
- 5) A amostra foi guardada em recipiente limpo e vedado contendo sílica para evitar a contaminação até a pesagem.

Deve-se observar que toda a manipulação das amostras foi feita com pinças para evitar a contaminação.

3.3. Procedimento de pesagem

Após a secagem, as amostras foram submetidas à ação de um desmagnetizador por trinta segundos (marca: Sartorius).

Para a medição da massa foi utilizada um balança com quatro casas decimais (marca: Ohaus AS120S). Cada corpo de prova foi pesado três vezes, a fim de assegurar maior confiabilidade dos resultados.

3.4. Procedimento de ensaio

O ensaio simula o desgaste abrasivo por rolamento. As amostras, em grupos de três e armazenadas em um recipiente, são colocadas sobre um disco de ferro fundido. À medida que o disco inicia um movimento de rotação as amostras são apoiadas e giram no sentido oposto. É adicionado, então, material abrasivo que entra na interface amostra-disco. A carga normal comprime as amostras contra o disco levando ao desgaste do material, a Figura 3.3 ilustra o ensaio.

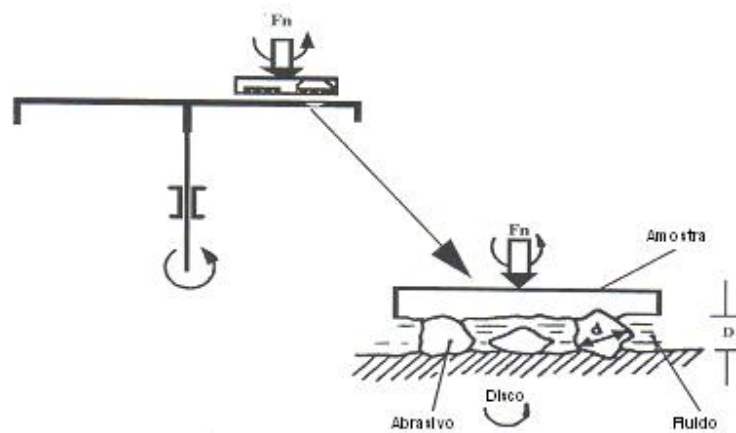


Figura 3.3 - Ilustração do ensaio abrasivo com rolamento.

Foi usada a máquina de Ensaio a Três Corpos LTM do Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, vide Figura 3.4.



Figura 3.4 - Máquina LTM.

O abrasivo utilizado foi a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) código 100 com granulometria entre 0,30 mm e 0,15 mm.

Após a limpeza e pesagem dos corpos de prova, eles foram ensaiados em grupos de três amostras a fim de garantir a distribuição da carga normal sobre um plano.

As amostras foram armazenadas em um disco de madeira que, posteriormente, foi encaixado em uma casca cilíndrica de aço. A carga normal aplicada foi de 1,446 kgf usando um peso morto, vide Figura 3.5.



Figura 3.5 - Disco de Madeira, Casca Cilíndrica e Carga normal aplicada no ensaio (esquerda para direita).

O dispositivo de armazenagem das amostras foi montado, colocado em cima de um disco de ferro fundido cinzento e apoiado por um garfo (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Máquina LTM pronta para ensaio.

A casca cilíndrica é dotada de pequenos cortes quadrados na base, a fim de possibilitar a entrada do abrasivo na interface amostra-disco (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Meio de entrada do abrasivo na interface amostra-disco.

Cada conjunto foi ensaiado durante oitenta minutos. Sendo que nos primeiros sessenta minutos as amostras foram retiradas a cada cinco minutos para limpeza e pesagem, no restante do tempo, elas foram retiradas a cada dez minutos. Tal procedimento foi adotado a fim de garantir que a taxa de desgaste entrasse em regime permanente.

Os valores de macro-dureza foram obtidos a partir da média de cinco medições usando um penetrador tipo Vickers com carga de 20kgf.

Os valores de micro-dureza foram obtidos através de um microdurômetro de carga de 50 g por 15 segundos. Foram escolhidos cinco pontos dentro das matrizes longe de carbonetos, exceto na medição da amostra J4 onde só foi possível uma medição uma vez que os carbonetos estavam muito dispersos na matriz.

Os parâmetros topográficos foram obtidos a partir do interferômetro óptico a laser (marca: UBM microfocus Expert IV). Foi medido um quadrado de cinco milímetros no interior da amostra com dois mil pontos de densidade. A análise da superfície foi realizada mediante o programa “UBM Measurement Analysis System”, no LTM/UFU (Laboratório de Tribologia e Materiais – Universidade Federal de Uberlândia).

A verificação do micromecanismo de desgaste foi feita usando o microscópio eletrônico de varredura (marca: Leica-Oxford S4401) no LTMF/CST (Laboratório de Metalurgia Física – Companhia Siderúrgica de Tubarão).

4. Resultados e Discussões

4.1. Microscopia óptica

A microestrutura de cada um dos materiais em estudo foi verificada por Del Piero, 2004. As ligas C0 e J0 apresentam uma microestrutura composta de uma matriz austenítica e um eutético de autenita + M_7C_3 .

Já a liga J4, por sofrer o efeito do envelhecimento, apresenta uma matriz ferrítica e predominância de carbonetos secundários $M_{23}C_6$ precipitados ao longo da matriz, vide Figura 4.1.

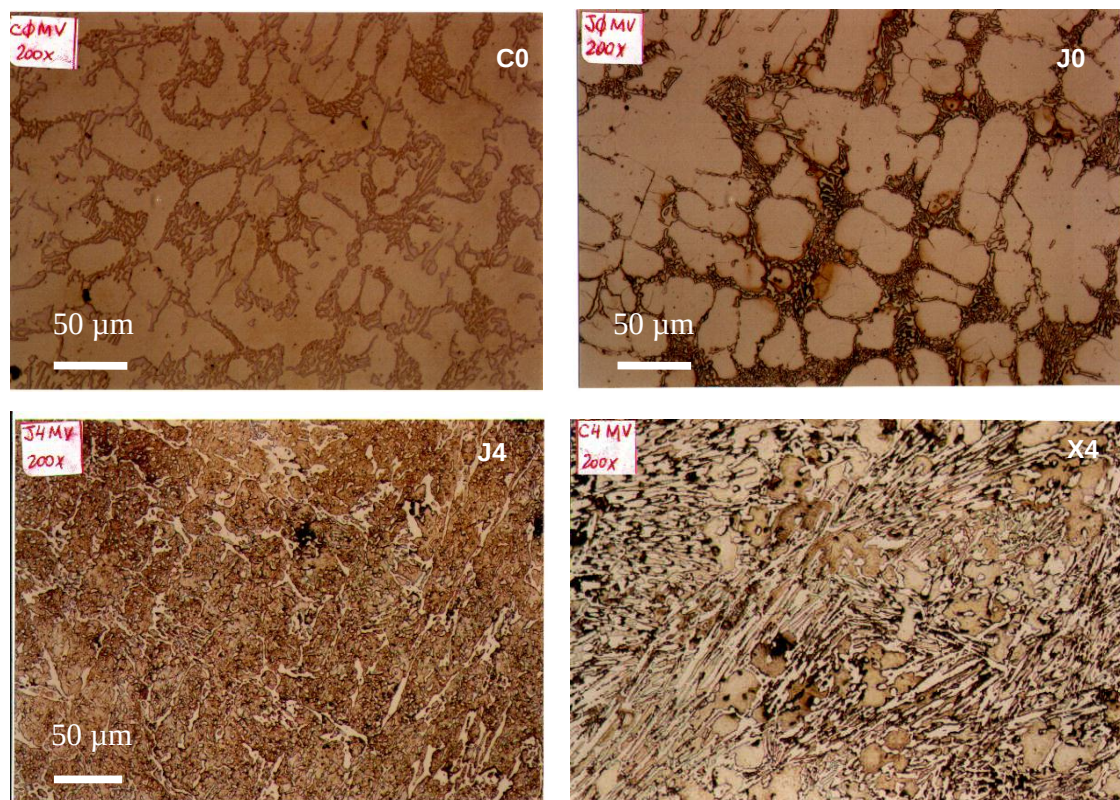


Figura 4.1 - Micrografia dos materiais atacados com reagente Vilella.

4.2. Dureza

Os valores médios de macro-dureza e micro-dureza medidos são apresentados no gráfico 4.1.

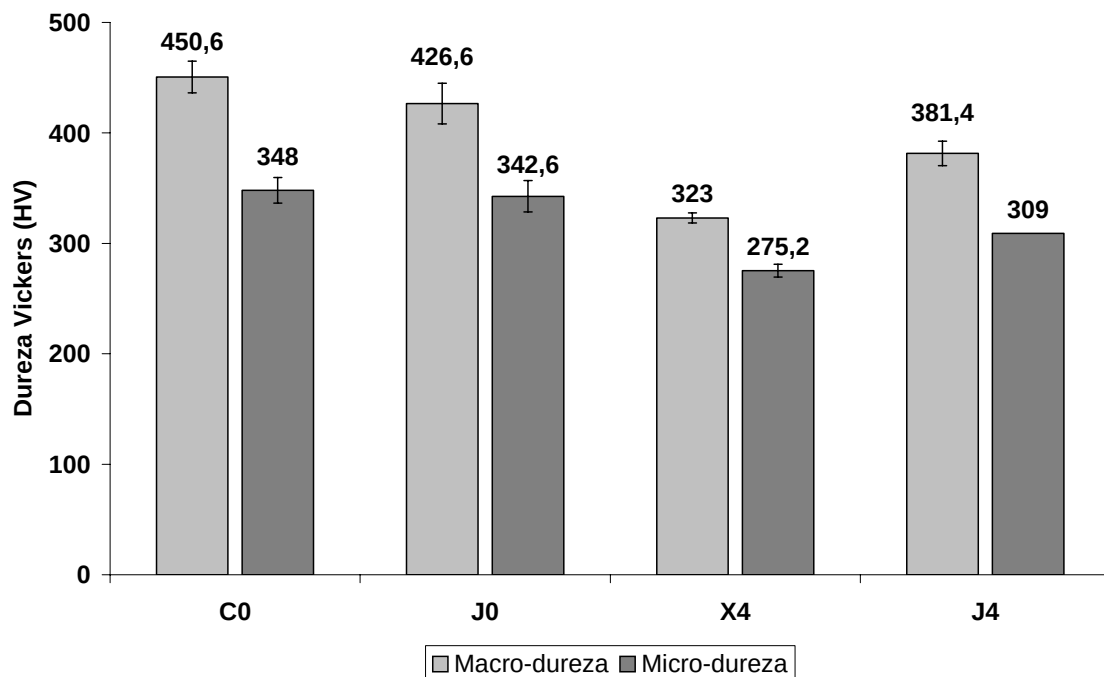


Gráfico 4-1 - Valores de macro-dureza e micro-dureza das ligas C0, J0, X4 E J4.

Os valores encontrados na literatura para ferros fundidos brancos com matrizes austeníticas e composições similares são de 450-650 HV [PARENT-SIMONIN, 1980]. Os valores encontram-se no limite inferior da literatura visto que as ligas possuíam uma leve adição de níquel (0 a 0,2%).

Para os ferros fundidos com matrizes ferríticas envelhecidas, a literatura aponta valores de 394 HV [DEL PIERO, 2004].

Os valores citados na literatura para a dureza da austenita com alto teor de cromo estão na faixa de 300-600 HV [HUTCHINGS, 1992]. Para matrizes ferríticas, os valores de micro-dureza encontrados foram de 276,2 HV_{0,25} [CARVALHO, 2005].

Portanto, as medições de macro-dureza e micro-dureza encontram-se compatíveis com os valores encontrados na literatura.

4.3. Taxa de desgaste

O regime permanente foi considerado a partir da análise da seguinte relação:

$$\frac{\bar{X}}{\delta} < 0,10$$

Sendo $\bar{X}$ é a média das duas últimas taxas de desgaste medida e δ é o desvio padrão dos valores medidos.

As ligas ensaiadas entraram no estado permanente após o tempo de trinta e cinco minutos, conforme mostra o gráfico 4.2.

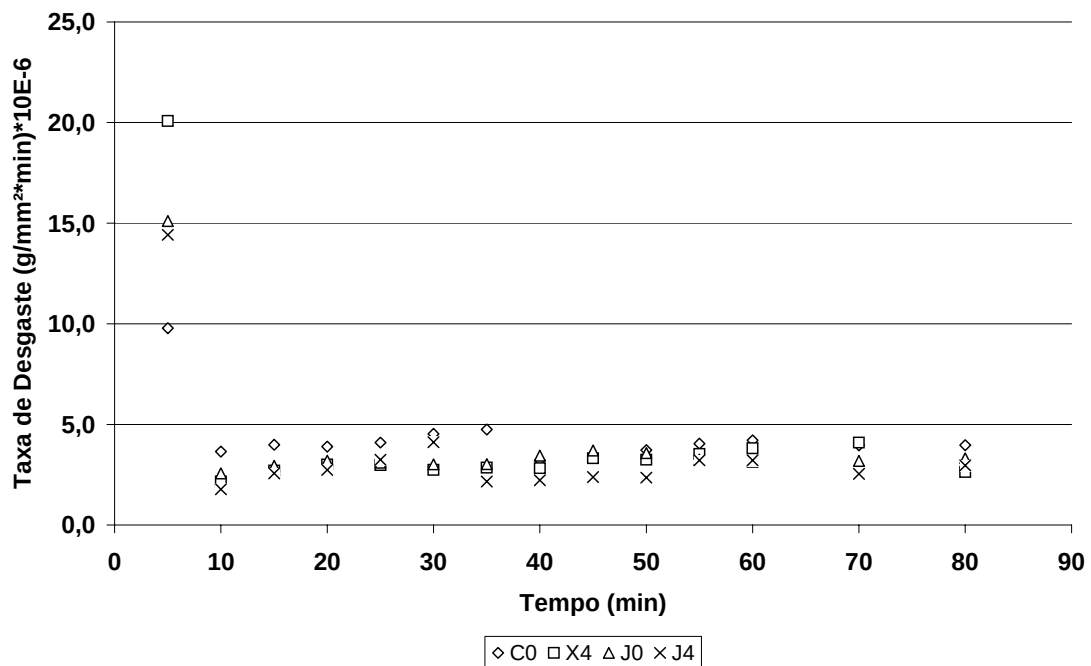


Gráfico 4-2 - Tempo para o regime permanente nas ligas ensaiadas

As taxas de desgaste medidas, em regime permanente, dos materiais ensaiados são apresentadas no gráfico 4.3.

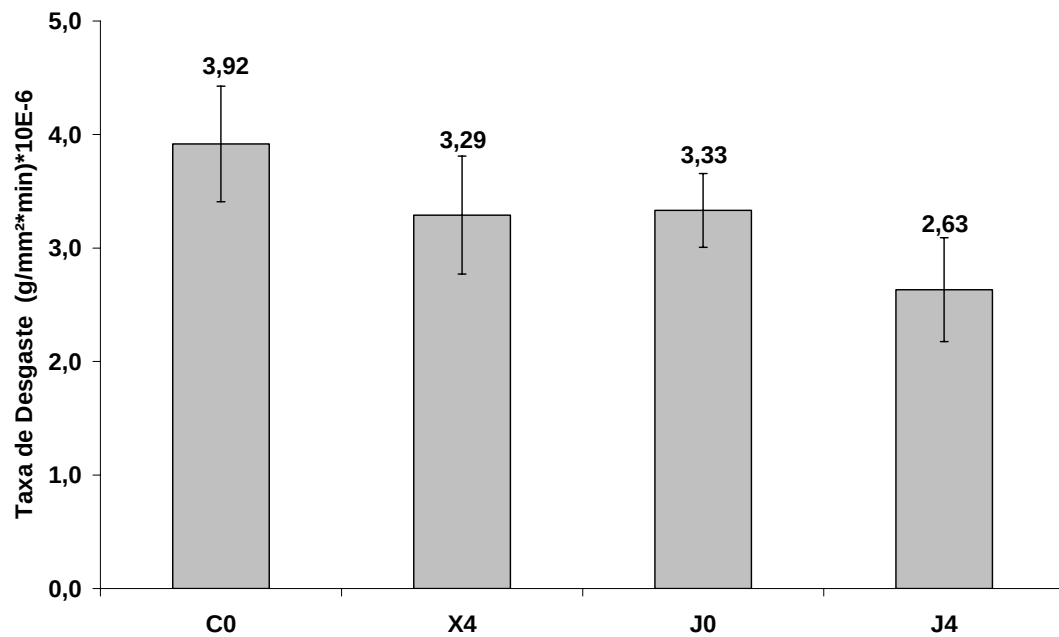


Gráfico 4-3 - Taxa de desgaste no regime permanente das ligas ensaiadas

Verificou-se que os materiais C0, X4 e J0 possuem estatisticamente as mesmas taxas de desgaste quando submetidos ao ensaio descrito. As ligas X4, J0 e J4 também são estatisticamente iguais, todavia as ligas C0 e J4 são diferentes.

Observamos, também, uma tendência de redução da taxa de desgaste de acordo com o envelhecimento do material.

4.4. Topografia

Os principais parâmetros, medidos em μm , são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.1 - Parâmetros topográficos das amostras

	C0	X4	J0	J4
R_a	14,3	4,43	3,92	6,47
R_q	15,1	5,55	4,79	7,31
R_{sk}	1,14	-1,46	1,09	-1,32
R_{ku}	1,36	2,99	2,7	1,96

Observando os parâmetros de Assimetria e de Kurtosis concluímos que as ligas envelhecidas são formadas por platôs que apresentam indentações profundas. Já as ligas como fundidas são caracterizadas por picos maiores que vales. A transição entre os vales e picos, em ambos os casos, é suave.

Logo, podemos inferir que nas ligas envelhecidas, dada a matriz ferrítica de baixa dureza, a partícula abrasiva levou a um desgaste preferencial por indentação. Já nas ligas como fundidas, dada a matriz austenítica de maior dureza, a partícula abrasiva levou a um desgaste preferencial por microsulcamento promovendo a formação de picos elevados.

4.5. Micromecanismo

Os micromecanismos das amostras C0, C4, J0 e X4 foram identificados com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura. Foram encontradas, predominantemente, evidências de microsulcamento repetido por indentação, conforme as Figuras 4.2 a 4.5, e alguns sinais de microsulcamento por deslizamento, conforme as Figuras 4.6 a 4.9, caracterizando assim um mecanismo de desgaste por deformação plástica da superfície.

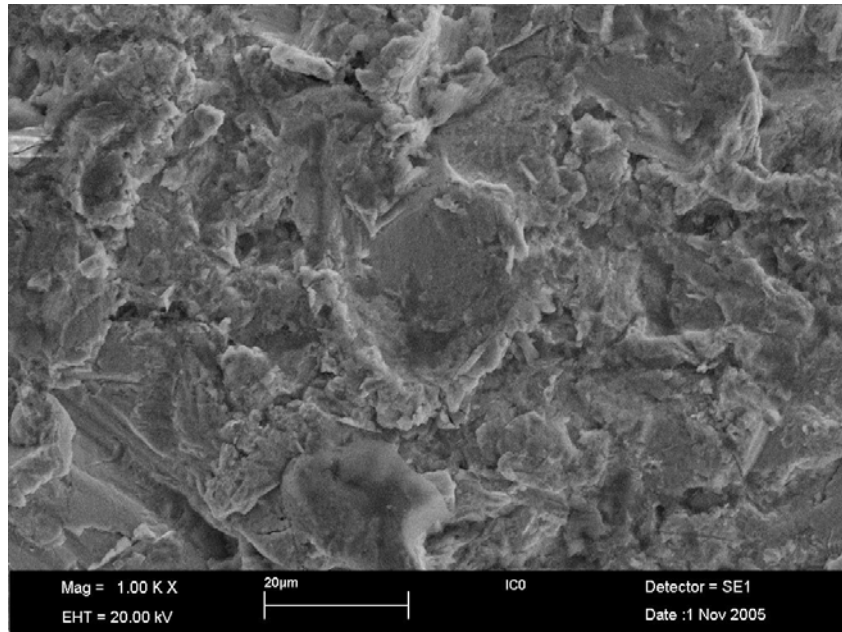


Figura 4.2 - Deslocamento do material C0 plasticamente formando "rugas" ao redor da indentação. O material ao redor, altamente encruado, caracteriza deformações repetidas.

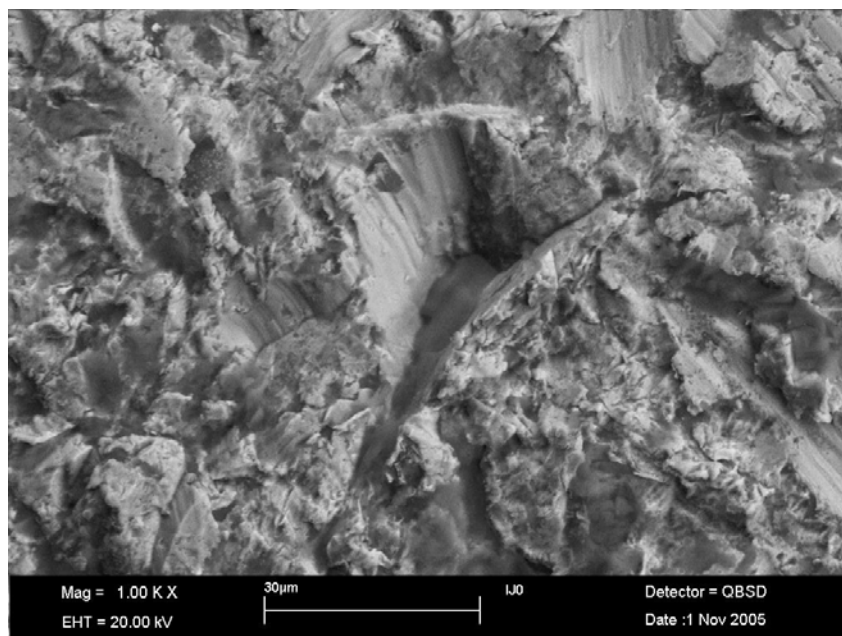


Figura 4.3 - Indentação profunda no material J0 com o deslocamento visível de massa.

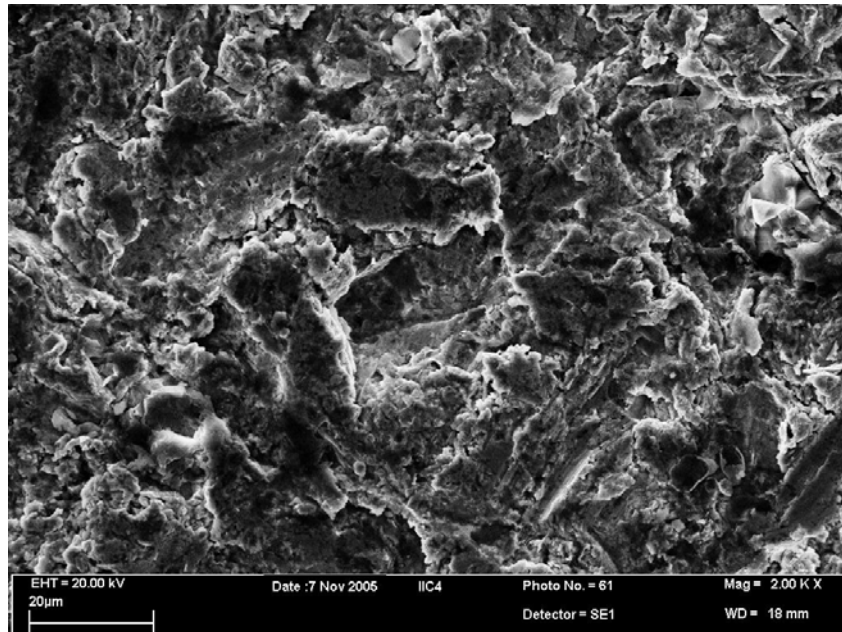


Figura 4.4 - Deformações plásticas repetidas na superfície do material X4 caracterizado pela formação de “rugos” na superfície.

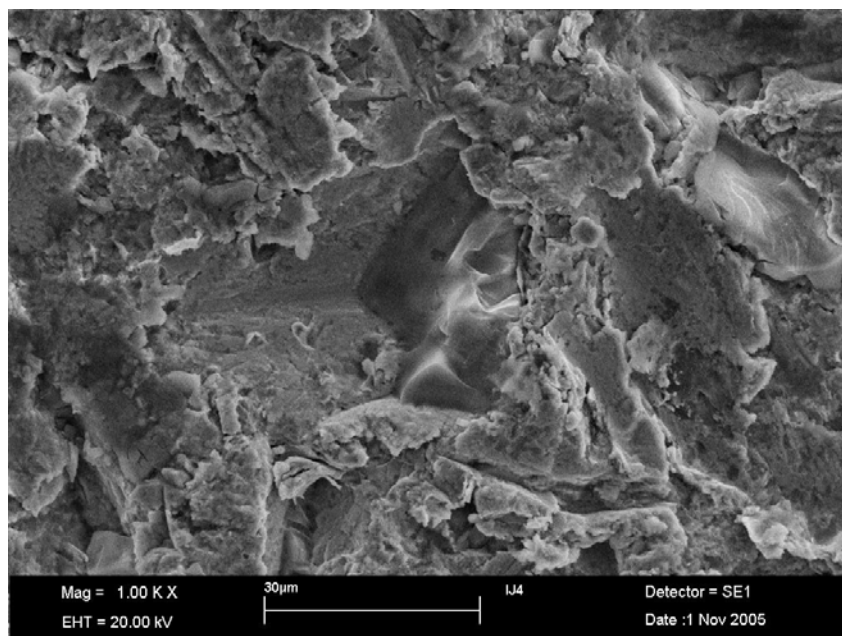


Figura 4.5 - Indentação profunda no material J4 apresentando deslocamento de massa.

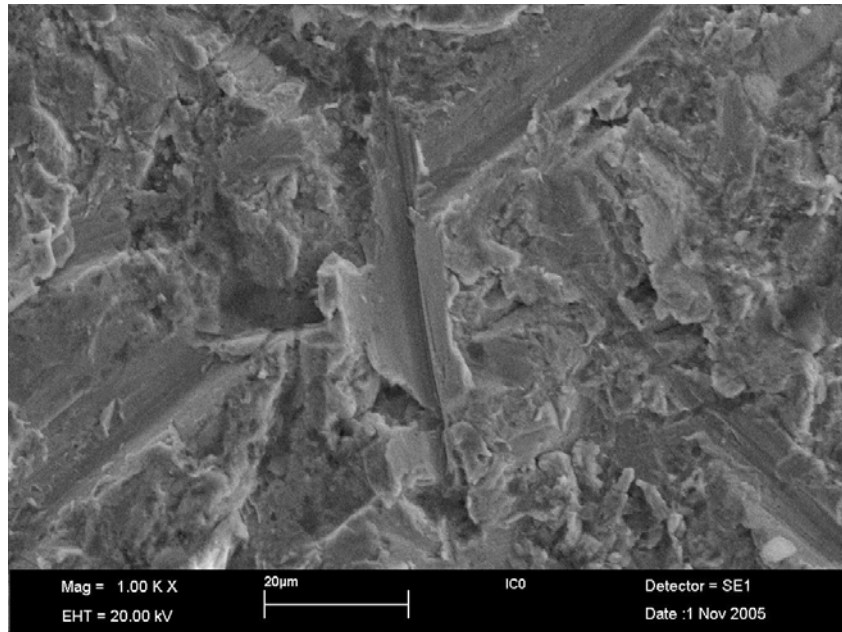


Figura 4.6 – Microsulcamento por deslizamento no material C0

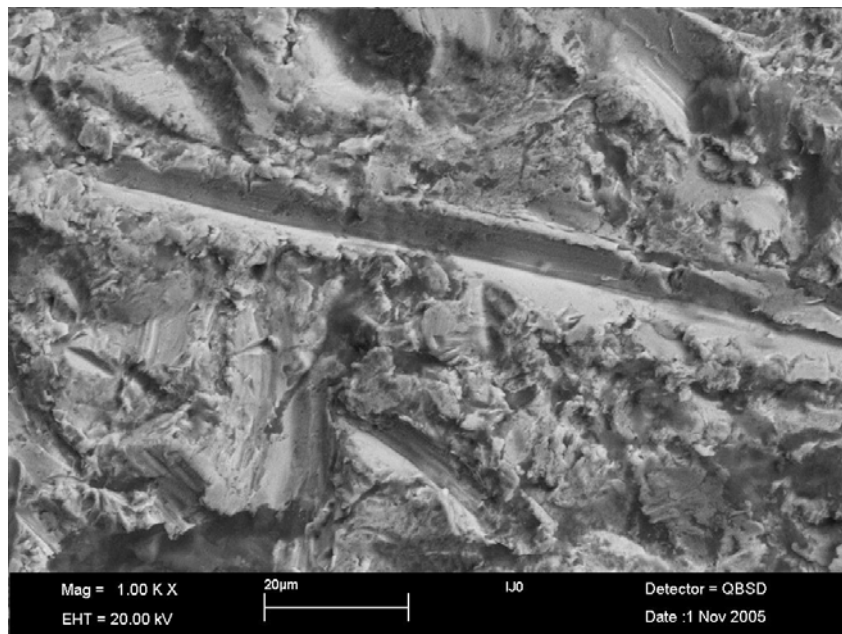


Figura 4.7 - Microsulcamento por deslizamento no material J0

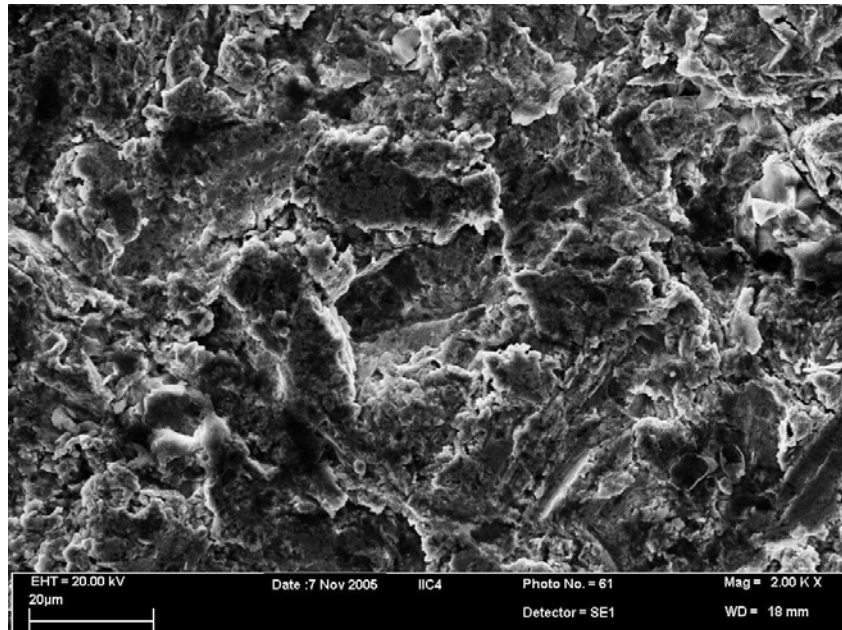


Figura 4.8 - Microsulcamento por deslizamento no material X4 à direita

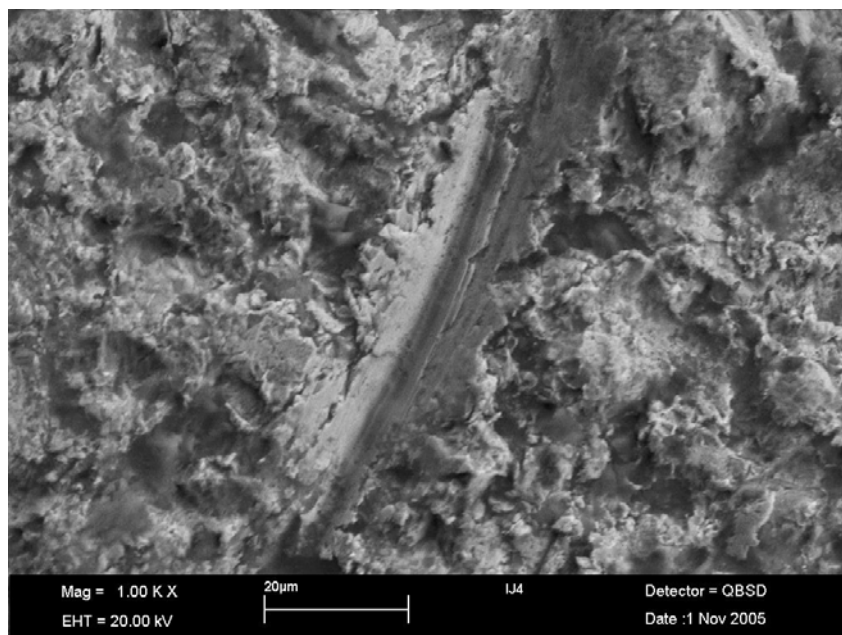


Figura 4.9 - Microsulcamento por deslizamento no material J4

5. Conclusões

O micromecanismo de desgaste predominante foi de microsulcamento repetido por rolamento provocado por indentações das partículas abrasivas. Foram encontrados também sinais de microsulcamento por deslizamento. Não foram encontradas marcas que indiquem microtrincamento como um micromecanismo atuante.

Verificou-se que as ligas C0, X4 e J0 possuem estatisticamente as mesmas taxas de desgaste quando submetidos ao ensaio descrito. As ligas X4, J0 e J4 também são estatisticamente iguais, todavia as ligas C0 e J4 são diferentes.

Observamos, também, uma tendência de redução da taxa de desgaste de acordo com o envelhecimento do material.

A dureza e a taxa de desgaste apresentaram uma relação diretamente proporcional para os materiais de mesma composição, como mostra o gráfico 5.1.

A transformação da matriz de austenita para ferrita garantiu maior ductilidade e conseqüentemente menor grau de encruamento o que cooperou para o aumento da resistência ao desgaste abrasivo de caráter plástico.

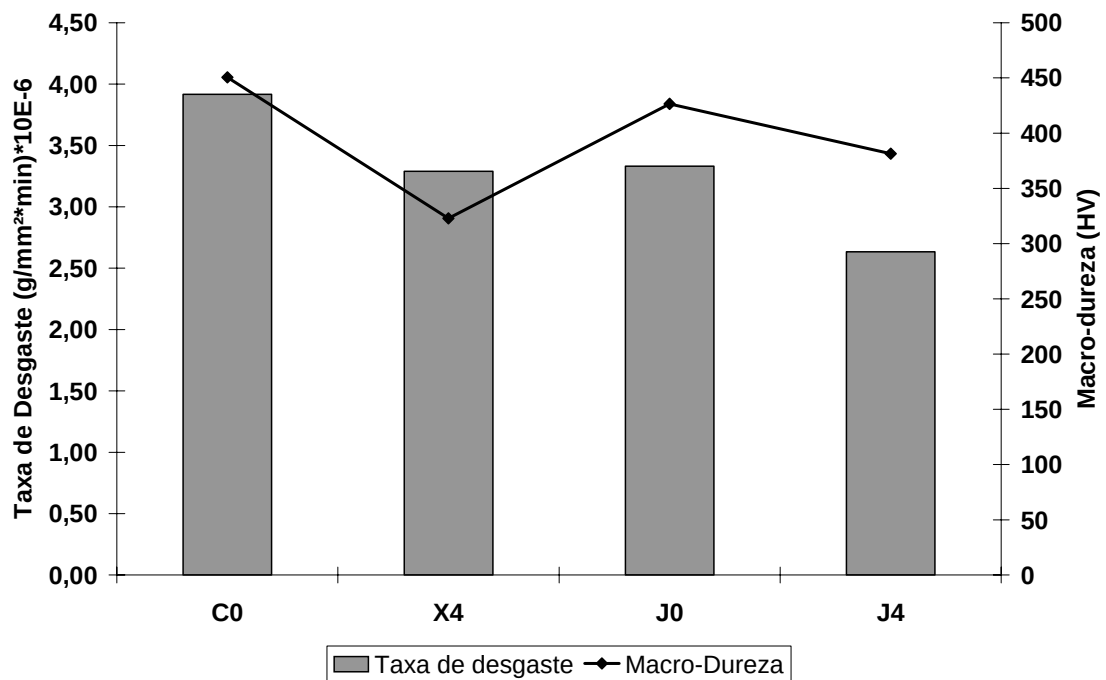


Gráfico 5-1 - Relação entre a taxa de desgaste e a macro-dureza

Foi observada uma mudança no perfil topográfico das ligas como fundidas em relação às ligas envelhecidas. A formação de platôs com indentações profundas foi encontrada tanto nas ligas X4 como nas ligas J4. Já um perfil de vales rasos e asperezas elevadas foi encontrado nas ligas C0 e J0.

6. Referências Bibliográficas

BRUSHAN, B. **Introduction to Tribology**, Ed. John Wiley Professio, 2002.

CARVALHO, S. **Estudo microestrutural dos ferros fundidos brancos alto cromo e molibidênio**, Tese M. Sc., PPGEM/UFES, Vitória, Abril 2005.

DEL PIERO, R. **Resistência ao desgaste abrasivo a quente de ferros fundidos brancos alto cromo, utilizado em barras de grelha na sinterização**, Tese M.Sc., PPGEM/UFES, Vitória, Maio 2004.

GADELMALWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SLIMAN, H. H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology** vol. 123, p.133-145, 2002.

HUTCHINGS, I. M. **Friction and wear of engineering materials**. CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 1992.

MARGERIE, J. C.; PARENT-SIMONIN, S. Mesure des caractéristiques mécaniques des fonts blanches. **Fonderie** vol.402, p. 325-334, 1980.

NORMA DIN 50320 Dezembro 1979.

SOUZA SANTOS, A. B.; CASTELLO BRANCO, C. H. Metalurgia dos ferro fundidos cinzentos e nodulares. **IPT 1100**, 1989.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, Butterworth-Heinemann, 2º edição, 2000.

TABRETT, C. P.; SARE, I. R.; GHOMASHCHI, M. R. Microstructure-property relationship in high chromium white iron alloys. **International Materials Reviews**, vol. 41, nº 2, p. 59-82, 1996.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear materials**. Tribology series 10, Elseivier Science Publishers B. V., 1987.