

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2011

T266i	Teixeira, Kleber Donizetti Influência da velocidade de deslizamento no desgaste do par tribológico ferro fundido cinzento centrifugado - ferro fundido cinzento MC 12 e MC13 / Kleber Donizetti Teixeira – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 117 f. : il. Bibliografia: f. 103-109 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic Coorientador: Humberto Lopes Rodrigues 1. Tribologia I. Título CDU 621.89
-------	--



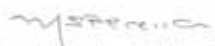
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

KLEBER DONIZETTI TEIXEIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. SÉRGIO JOÃO CRNKOVIC
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. ANA PAULA ROSIFINI ALVES CLARO
Unesp-Feg


Prof. Dr. SANDRA GIACOMINI SCHNEIDER
EEL-USP

Janeiro de 2011

KLEBER DONIZETTI TEIXEIRA

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO NO
DESGASTE DO PAR TRIBOLÓGICO FERRO FUNDIDO
CINZENTO (MC 12 E MC 13) – FERRO FUNDIDO CINZENTO
CENTRIFUGADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sergio João Crnkovic

Coorientador: Prof. Dr. Humberto Lopes Rodrigues

Guaratinguetá

2011

DADOS CURRICULARES**KLEBER DONIZETTI TEIXEIRA**

NASCIMENTO	08.10.1981 – SERTÃOZINHO/SP
FILIAÇÃO	Claudio Teixeira Maria Helena Alves Teixeira
2001/2005	Curso de Graduação Escola de Engenharia de Lorena (EEL) – Universidade de São Paulo
2007/2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

de modo especial, à minha esposa Larissa, que durante todos esses anos foi a grande incentivadora do meu trabalho e para que eu continuasse no curso, e também a meus pais e irmãos, a grande base da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic* e ao meu co-orientador *Prof. Dr Humberto Lopes Rodrigues* que jamais deixaram de me incentivar e apoiar. Sem a orientação, dedicação e auxílio de vocês o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Claudio e Maria Helena*, que apesar da distância e dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

a minha esposa Larissa, pela paciência, disposição e amor dado durante todo esse tempo de convivência.

aos funcionários da pós-graduação pela paciência e ajuda no atendimento,

à Mahle Componentes de Motores S.A pelo incentivo e disponibilidade, em particular ao engenheiro Edmo Soares, pelos dados, suporte e materiais utilizados no estudo de caso.

TEIXEIRA, K. D. **Influência da velocidade de deslizamento no desgaste do par tribológico ferro fundido cinzento centrifugado - ferro fundido cinzento MC 12 e MC13.** 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

O Ferro Fundido é amplamente utilizado na indústria de autopeças do setor automobilístico, principalmente em anéis de pistão, camisa de cilindros, discos de freios e outros, devido a sua boa resistência ao atrito e desgaste, por ter boa condutividade térmica e ser antivibracional. Com a globalização, grandes esforços vêm sendo feitos por pesquisadores, direcionados ao desenvolvimento de novos materiais que atendam os mercados mundiais, trazendo a competitividade necessária na busca de processos de fabricação e pesquisas, objetivando redução de custos, qualidade e produtividade, sendo que no ramo automobilístico a realidade não é diferente. Motores menores e mais leves têm aumentado constantemente os carregamentos térmicos e mecânicos dos componentes, na qual o sistema tribológico do anel de pistão é dos mais complexos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento tribológico através do teste de bancada pino-disco dos pares: Ferro Fundido Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC12 e Ferro Fundido Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC13 em função da velocidade de deslizamento (0,5 m/s, 1,0 m/s e 1,5 m/s). Para os discos (MC 12 e MC 13) a taxa de desgaste decresceu linearmente com o aumento da velocidade de deslizamento, já para os pinos em Ferro Fundido Cinzento Centrifugado, a taxa de desgaste decresceu até 1,0 m/s, e a 1,5 m/s a taxa de desgaste apresentou um ligeiro aumento, determinado pela instabilidade gerada pelo aquecimento da superfície e formação da camada de óxido. O par Centrifugado/ MC 13 apresentou melhor desempenho a 0,5 m/s e o par Centrifugado/ MC 12 a 1,0 e 1,5 m/s.

Verificou-se que os mecanismos de desgaste atuantes são: adesão (0,5 m/s), adesão + oxidação (1,0 m/s) e oxidação (1,5 m/s). Em todas as velocidades de deslizamento, os mecanismos principais de desgaste são seguidos de microabrasão.

PALAVRAS-CHAVE: Desgaste. Mecanismo de desgaste. Ferro Fundido Cinzento MC 12. Ferro Fundido Cinzento MC 13. Ferro Fundido Cinzento Centrifugado. Grafita.

TEIXEIRA, K. D. **Influence of sliding speed on the wear of the tribological pair Centrifuged Grey Cast Iron/ Grey Cast Iron (MC 12 and MC 13).** 2011. 117 f. Thesis (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The cast iron is widely used in auto parts industry in the automotive sector, mainly in piston rings, cylinder liners, brake discs and others due to its good resistance to friction and wear, to have good thermal conductivity and be antivibrational. With globalization, great efforts have been made by researchers, directed the development of new materials that meet the global markets, bringing the competitiveness required in the pursuit of manufacturing processes and research, aiming at cost reduction, quality and productivity, and the branch automotive reality is no different. Smaller engines and lighter loads have steadily increased thermal and mechanical components, in which the tribological system piston ring is the most complex.

The aim of this study was to evaluate the tribological behavior through the test bench pin-disk pairs: Centrifuged Gray Cast Iron/ Gray Cast Iron MC 12 and Centrifuged Gray Cast Iron/ MC 13 depending on sliding velocity (0.5m/s, 1.0 m/s and 1.5 m/s). For discs (MC 12 and MC 13) the wear rate decreased linearly with increasing sliding velocity, since the pins on Cast Iron Grey centrifuged, the wear rate decreased to 1.0 m / s, and 1, 5 m / s the wear rate increased slightly, as determined by the instability caused by surface heating and the formation of the oxide layer. The pair centrifuged / MC 13 performed better than 0.5 m / s and centrifuged pair / MC 12 to 1.0 and 1.5 m / s.

It was found that the prevalent wear mechanisms are adhesion (0.5 m / s), adhesion + oxidation (1.0 m / s) and oxidation (1.5 m / s). In all sliding velocities, the main mechanisms of wear are followed by abrasion.

KEYWORDS: Sliding wear, adhesive wear, oxidative wear, Gray cast iron (sub class MC 12 and MC 13), Centrifuged Gray cast iron and Graphite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Regime de lubrificação dos componentes de motores e suas correlações com a fricção (CANALE, 2005).	22
Figura 2.2 – Representação do anel de pistão (FERRARESE, 2004).	23
Figura 2.3 - Célula de potência típica (FERRARESE, 2004).....	24
Figura 2.4 - Curva de Stribeck (FERRARESE, 2004)	25
Figura 2.5 - Distribuição típica da distribuição de temperatura de um pistão de motor Diesel (FERRARESE, 2004)	26
Figura 2.6 – Tabela de materiais (ISO 6621-3)	26
Figura 2.7 – Diagrama de fase do sistema Fe-C	28
Figura 2.8 - Tipos de grafita segundo a ASTM a) Tipo A, b) Tipo B, c) Tipo C, d) Tipo D e e) Tipo E (COLPAERT, 2009)	32
Figura 2.9 – Mecanismo de desgaste abrasivo: (a) microcorte, (b) fratura, (c) fadiga e (d) arrancamento de grãos (Adaptado de: STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).	38
Figura 2.10 - Deformação da subsuperfície durante a passagem do “particulado” (Adaptado de: MOORE; DOUTHWAITE, 1978; CHALLEN; OXLEY, 1978).	40
Figura 2.11 - Geração de trincas na superfície e interior de sólidos frágeis (Adaptado de: MOORE; KING, 1980).	40
Figura 2.12 - Exemplo de deslocamento de material de um particulado (VINGSBO; HOGMARK, 1981).....	41
Figura 2.13 - Influência da morfologia dos carbonetos no processo de abrasão (XU, KENNON, 1991).....	42
Figura 2.14 - Riscos de desgaste sendo interrompidos por carbonetos de Nb na face de contato de um anel de Ferro Fundido (VATAVUK, 1994).....	43
Figura 2.15 - Processo de transferência de metal devido à adesão (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).	45
Figura 2.16 – Diagrama esquemático da formação de uma partícula de transferência adesiva (KAYABA; KATO; 1979)	48
Figura 2.17 – Deformação das asperidades em um contato adesivo (VINGSBO; 1979)	49
Figura 2.18 – Esquema da variação da perda de massa com a distância deslizada (HOLMBERG, 2001)	50
Figura 2.19 – Fluxo plástico da formação de uma partícula de desgaste (HUTCHINGS; 1992).....	51
Figura 2.20 – Modelo de desgaste por adesão (HUTCHINGS; 1992)	52
Figura 2.21 – Zonas da Teoria da Delaminação (HUTCHINGS; 1992)	53
Figura 2.22 – Cinética de oxidação do metal a baixa e alta temperatura (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001) ...	55

Figura 2.23 – Rápida oxidação de superfícies metálicas em contato a altas temperaturas (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001)	56
Figura 2.24 – Formação de partículas através da mistura de óxido e metal	58
Figura 2.25 - a) sistema sem lubrificação a seco com carga de 1N, b) sistema sem lubrificação com carga de 0,1N e c) sistema com lubrificação com carga de 1N (Hase; Mischina, 2009).....	61
Figura 3.1. Fluxograma esquemático do processo produtivo.....	63
Figura 3.2. Desenho esquemático do cdp's empregados nos ensaios de desgaste (a) disco e do (b) pino	64
Figura 3.3. Fluxograma das etapas experimentais	64
Figura 3.4 - Banco de ensaio de desgaste	68
Figura 3.5 – Suporte da célula de carga.....	69
Figura 4.1 - Microestrutura do material Ferro Fundido Cinzento MC 12 com aumento de (a) 100x (Grafitização) e (b) 500x com ataque de Nital 2% (% de Ferrita e % de Perlita).....	74
Figura 4.2 - Microestrutura do material Ferro Fundido Cinzento MC 13 com aumento de (a) 100x (Grafitização) e (b) 500x com ataque de Nital 2% (% de Ferrita e % de Perlita).....	74
Figura 4.3 - Microestrutura do Ferro Fundido Cinzento Centrifugado (pino) com aumento de (a) 100x (Grafitização) e (b) 500x com ataque de Nital 2% (% de Ferrita e % de Perlita).	75
Figura 4.4 - Taxa de desgaste do par FoFo Cinzento Centrifugado x FoFo Cinzento MC 12	76
Figura 4.5 - Taxa de desgaste do par FoFo Cinzento centrifugado x FoFo Cinzento MC 13	77
Figura 4.6 - Taxa de desgaste dos discos FoFo MC 12 x FoFo MC 13	78
Figura 4.7 - Taxa de desgaste dos pinos ensaiados contra (FoFo MC 12 e FoFo MC 13)	79
Figura 4.8 - Microscopia ótica (100x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13	81
Figura 4.9 - Microscopia eletrônica (100x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s	82
Figura 4.10 - Microscopia eletrônica (500x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s.....	83
Figura 4.11 - Microscopia eletrônica (500x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s.....	83
Figura 4.12 - Microscopia eletrônica (1000x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s.....	84
Figura 4.13 - Microscopia eletrônica (1000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s.....	84

Figura 4.14 - Microscopia eletrônica (5000x) discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s	85
Figura 4.15 – (a) Espectro do material MC 12 e (b) Espectro do material MC 13 a uma velocidade de 0,5 m/s.	86
Figura 4.16 - Microscopia eletrônica (5000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 0,5 m/s.....	86
Figura 4.17 - Microscopia eletrônica (100x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	87
Figura 4.18 - Microscopia eletrônica (500x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	87
Figura 4.19 - Microscopia eletrônica (500x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	88
Figura 4.20 - Microscopia eletrônica (1000x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	89
Figura 4.21 - Microscopia eletrônica (1000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	89
Figura 4.22 – Espectro da superfície dos pinos deslizados a 1,0 m/s contra os materiais (a) MC 12 e (b) MC 13.	90
Figura 4.23 - Microscopia eletrônica (5000x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	91
Figura 4.24 - Microscopia eletrônica (5000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s.....	91
Figura 4.25 - Microscopia eletrônica (100x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s.....	92
Figura 4.26 - Microscopia eletrônica (500x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s.....	93
Figura 4.27 - Microscopia eletrônica (500x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s	93
Figura 4.28 - Microscopia eletrônica (500x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s	94
Figura 4.29 - Microscopia eletrônica (1000x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s.....	94
Figura 4.30 – Espectro das partículas provenientes do desgaste (a) e dos pontos de oxidação (b)	95
Figura 4.31 - Microscopia eletrônica (1000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s.....	95

Figura 4.32 - Microscopia eletrônica (5000x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s..... 96

Figura 4.33 - Microscopia eletrônica (5000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,5 m/s..... 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Força de adesão de vários metais em contato com o Ferro em sistema de vácuo (BUCKLEY, 1981).....	44
Tabela 3.1 – Especificação da composição química dos materiais	65
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas.....	65
Tabela 3.3 – Características microestruturais.....	66
Tabela 3.4 - Parâmetros de teste (velocidade, carga e distância total deslizada)	70
Tabela 4.1 - Composição química dos materiais.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	- Atomic Force Microscopy
ASLE	- American Society Lubricants of Engineering
ASTM	- American Society for Testing Materials
COL	- Consumo de óleo
CCC	- Cúbica de Corpo Centrado
CFC	- Cúbica de Face Centrada
EDS	- Energy Dispersive Spectroscopy
FEG	- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FoFo	- Ferro Fundido
HB	- Dureza Brinell
HC	- Hexagonal Compacta
HV	- Dureza Vickers
ISO	- International Organization for Standardization
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
NOx	- Nitrogen Oxides
PVD	- Physical Vapour Deposition
OECD	- Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento

LISTA DE SÍMBOLOS

C_e	Carbono combinado	[1]
C_g	Carbono grafitico	[1]
C_t	Carbono total	[1]
E	Resistência relativa ao desgaste	[1]
mg	Miligramas	[1]
mN	Milnewtons	[1]
N	Newton	[1]
K^*	Coeficiente de desgaste	$mm^3 N^{-1} m^{-1}$
K	Taxa de desgaste	$mm^3 m^{-1}$
V	Volume	mm^3
μ	Força de atrito	[1]
P_y	Tensão de fluxo plástico do material	[Pa]
W	Carga aplicada	N
X	Distância deslizada	M
Γ	Tensão efetiva sobre o material	[Pa]
	Número de Summerfield ou espessura de óleo	[1]
Rpm	Rotações por minuto	[1]

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....</i>	<i>16</i>
<i>1.1 Objetivos Gerais.....</i>	<i>17</i>
<i>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>18</i>
<i>2.1 Tribologia.....</i>	<i>18</i>
2.1.1 Impacto econômico.....	19
2.1.2 Tribologia automotiva.....	20
2.1.3 Importância da tribologia nos motores a combustão.....	21
<i>2.2 Regime de lubrificação dos motores</i>	<i>22</i>
<i>2.3 Anel de pistão e suas características.....</i>	<i>23</i>
<i>2.4 Ferro Fundido</i>	<i>27</i>
2.4.1 Considerações Gerais.....	27
2.4.1.1 Tipos de Ferro Fundido.....	29
2.4.1.2. O Carbono nos Ferros Fundidos	29
2.4.2 Ferro Fundido Cinzento	30
<i>2.5 Fundamentos do desgaste</i>	<i>33</i>
2.5.1 Definição de desgaste	33
2.5.2 Processos de desgaste	33
2.5.3 Processo de desgaste por deslizamento.....	35
2.5.4 Desgaste por abrasão	37
2.5.4.1 Mecanismos do desgaste por abrasão	38
2.5.4.2 Resistência ao desgaste abrasivo de ferrosos	41
2.5.5 Desgaste por adesão	44
2.5.5.1 Adesão metal – metal.....	44
2.5.5.2 Efeitos da adesão entre as superfícies em desgaste.....	46
2.5.5.3 Formação e crescimento das junções adesivas.....	46
2.5.5.4 Deformação das asperidades e formação das partículas do desgaste	47
2.5.5.5 Mecanismo de desgaste por adesão em metais	49
2.5.6 Desgaste por fadiga	53
2.5.7 Desgaste por oxidação	54
2.5.7.1 Cinética do crescimento do filme de óxido em metais	55
2.5.7.2 Desgaste por oxidação em altas velocidades de deslizamento.....	56
2.5.7.3 Desgaste por oxidação em baixas velocidades de deslizamento	57
2.5.8 Mecanismo de desgaste em Ferro Fundido.....	58
<i>CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO</i>	<i>63</i>
<i>3.1 Corpos de prova.....</i>	<i>63</i>

<i>3.2 Especificações da composição química, propriedades mecânicas e características macroestruturais dos materiais dos corpos-de-prova.....</i>	<i>65</i>
<i>3.3 Análise química</i>	<i>66</i>
<i>3.4 Caracterização da microestrutura e das superfícies desgastadas.....</i>	<i>67</i>
3.4.1 Microscopia Óptica	67
3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	67
<i>3.5 Ensaio de desgaste.....</i>	<i>68</i>
3.5.1 Calibração do banco de ensaio de desgaste.....	70
3.5.3 Medidas de Desgaste	71
<i>CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	<i>73</i>
<i>4.1 Composição química</i>	<i>73</i>
<i>4.2 Caracterização da microestrutura</i>	<i>73</i>
<i>4.3 Resultados de desgaste</i>	<i>76</i>
4.3.1 Resultados da taxa de desgaste (mm ³ /m) dos pares tribológico Ferro Fundido Cinzento Centrifugado x Ferro Fundido Cinzento MC 12 e Ferro Fundido Cinzento Centrifugado x Ferro Fundido Cinzento MC 13.....	76
4.3.2 Resultados comparativos entre os discos MC 12 e MC 13 dos pares tribológicos Centrifugado/ MC 12 e Centrifugado/ MC 13.....	77
4.3.3 Resultados comparativos entre os pinos de FoFo Centrifugado ensaiados contra os materiais MC 12 e MC 13.....	79
<i>4.4 Resultados das observações microscópicas das superfícies desgastadas</i>	<i>80</i>
<i>4.5 Considerações gerais sobre a análise microscópica das superfícies desgastadas dos materiais MC 12, MC 13 e centrifugado</i>	<i>97</i>
4.5.1 Influência da velocidade no desgaste por deslizamento.....	97
4.5.2 Transferência de material e geração de particulados	98
<i>4.6 Mecanismo de Desgaste</i>	<i>99</i>
<i>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....</i>	<i>100</i>
<i>CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>100</i>
<i>ANEXO</i>	<i>109</i>

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Ferro Fundido é amplamente utilizado na indústria de autopeças do setor automobilístico, principalmente em: anéis de pistão, camisa de cilindros, discos de freios e outros, devido a sua boa resistência ao desgaste e condutividade térmica, além de ser antivibracional e ter boa resistência ao atrito.

Com a globalização, grandes esforços vêm sendo feitos por pesquisadores, direcionados ao desenvolvimento de novos materiais que atendam as exigências dos mercados mundiais. A globalização trouxe aos olhos dos pesquisadores a necessidade de novos desenvolvimentos que permitam ao mundo novos caminhos, aprimorando técnicas e produzindo novos materiais. Com esse fenômeno, vieram também novas implicações às indústrias, tais como a competitividade necessária na busca de processos de fabricação e pesquisas, objetivando redução de custos, qualidade e produtividade, (LANNA et al., 2004), sendo que no ramo automobilístico a realidade não é diferente.

O desenvolvimento de combustíveis alternativos (álcool e Biodiesel), juntamente com o avanço da tecnologia da injeção eletrônica tem possibilitado o aumento da potência específica dos motores, tornando possível reduzir o peso e o tamanho, além de contribuir para um melhor desempenho.

Essas tendências têm levado a um aumento constante dos carregamentos térmicos e mecânicos nos componentes de motores. Como consequência, o desgaste desses componentes tende a aumentar e a compreensão do seu comportamento tribológico ao longo da vida do motor é necessária. Atualmente, boa parte dos trabalhos de desgaste de anéis está focada no desenvolvimento de novas coberturas mais resistentes ao desgaste (FERRARESE, 2004).

O sistema tribológico do anel de pistão é dos mais complexos: envolve superfícies não conformes, cargas e velocidades variáveis, atrito hidrodinâmico e misto, presença de partículas abrasivas, substâncias corrosivas resultantes da combustão e paradas e partidas do motor. Todos estes fatores afetam o desgaste do anel. A geometria e a rugosidade das superfícies atritantes modificam-se com o

desgaste e estas modificações por sua vez alteram a taxa e eventualmente os mecanismos de desgaste (TOMANIK, 2000).

1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento tribológico através do teste de bancada pino-disco dos pares ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC13 em função da velocidade de deslizamento.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o comportamento tribológico por meio da taxa de desgaste dos pares ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13 em função da velocidade de deslizamento: 0,5; 1,0 e 1,5 m/s;
- Avaliar as taxas de desgaste obtidas e determinar o par tribológico de melhor desempenho em função da velocidade de deslizamento;
- Analisar as superfícies desgastadas dos materiais por meio de microscopia eletrônica de varredura;
- Identificar e determinar quais os mecanismos de desgaste atuantes nas superfícies dos pares tribológicos em cada velocidade de deslizamento;

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tribologia

A palavra tribologia é derivada das palavras grega TRIBOS que significa atrito, e LOGOS que significa estudo, de forma que uma tradução literal significa “Estudo do Atrito”, ou a ciência que estuda o Atrito. Tribologia é definida como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas” (STOETERAU, 2004).

A palavra tribologia, em sua atual conotação, surgiu pela primeira vez na Inglaterra, em 1966, em um relatório do Departamento de Educação e Ciência. Embora a palavra seja nova, o assunto a que se refere não o é, incluindo os tópicos relativos ao atrito, desgaste e lubrificação. A invenção da roda ilustra bem a preocupação do homem em reduzir o atrito nos movimentos de rotação e consequentemente de translação, e essa invenção é anterior a qualquer registro histórico existente. A necessidade de nosso envolvimento com problemas tribológico de atrito e desgaste é perfeitamente justificável, pois esses fenômenos afetam quase todos os aspectos de nossa vida, e não estão restritos somente as máquinas que usamos.

Desde o início do século XX, impulsionados pela demanda industrial, nosso conhecimento em todas as áreas da tribologia expandiu-se enormemente. Neste contexto, os mancais de elementos rolantes baseados em esferas que surgido em aplicações industriais por volta de 1700, alcançaram uma eficiência incomum. Eles são encontrados em uma ampla gama de tamanhos e oferecem, atualmente, uma solução muito econômica e flexível para muitos problemas de projeto tribológicos. Princípio esse que desde os fins da década de 20 do século passado tem sido estendido ao movimento de translação através das guias lineares. Desenvolvidos na qualidade e características de serviço de lubrificantes em muito colaboraram para a solução de problemas tribológicos, mas o ritmo de nossa sociedade industrial exige maiores velocidades, cargas e precisões, muitas vezes em ambientes tão hostis como reatores

nucleares e em veículos espaciais, necessitando de desenvolvimentos adicionais no assunto (STOETERAU, 2004).

Atualmente, considera-se normal que um motor de carro dure cerca de 150.000 quilômetros, enquanto a menos de 25 anos atrás a vida esperada era de somente 1/3 deste valor. É interessante salientar, também, que um carro moderno contém acima de 2.000 contatos tribológicos, de modo que não é surpreendente que a tribologia seja um assunto de importância crescente para os engenheiros. A tribologia apresenta diferentes interesses nas diversas áreas do conhecimento tecnológico, com uma série de disciplinas científicas se ocupando de problemas tribológicos, tais como:

- a) a Ciência dos Materiais, com o desenvolvimento de materiais tribológicos especiais;
- b) a Química, com o estudo de lubrificantes, aditivos e problemas de camada limite;
- c) a Física, com estudos de novos materiais e processos de revestimentos, e estudo do atrito no nível atômico / quântico;
- d) a fabricação, com estudo da qualidade de superficial proveniente da fabricação e suas relações com a tribologia;
- e) a metrologia, com a qualificação superfícies tribológicas e a automação de sistemas;
- f) o projeto, com a aplicação de superfícies tribológicas;
- g) a automação, com o estudo da influência do atrito em sistemas de controle, entre outras.

2.1.1 Impacto econômico

O significado econômico da tribologia é tão evidente que mereceria poucos comentários. Entretanto, com a economia obtida em casos individuais é muito pequena, a importância da aplicação de melhorias nas práticas tribológicas não é suficientemente compreendida. É devido a enorme quantidade de contatos tribológicos nas máquinas que uma pequena economia em cada um deles permitirá alcançar somas

significativas para uma nação. Basta lembrar que cerca da metade da energia produzida no mundo é utilizada para vencer o atrito, o que permite deduzir que melhores projetos tribológicos têm significado considerável no futuro da própria humanidade (STOETERAU, 2004).

Por esse motivo, os governos das sociedades industrializadas têm dado ênfase crescente nos aspectos econômicos da tribologia, tornando-se ainda mais relevante com a preocupação ecológica surgida nos anos 90 do mesmo século, onde o petróleo e a indústria automobilística estão enfrentando uma difícil competição internacional, regulamentações internacionais e rápidas mudanças tecnológicas (ANDERSSON, 1991; BOOKER, 1965).

Regulamentações governamentais requerem uma melhora na economia de combustíveis e menores emissões de gases e sistemas lubrificantes. Óleos com alta energia de conservação e veículos mais econômicos têm tido uma grande importância na preservação dos recursos naturais e na diminuição do atrito dos componentes (BOOKER, 1969; DOWSON, 1991).

Segundo o Workshop conduzido pelo Departamento de Energia dos EUA, a redução do atrito e do desgaste em componentes de motores e componentes de transmissão pode levar a economia americana a economizar U\$120 bilhões/ ano (FESSLER, 1999).

2.1.2 Tribologia automotiva

Segundo Tung e McMillan (2004), na indústria automobilística existem centenas de componentes tribológicos, são eles: bronzinas, anel - pistão, transmissões, embreagens e etc. A aplicação dos princípios tribológicos é essencial para a confiabilidade dos veículos a motor, e a área de tecnologia **powertrain** tem obtido enormes avanços no campo da tribologia.

O mecanismo de combustão interna de um motor é o mais importante mecanismo dos veículos a motor, podendo ser encontrado tanto em veículos terrestres (motos, carros, caminhões, trens e máquinas de construção civil) como em transportes marítimos, barcos e navios. A popularidade dos motores à combustão é devido ao seu

desempenho, confiabilidade e versatilidade. No entanto, eles também possuem algumas desvantagens, tais como: eficiências térmicas e mecânicas relativamente baixas, com grande parte da energia do combustível sendo dissipada através da perda de calor e fricção. Motores de combustão interna são também contribuintes de poluição atmosférica através da emissão de hidrocarbonetos, particulados e óxidos de nitrogênio (NO_x).

2.1.3 Importância da tribologia nos motores a combustão

Aos estudiosos da tribologia dos motores é requerido atingir, entre todos os componentes móveis do motor uma lubrificação mais efetiva, para reduzir atrito e desgaste, com mínimo impacto ao meio ambiente. A tarefa é particularmente muito difícil, uma vez que as condições de operação dos motores, velocidade, carga e temperatura são muito amplas.

Melhorias no desempenho tribológico dos motores podem levar a vários benefícios:

- a) Aumento da potência dos motores;
- b) Redução do consumo de combustível;
- c) Redução nas emissões de gases;
- d) Melhoria na durabilidade, confiabilidade e vida dos motores;
- e) Redução das manutenções e aumento nos intervalos de serviços.

Com uma grande quantidade de sistemas em serviço, pequenas melhorias na eficiência dos motores, níveis de emissão e durabilidade podem ter maior efeito na economia mundial e no meio ambiente a longo tempo.

Em artigos publicados por Andersson (1991) e Canale (2005), perdas por atrito chegam a 40% da energia desenvolvida em um motor, sendo que de 40 a 50% das perdas de energia por atrito são atribuídas ao pistão e o sistema de anéis de pistão.

Já em válvulas, transmissões e marchas, aproximadamente 60% do total das perdas ocorrem por atrito (NAKASA, 1995).

2.2 Regime de lubrificação dos motores

Vários sistemas **powertrain** são designados a operar com um líquido lubrificante, sendo o principal parâmetro tribológico, em um sistema **powertrain**, a espessura do filme lubrificante separando a interação das superfícies em contato.

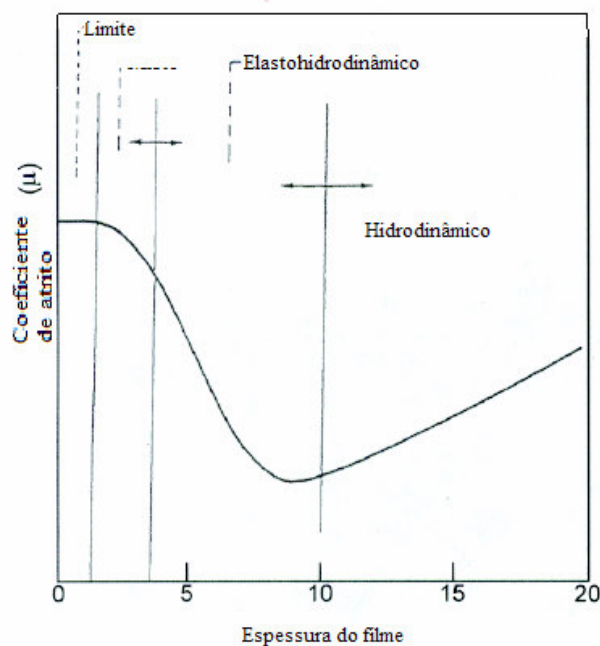


Figura 2.1 - Regime de lubrificação dos componentes de motores e suas correlações com a fricção (CANALE, 2005).

A Figura 2.1 mostra um gráfico que relaciona o coeficiente de fricção e a espessura do filme de óleo (= viscosidade x velocidade/carga), como exemplo de lubrificação de duas superfícies que estão em movimento relativo uma em relação à outra e que estão separadas por um filme de óleo.

Na situação “Limite” encontra-se as superfícies em contato, com alto coeficiente de atrito e baixa espessura do filme de lubrificante. No estado de lubrificação “elastohidrodinâmico” o filme do fluído passa a separar as superfícies, ocorrendo o contato parcial ou intermitente. E no estado hidrodinâmico, cada superfície estará separada por um filme de lubrificante.

Diferentes componentes automotivos exibem diferentes modos de lubrificação para atingir um desempenho aceitável, e cada um pode experimentar mais de um regime de lubrificação durante um ciclo simples. Geralmente, bronzinas são

designadas para operar sobre regime de lubrificação hidrodinâmica em que cada superfície da bronzina esta separada por um filme lubrificante. O contato metal – metal é esperado somente em baixa velocidade e altas cargas e com lubrificantes de baixa viscosidade.

Em contraste, anéis de pistão geralmente deslizam sobre condições de lubrificação “mista” e “limite”, ocorrendo contato entre as superfícies, e filmes químicos ou produtos de reações podem ser importantes na proteção das superfícies. A importância dos diferentes regimes de lubrificação para cada componente de motor pode mudar com a rugosidade da superfície na interface, desgaste das superfícies em contato e degradação do lubrificante (TUNG; McMILLAN, 2004).

2.3 Anel de pistão e suas características

O coração dos motores de combustão interna é a montagem dos anéis, formando uma crítica ligação em transformar a energia gerada pela combustão do combustível e a mistura de ar em energia cinética. O componente anel de pistão é definido pela ISO 6621-1984 como sendo uma peça metálica de determinada forma que, quando confinada em um cilindro, aplica uma força de vedação contra a parede do mesmo, como pode ser observado na Figura 2.2. Os anéis possuem sua definição de acordo com suas respectivas posições nas canaletas do pistão, o que pode ser visto na Figura 2.3.

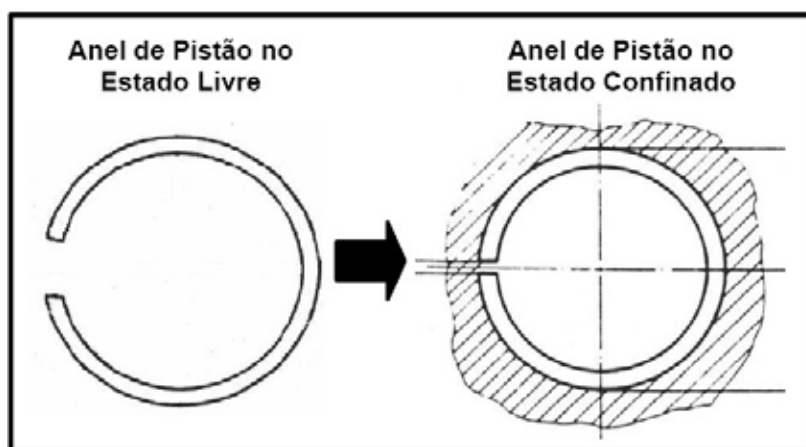


Figura 2.2 – Representação do anel de pistão (FERRARESE, 2004).

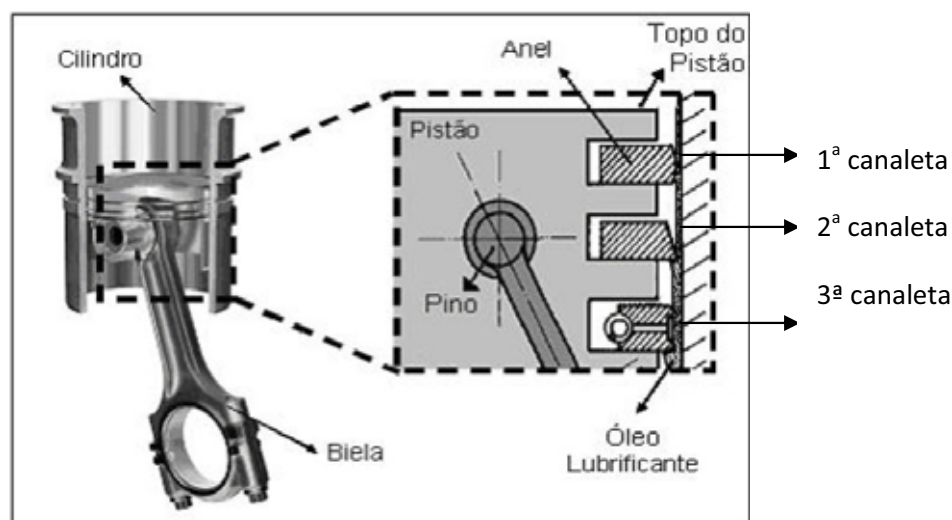


Figura 2.3 - Célula de potência típica (FERRARESE, 2004)

Os anéis acompanham o movimento alternado do pistão, exercendo uma ação de raspagem na parede do cilindro. O contato anel-cilindro é lubrificado, porém existem situações durante o trabalho do anel tais que, no seu deslizamento sobre o cilindro, o filme de óleo lubrificante fica muito fino. Como exemplos dessa situação, citam-se as zonas de inversão do movimento do pistão. Assim, o contato anel-cilindro ocorre sob um regime de lubrificação mista, no qual parte da carga de vedação do anel contra o cilindro é suportada pelo contato metal – metal (localizado nas rugosidades), como pode ser observado na Figura 2.4 e parte é suportada pela ação hidrodinâmica do óleo lubrificante.

As principais funções do anel de pistão são:

- a) Vedar a câmara de combustão, minimizando a passagem de gases provenientes da combustão para o cárter (**Blow-by**);
- b) Extrair o calor do pistão, impedindo a sobrecarga térmica;
- c) Controlar o filme de óleo entre o anel e a parede do cilindro, minimizando a quantidade extraída do sistema – queimada ou arrastada (Consumo de Óleo Lubrificante – COL).

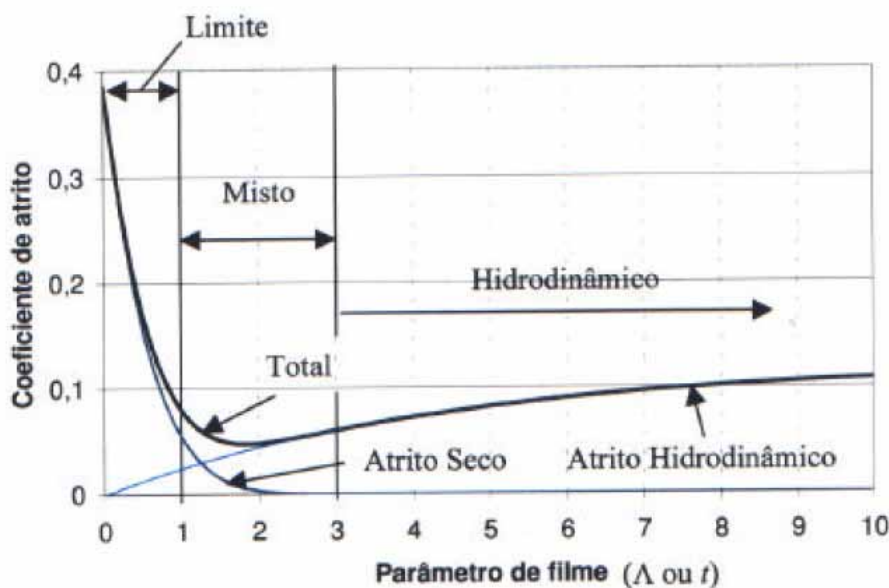


Figura 2.4 - Curva de Stribeck (FERRARESE, 2004)

Além das funções especificadas, outros requisitos são importantes ao pacote de anéis, sendo eles: durabilidade, baixas perdas por atrito e baixa carbonização. No caso da durabilidade, é exigido dos anéis que mantenham o desempenho do motor quanto a **Blow-by** e COL dentro dos limites determinados para o sistema quando ao longo de sua vida. Parte da durabilidade do motor está associada à durabilidade do pacote de anéis, tornando necessário o conhecimento tribológico dos componentes.

Os três anéis normalmente presentes no pistão têm desempenhos diferenciados para o cumprimento das funções descritas. Os anéis de primeira canaleta são os mais carregados em termos mecânicos e térmicos, como mostrado na Figura 2.5, uma vez que ele está exposto ao calor proveniente da combustão e a pressão de combustão ao longo do ciclo, o que leva esse tipo de anel a uma condição pouco favorável no caráter tribológico, sendo necessário sempre um tipo de cobertura ou tratamento superficial especial (PVD, Cromo, Metalização e etc) em sua face de contato com o cilindro, visando minimizar o desgaste. O material base desse anel também é especificado dentre os materiais de maior resistência estrutural aplicados a anéis de pistão, normalmente, ferro fundido nodular ou aço (classes 50 e 60), segundo ISO 6621-3-1984, Figura 2.6.

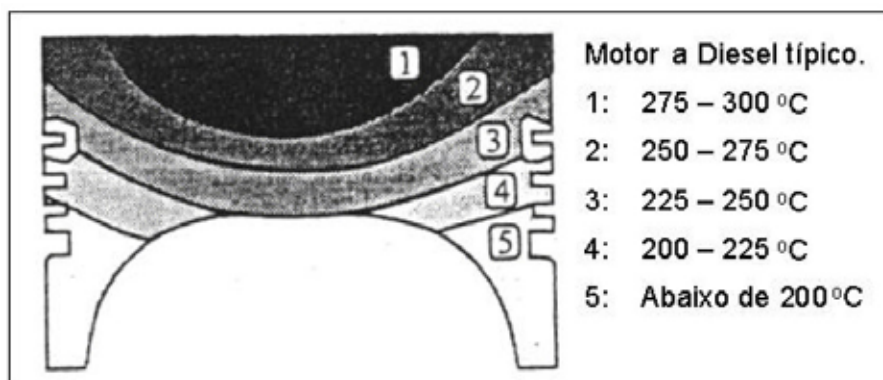


Figura 2.5 - Distribuição típica da distribuição de temperatura de um pistão de motor Diesel (FERRARESE, 2004)

Tabela ISO 6621 - 3				
Sub classe	Microestrutura	Estabilidade de térmica	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
MC12	Perlítica	12% max	90.000	350 min
MC13	Perlítica		100.000	390 min
MC21	Martensítica		115.000	470 min
MC22	Martensítica		115.000	470 min
MC24	Martensítica	12% max	115.000	500 min
MC25	Martensítica	12% max	130.000	650 min
MC32	Martensítica	12% max	145.000	500 min

Figura 2.6 – Tabela de materiais (ISO 6621-3)

Já os anéis de segunda canaleta são denominados anéis raspadores, eles têm esse nome, pois sua função é raspar o excesso de óleo deixado na parede do cilindro. Esse tipo de anel possui coberturas ou tratamento especiais/superficiais menores do que os anéis de primeira canaleta, mas suas condições tribológicas não são tão mais favoráveis assim. Pode se utilizar dois tipos de materiais para anéis de segunda canaleta, ferro fundido cinzento martensítico para aplicações e condições mais severas (classe 30 da norma ISO 6621-3 1984) ou ferro fundido cinzento perlítico (classes 10 e

20 da norma ISO 6621-3-1984) para aplicações menos severas, materiais esses, focos do presente trabalho.

O anel de terceira canaleta, chamados de anel de óleo, tem como principal função o controle do filme de óleo na parede do cilindro. Para esse tipo de aplicação são utilizados os anéis designados 2 ou 3 peças. Em ambos existe um elemento expensor responsável por prover a força de vedação do anel. Para resistir ao desgaste, o anel de terceira canaleta possui normalmente uma cobertura ou um tratamento nas suas faces de contato, sendo comuns como materiais base para esses anéis o ferro fundido nodular (classe 50), ferro fundido cinzento perlítico (classes 10 e 20) e aço classe 60, (FERRARESE, 2004).

2.4 Ferro Fundido

2.4.1 Considerações Gerais

O ferro existe na natureza geralmente sob forma de óxidos, nos minérios de ferro, dos quais é extraído quase sempre por meio de um forte aquecimento em presença de coque ou carvão madeira, em fornos adequados, nos quais o óxido é reduzido e o ferro resultante ligado ao carbono. Forma-se assim uma liga de ferro e carbono que, depois de refinada, constitui a matéria prima para a fabricação da grande maioria das peças metálicas atualmente empregadas, uma vez que seu preço de custo é relativamente baixo e suas propriedades mecânicas interessantes. Sua obtenção é através da fase líquida, isto é, são elaborados na fase de fusão (COLPAERT, 2009).

A composição básica do ferro fundido é formada por: carbono (1,7% a 6,7%) e ferro (balanço), elementos como manganês, silício, fósforo e enxofre são encontrados em porcentagens quase sempre pequenas e são considerados impurezas normais. No diagrama de fases (Figura 2.7) pode se observar que, para teores crescentes de carbono, é cada vez mais baixa a temperatura necessária para a fusão completa do produto até 4,3%. Além desse limite, a referida temperatura se eleva de novo, à medida que o teor de carbono continua aumentando. A liga com 4,3% é a mais fusível de todas, razão pela qual é dado o nome de “eutética” que quer dizer bem fusível. Os

ferros fundidos com menos de 4,3% chamam-se hipoeutéticos e os com mais de 4,3% de hipereutéticos.

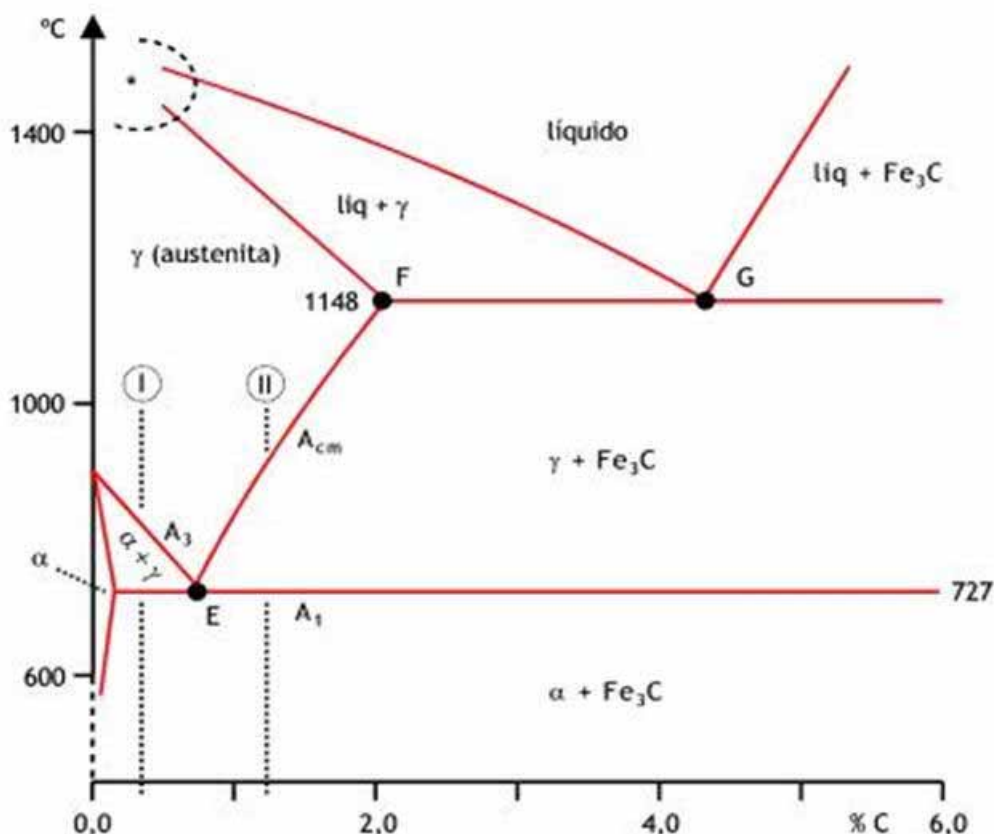


Figura 2.7 – Diagrama de fase do sistema Fe-C

Juntamente com o aço, o ferro fundido constitui a quase totalidade dos produtos siderúrgicos industrialmente utilizados. Em ligas Ferro – Carbono, quanto maior o teor de carbono, mais dura é a liga e maior a dificuldade de trabalhá-la a frio ou a quente.

O aço pode ser empregado em barras, chapas, eixos, trilhos, parafusos, numerosas peças de máquinas e de motores, engrenagens, rolamentos, vergalhões, ferramentas e etc., pois pode ser deformado a frio e a quente. Já o ferro fundido, não pode ser deformado a quente ou a frio, pois se romperia, as peças com ele fabricadas são diretamente moldadas na sua forma definitiva. O acabamento das peças é feito retirando o material em excesso no torno, na plaina, no esmeril, a lima, à broca, etc. Estas operações oferecem maior e menor dificuldade, conforme a dureza do ferro

fundido; habitualmente, porém, o ferro fundido empregado é de um tipo chamado cinzento, que não é muito duro (COLPAERT, 2009).

Como sua resistência é menor que a do aço, principalmente ao choque, é o ferro fundido empregado em peças de menor responsabilidade ou sujeitas a tensões mais moderadas. Em virtude de ser um material mais barato que o aço, é ele preferido também para a construção de bases, suportes e arcabouços de máquinas e muitos dos seus pertences, como volantes, engrenagens pesadas, mancais e etc., e em numerosas peças que atuam mais pelo seu peso do que pela sua resistência.

2.4.1.1 Tipos de Ferro Fundido

Atualmente podemos encontrar os seguintes tipos de ferro fundido:

a) Ferro Fundido lamelar ou Cinzento: ferro fundido sob forma de grafita, cujo aspecto da fratura é escuro;

b) Ferro Fundido Nodular: ferro fundido com as grafitas precipitadas em forma de nódulos;

c) Ferro Fundido Branco: é o ferro fundido na qual o carbono está na forma combinada, com fratura de aspecto claro e esbranquiçado;

d) Ferro Fundido Vermicular: Material que combina as características do ferro fundido nodular e do ferro fundido cinzento, com estrias grossas de grafita.

2.4.1.2. O Carbono nos Ferros Fundidos

O carbono pode existir nestes materiais sob duas formas diferentes:

a) Carbono combinado (Fe_3C , cementita);

b) Carbono grafítico (grafita).

Quando se fala do teor de carbono de um ferro fundido, entende-se carbono total, isto é, o carbono combinado mais o carbono grafítico, conforme equação (2.1).

$$C_t = C_e + C_g \quad (2.1)$$

Em que: C_t = carbono total, C_e = carbono combinado e C_g = carbono grafítico (COLPAERT, 2009).

2.4.2 Ferro Fundido Cinzento

Como mostrado no item 2.4.1.1, existem vários tipos de ferro fundido, no entanto, no presente trabalho será apresentado detalhes da classe ferro fundido cinzento, material base dos corpos de prova do disco e do pino.

O ferro fundido cinzento possui essa designação, pois quando parte do carbono está sob forma de grafita, conferindo assim um aspecto escuro a fratura do material. Como citado anteriormente, além de ferro e carbono, outros elementos tais como: silício, manganês, enxofre, fósforo, etc., constituem o ferro fundido, onde alguns podem ser encontrados em proporções mais elevadas do que aquelas encontradas habitualmente nos aços comuns. Esses elementos, em presença de teores também mais baixos de carbono, exercem notável influência sobre a textura e as propriedades dos ferros fundidos, por que, é de suas proporções que muito depende se haverá ou não formação de grafita e, portanto, se será branco ou cinzento o produto resultante.

O silício é, depois do carbono, o elemento mais importante para ferros fundidos. Ele favorece a decomposição da cementita em ferro e grafita por isso a ele se recorre quando se quer que o produto seja cinzento. O silício forma solução sólida com a ferrita e por essa razão não pode ser detectado ao microscópio.

O manganês tem ação contrária a do silício, pois dificulta a decomposição da cementita. Seu principal papel no ferro fundido comum é neutralizar a ação do enxofre, formando com este MnS (Sulfeto de manganês). O Mn excedente combina com o carbono (Mn_3C), que entra em solução na cementita.

O fósforo, quando em teores normais, não desempenha um papel preponderante; em teores elevados (acima de 0,25%), contribui para a fragilidade e atua como estabilizador da cementita, por obstar-se à sua difusão. Contudo, sua presença é, às vezes, desejada por aumentar a fluidez do metal líquido. O fósforo forma com o ferro um constituinte denominado “steadita”, cujo aspecto duro fornece maior resistência ao desgaste quando distribuído uniformemente pela matriz.

Elementos como Mo, Cr, V, Ni, Nb e outros são responsáveis por conferir melhores propriedades mecânicas ao ferro fundido, tais como: resistência ao desgaste (formação de carbonetos XC), aumento do módulo de elasticidade e ruptura (COLPAERT, 2009).

Explicar a forma com que a microestrutura do fundido cinzento é formada é muito difícil, não só pela variedade de texturas que se apresentam e complexidade dos fenômenos que intervêm, como também por ser ainda deficiente o que se sabe de positivo acerca das leis que regem a grafitação. A grafita pode originar-se a diversas temperaturas: I) durante a formação dos cristais de cementita dos ferros fundidos hipereutéticos; II) durante a formação do fundo de cementita do eutético; III) durante a precipitação da cementita na austenita; IV) diretamente da austenita, pela grafitação do carbono em solução (abaixo de 1130 °C) e V) da cementita da perlita, em torno de 700 °C (COLPAERT, 2009).

No caso I a grafita se forma, por assim dizer, ainda em meio líquido, nos casos II e III ela se origina na superfície de contato entre a cementita e a austenita; no caso IV o aparecimento dos núcleos de grafitação se dá junto às inclusões, especialmente de sulfetos de manganês, e, no caso V a formação de grafita é muito lenta e provavelmente se inicia na separação entre a cementita e a ferrita.

A grande importância que se presta à questão da grafita provém do fato das propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos dependerem em grande parte da forma, dimensão, quantidade e distribuição desse elemento.

A American Society for Testing Materials (ASTM) classifica as grafitas encontradas em ferros fundidos cinzentos em cinco principais formas, designadas A, B, C, D e E, como observado na Figura 2.8. A instituição decidiu classificar também as grafitas por comprimento médio dos veios de grafita em oito tamanhos, numerados de 1 a 8, podendo ser observadas ao microscópio em forma de veios ou em partículas vermiformes.

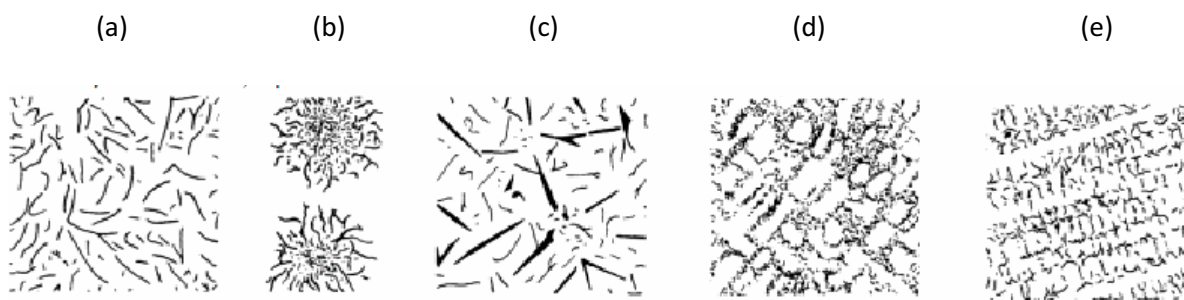


Figura 2.8 - Tipos de grafita segundo a ASTM a) Tipo A, b) Tipo B, c) Tipo C, d) Tipo D e e) Tipo E
(COLPAERT, 2009)

- A grafita se desenvolverá em veios se a velocidade de crescimento for maior que a velocidade de formação de novos veios. Os veios se desenvolverão a esmo (tipo A) se o espaço interdendrítico for suficiente, o que ocorre nas ligas mais próximas do eutético. Nas ligas mais afastadas, portanto mais baixas em carbono, o espaço interdendrítico, que sobra para o eutético solidificar-se, limita-se a estreitos corredores entre os ramos de dendritas. Os veios que aí se formam seguem orientação interdendrítica (tipo E). Esta textura só é bem visível nos pontos onde a superfície examinada secciona as dendritas axialmente.

- Será do tipo de partículas vermiformes, quando a rapidez com que se formam novos núcleos de grafitização é tal que o meio se exaure de material grafitizável, antes que cada partícula possa tomar um desenvolvimento apreciável. Todo o eutético que possui esse tipo de grafitização revelará grafitas com aspecto tipo D.

Quando a composição química e outros fatores ainda mal conhecidos, fazem com que haja certo equilíbrio entre as tendências citadas nos itens a e b, ocorre uma coexistência e pode-se notar então a formação do tipo B que apresenta em cada núcleo de solidificação eutético uma área com grafita, em partículas vermiformes, circundada por veios em disposição aproximadamente radial, dando ao conjunto um aspecto de roseta.

Parece que a formação de grafita, neste caso, muito sensível à velocidade de resfriamento; o resfriamento lento favorecendo o desenvolvimento de veios e o rápido, à formação de partículas vermiformes. Estas são as primeiras a se formarem em cada centro de solidificação do eutético, mas como a solidificação é um fenômeno

exotérmico, o calor desenvolvido é suficiente para estimular a formação de grafita em veios, que então prossegue em torno de cada núcleo. Encontra-se frequentemente este tipo de grafitização nas proximidades da superfície de peças fundidas, passando gradualmente ao tipo de veios (tipo A) mais para o centro, onde o resfriamento foi mais lento.

Nos ferros fundidos hipereutéticos, com maior tendência a grafitização, a grafita inicia-se antes do eutético solidificar. Esta grafita tem, neste caso, plena liberdade para desenvolver-se e pode-se então observar veios muito maiores do que os formados na solidificação do eutético, estes últimos são encontrados, e seu conjunto constituem o tipo C (COLPAERT, 2009).

2.5 Fundamentos do desgaste

2.5.1 Definição de desgaste

Dentre as várias definições de desgaste podemos citar:

- a) DICIONÁRIO: “enfraquecimento pelo uso”.
- b) Pela ASLE: “remoção de material por ação mecânica”.
- c) Pela OECD: “perda progressiva de substância da superfície de um corpo em operação, ocorrendo como resultado de movimento relativo na superfície”.

Tais definições, no entanto não são precisas, uma vez que o fluxo plástico pode ocorrer, e que todas as definições são aproximadas e algumas imprecisões ocorrem. Atualmente, pode-se adotar a definição como: “remoção não necessária de material por ação química ou mecânica”, como a mais representativa (CRNKOVIC, 2004).

2.5.2 Processos de desgaste

Desgaste raramente é catastrófico, mas reduz a eficiência de operação e aumenta a perda de potência, consumo de óleo e a taxa de reposição dos componentes. Desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, mas uma característica do sistema. Qualquer mudança de carga, velocidade, ou ambiente, por exemplo, pode causar uma mudança drástica na taxa de desgaste de uma ou ambas as superfícies em contato

(CZICHOS, 1974). Uma ampla variedade de condições pode causar o desgaste, com vários mecanismos contribuindo para causar o dano. A solução para um problema particular requer uma identificação precisa da natureza do problema, evitando-se assim a aplicação de soluções gerais para problemas individuais. Em alguns casos, aumentar a dureza não reduzirá o desgaste, já em outros o oposto pode ser verdadeiro.

De acordo com (EYRE, 1976) existem diversas classificações para os mecanismos de desgaste, sendo elas:

a) Processo de desgaste por abrasão: É definido como desgaste por retirada de material, causado por protuberâncias duras ou partículas duras.

b) Processo de desgaste por deslizamento: É definido como desgaste por transferência de material de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido à formação de junções na fase sólida. As junções adesivamente formadas são cisalhadas e parte do material menos resistente é transferido ou pode permanecer entre as superfícies como resto de desgaste.

c) Processo de desgaste por erosão: É definido como sendo a perda de material de uma superfície sólida, devido ao movimento de impacto.

d) Processo de desgaste químico: É definido como sendo o desgaste em que as reações química ou eletroquímica com o meio predominam.

e) Processo de desgaste por fadiga: É definido como sendo a remoção de material da superfície, proveniente da variação cíclica da carga.

Desgaste, no entanto, raramente é resultado de um só mecanismo. Há situações em que um tipo de mecanismo muda para outro, ou quando dois ou mais tipos de mecanismos ocorrem simultaneamente. Isso é possível, por exemplo, para a produção de fragmentos ou partículas em desgaste por adesão causando desgaste por abrasão.

Para anéis, o desgaste pode ser “adesivo” (PINT; SCHOCK, 2000), micropolimento (HILL et al., 1996) ou adesivo durante o amaciamento seguido de abrasão e corrosão durante o uso (BARBER; LUDEMA, 1987). É comum encontrarmos também termos como: desgaste por deslizamento e desgaste oxidativo na literatura.

Os principais mecanismos de desgaste dos anéis de pistão, segundo (VATAVUK, 1994) são:

- a) Desgaste por abrasão;
- b) Desgaste por corrosão;
- c) Desgaste por fadiga de contato;
- d) Desgaste por adesão.

2.5.3 Processo de desgaste por deslizamento

O processo de desgaste por deslizamento é um dos principais processos de desgaste. Esse processo de desgaste é motivo de um grande número de estudos, e uma teoria perfeita sobre o assunto ainda deve ser definida segundo Holm (1946) e Regney (1997).

Esse tipo de desgaste pode ser definido pelo desgaste ocorrido quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra, sendo favorecidas por uma superfície limpa, condições não oxidativas, e pelas condições químicas e similaridades estruturais entre os pares deslizados. Normalmente, em aplicações práticas, as superfícies de deslizamento são lubrificadas, utilizando-se então o termo *Desgaste por deslizamento lubrificado*. Já em algumas aplicações de engenharia, investigações no laboratório e etc., superfícies deslizam sem lubrificantes, resultando no desgaste chamado *Desgaste por Deslizamento seco* (HUTCHINGS, 1992).

Em geral, quando 2 corpos lubrificados deslizam entre si, o óleo existente na região de contato desenvolve pressões hidrodinâmicas que mantém as superfícies separadas. Sob certas condições (baixas velocidades, por exemplo), essas pressões não são suficientes para manter essa separação e parte da carga é suportada pelo contato

das asperezas existentes nas superfícies. As asperezas em contato se deformam e se desgastam por um processo de fadiga ou por arrancamento. O desgaste das asperezas geralmente produz uma superfície polida, o que melhora as condições hidrodinâmicas (TOMANIK, 2000).

Já o termo desgaste por adesão é usado às vezes para descrever o desgaste por deslizamento, mas isso pode ser enganoso, já que a adesão exerce um importante papel no desgaste por deslizamento, mas é somente uma parte dos processos químicos e físicos envolvidos. Outros termos são associados a um desgaste por deslizamento mais severo, são eles: **Scuffing**, **Scoring** e **Galling**.

Scuffing refere-se à superfície danificada associada à solda no estado sólido das superfícies em contato. O termo é frequentemente usado para descrever um colapso do lubrificante, usualmente em altas velocidades de deslizamento .

HUTCHINGS (1992) descreve que o **scuffing** em sistemas lubrificados é de grande importância prática, desde que não gere altas taxas de desgaste e fricção. A primeira evidência de que o **scuffing** está ocorrendo é quando a temperatura da superfície encontra seu valor crítico, causando possivelmente alterações nas propriedades do lubrificante deixando a superfície mais exposta.

Na área automotiva **scuffing** significa um desgaste excessivo, com transferência de material entre os pares atritantes e nítido aumento da rugosidade. Em português, é geralmente denominado de “engripamento”, por que, em ocorrência no campo, o pistão não consegue mais se mover e o motor trava. Em dinamômetro, em geral, consegue-se interromper o ensaio antes do travamento total (TOMANIK, 2000).

Scoring é usado às vezes como sinônimo de **scuffing** e ambos os termos podem também implicar arranhamento por partículas abrasivas.

Galling representa uma forma mais severa de **scuffing**, devido a soldas locais, e é associada com danos grosseiros na superfície. A palavra também se refere a danos resultantes de deslizamento não lubrificado a baixas velocidades, caracterizado por superfícies severamente rugosas e transferência de grandes fragmentos de material. **Galling** pode ocorrer em sistemas lubrificados quando o filme de lubrificante é quebrado, e pode ser acompanhado por desgaste excessivo das superfícies e conseqüente falha do sistema de deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

É preciso ressaltar que o desgaste dos anéis de pistão ocorre prioritariamente sob deslizamento lubrificado. O mecanismo de desgaste por adesão é predominante em sistemas de contato não lubrificados, o que não corresponde ao sistema de contato do anel de pistão, mas sim a proposta de estudo do presente trabalho. Geralmente, a falta de lubrificação para o anel acarreta o colapso do sistema, dando início ao desgaste chamado de **scuffing**, uma vez que os anéis perdem suas características de raspagem, em especial, o seu perfil. Esse tipo de ocorrência acaba causando não só danos ao anel de pistão, mas também ao cilindro do motor. Dessa forma, a prevenção do **scuffing** é um dos principais vetores do desenvolvimento de camadas resistentes. Esse tipo de ocorrência representa um dano permanente no sistema diferente do desgaste associado a um fenômeno progressivo.

2.5.4 Desgaste por abrasão

Ocorre pela ação de partículas duras pressionadas e deslizando sobre as superfícies, penetrando na superfície e removendo partículas alongadas ou lascas de material. O desgaste por abrasão é denominado de 2 corpos quando uma das superfícies tem partículas duras e protuberantes, e são transportadas pela superfície com pequena redução do tamanho. Já o desgaste por abrasão de 3 corpos é denominado pelas partículas duras estarem livres para rolar e deslizar entre as 2 superfícies, resultando em altas tensões quando as partículas são reduzidas de tamanho, e a taxa de desgaste é normalmente menor nesse último caso.

Em ambos os casos, uma pequena quantidade de partículas abrasivas pode causar o desgaste devido a variações no ângulo de ataque. Partículas deslizantes causam pequeno desgaste, já altas taxas de desgaste, são causadas por partículas com ângulo de ataque de 80-120°. Em alguns casos um processo de 3 corpos pode-se transformar em um de 2, se a partícula dura penetrar e ficar impregnada numa das superfícies (usualmente a mais mole). Neste caso, a taxa de desgaste geralmente ocorre na superfície mais dura e não na mais mole.

2.5.4.1 Mecanismos do desgaste por abrasão

Estudos realizados por microscopia eletrônica mostram que o desgaste produzido por uma partícula abrasiva pode ser provocado não somente por corte, mas por outros mecanismos indiretamente envolvidos. As partículas podem remover material por (SWAIN, 1975):

- a) Microcorte;
- b) Fratura
- c) Fadiga por microsulcamento;
- d) Microlascamentos (em caso de superfícies frágeis).

O primeiro mecanismo ilustrado na Figura 2.9 é o processo de microcorte (Figura 2.9 a), representa um modelo clássico de quando uma “ponta” dura corta uma superfície mole. Quando o material “abradado” é uma pedra, cerâmica e etc., trincas na superfície podem ocorrer (Figura 2.9 b), nesse caso o particulado gerado pelo desgaste é resultado de uma convergência de trincas.

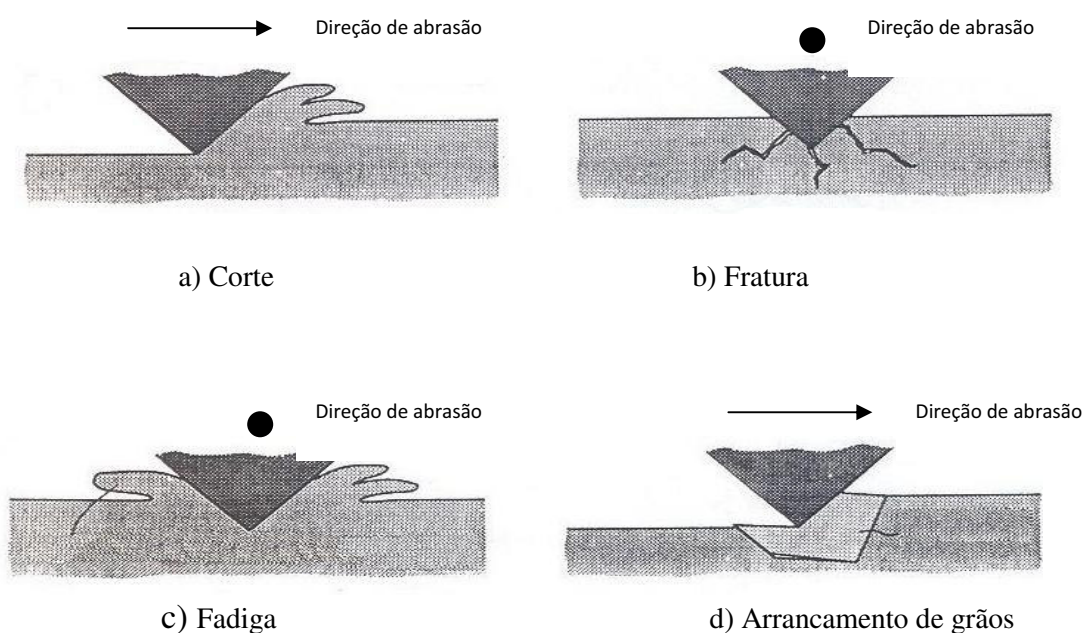


Figura 2.9 – Mecanismo de desgaste abrasivo: (a) microcorte, (b) fratura, (c) fadiga e (d) arrancamento de grãos (Adaptado de: STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Quando um material dúctil é “abradado” por um particulado sem ponta ou “cego” o corte não é bom e a superfície desgastada é repetitivamente deformada (Figura 2.9 c), nesse caso o particulado é resultado da fadiga do material. O último processo ilustrado (Figura 2.9 d) representa grãos destacando ou lascando (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001). O mecanismo ocorre principalmente em materiais cerâmicos quando o contorno entre os grãos é relativamente fraco (SWAIN, 1975).

a) Microcorte

A visualização dos mecanismos de desgaste por abrasão só se tornou possível depois do desenvolvimento da microscopia eletrônica de varredura, que possibilitou a observação de alguns aspectos do desgaste por abrasão com maiores detalhes. Para facilitar o entendimento, por exemplo, foram realizados estudos como construir um sistema pino disco dentro de um MEV (KAYABA, 1984).

A presença de lubrificante é também um fator importante desde que possa estimular o corte por partículas abrasivas. Quando o lubrificante está presente, o corte ocorre com uma pequena penetração do particulado se comparado ao tamanho da penetração em um sistema sem lubrificação. Isso implica que se um fragmento é rigidamente aderido em um metal macio, e é carregado contra um material duro na presença de lubrificante, há um processo de microcorte mais rápido do que ocorre na ausência de lubrificante.

Um outro fator que influencia no mecanismo de desgaste por abrasão é a geometria da partícula. Têm-se observado que a superfície fraturada contendo “fragmentos microcortantes” remove mais material do que matérias com “asperezas” piramidais ou esféricas.

Debaixo do material “abradado” ocorre uma considerável deformação plástica, ilustrado pela Figura 2.10. Como resultado, abaixo da superfície o material passa a estar mais duro e usualmente mais resistente ao desgaste por abrasão (MOORE; DOUTHWAITE, 1978; CHALLEN; OXLEY, 1978).

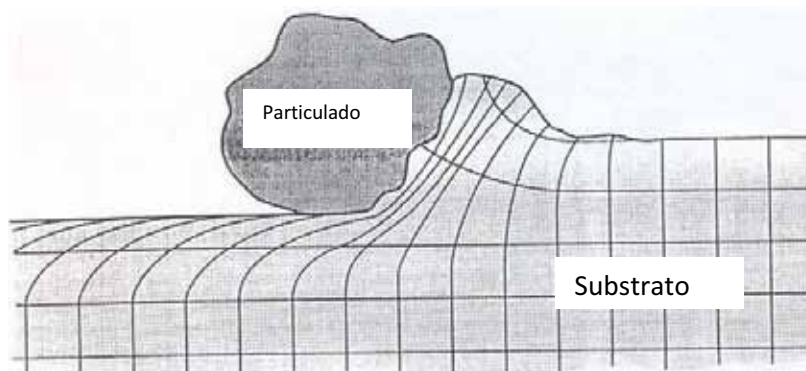


Figura 2.10 - Deformação da subsuperfície durante a passagem do “particulado” (Adaptado de: MOORE; DOUTHWAITE, 1978; CHALLEN; OXLEY, 1978).

b) Fratura

A evidência visual de desgaste por abrasão de um material frágil foi encontrada estudando a geração de trincas subsuperficiais causadas por um entalhe em um material frágil transparente, ilustrado na Figura 2.11.

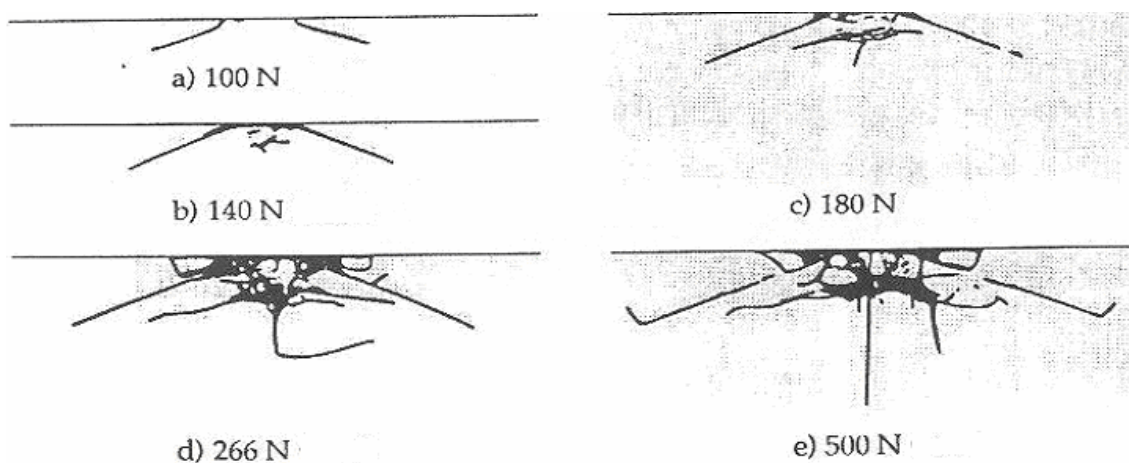


Figura 2.11 - Geração de trincas na superfície e interior de sólidos frágeis (Adaptado de: MOORE; KING, 1980).

Pode-se observar que as trincas geralmente se iniciam a 30° da superfície e quando o particulado avança sobre a superfície há um acúmulo de trincas, liberando uma grande quantidade de material. Podem influenciar na fratura do material, a carga agindo em cada partícula, a forma da partícula (entalhe) e a fragilidade do substrato (MOORE; KING, 1980).

c) Fadiga

Causada por repetidos carregamentos que deformam a superfície do material podendo então causar a fadiga do material. O mecanismo pode ser observado na Figura 2.12.

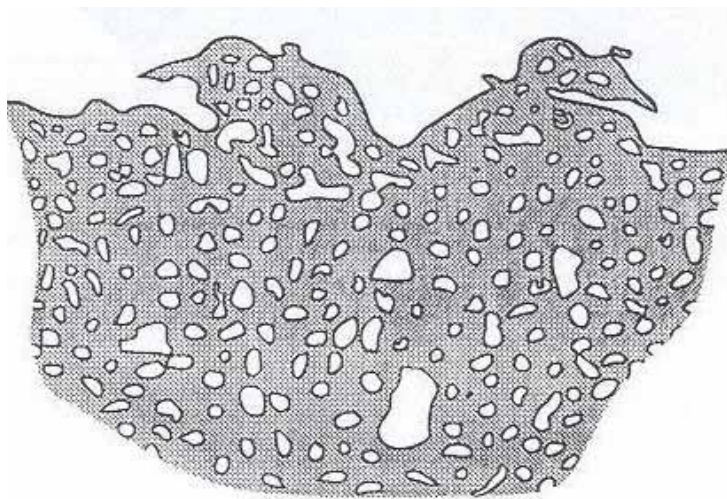


Figura 2.12 - Exemplo de deslocamento de material de um particulado (VINGSBO; HOGMARK, 1981)

Desgaste por repetidos deslocamentos em um lado do material pode ser também uma média ou pequena forma de desgaste por abrasão, desde que repetidas deformações sejam necessárias para produzir desgaste na partícula (VINGSBO; HOGMARK, 1981).

d) Arrancamento de grãos

Destacamentos ou arrancamentos de grãos são formas relativamente raras de desgaste e são encontradas principalmente em cerâmicas. O mecanismo de desgaste é extremamente rápido quando as ligações intergranulares são fracas e o tamanho dos grãos é grande.

2.5.4.2 Resistência ao desgaste abrasivo de ferrosos

A resistência ao desgaste abrasivo dos aços e ferro fundido pode-se resumir a seleção da dureza e fase metalúrgica do material. Em termos metalúrgicos, a resistência à abrasão de ferrosos pode ser determinada pela razão de austenita, bainita,

martensita, perlita, ferrita e a presença ou não de cementita. Estudos gerais em diferentes testes mostram que austenita e bainita, que são fases mais macias do que a martensita, são mais resistentes ao desgaste para um abrasivo duro (GAHR, 1987), isso se deve ao fato da austenita e a bainita possuírem boa ductilidade e tenacidade.

Uma matriz martensítica com carbonetos secundários (cementita) igualmente distribuídos confere em geral, uma melhor resistência ao desgaste abrasivo. Em aços hipereutéticos, por exemplo, a forma e quantidade de cementita presente têm um efeito dominante, sendo a morfologia da cementita crítica para a resistência ao desgaste. A melhor condição é a cementita na forma de lamelas (presente na perlita), pois na fase esférica, a cementita é menos eficiente como barreira à deformação plástica (XU, KENNON, 1991). A Figura 2.13 ilustra a influência da morfologia da cementita na resistência ao desgaste. Inclusões esféricas de carbonetos podem melhorar a resistência ao desgaste, desde que, as partículas abrasivas possuam um tamanho menor do que as inclusões de cementita.

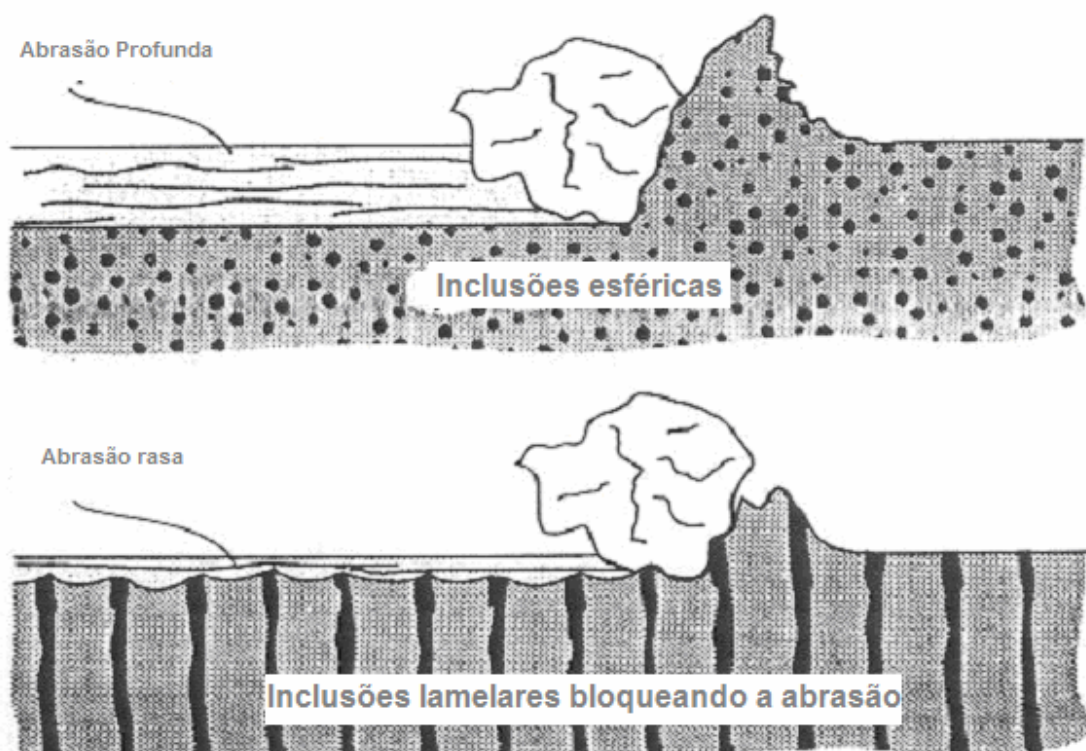


Figura 2.13 - Influência da morfologia dos carbonetos no processo de abrasão (XU, KENNON, 1991).

Aumentando-se a dureza dos carbonetos através da adição de ferro liga, a resistência ao desgaste também será aumentada, mas o grau de melhoria depende da dureza das partículas abrasivas. Elementos de liga melhoram a resistência do desgaste, uma vez que a presença de elementos como Mo, Cr, Ni e outros formam carbonetos muito duros (entre 1300 e 1500 HV). Na Figura 2.14, podemos observar como esses carbonetos podem ajudar na resistência ao desgaste.

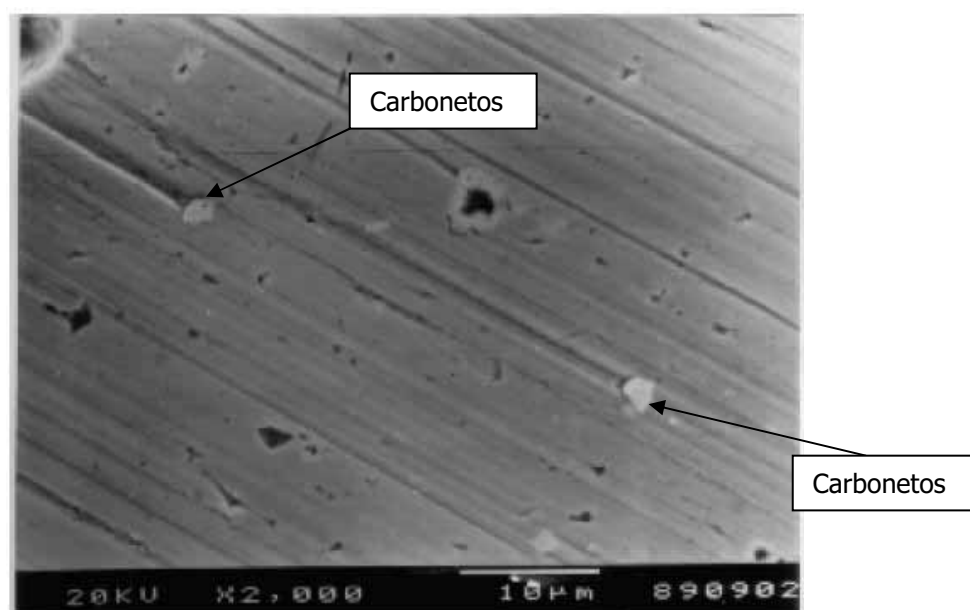


Figura 2.14 - Riscos de desgaste sendo interrompidos por carbonetos de Nb na face de contato de um anel de Ferro Fundido (VATAVUK, 1994)

Segundo TOMANIK (2000), em motores à combustão interna, as partículas que podem provocar o desgaste abrasivo podem ter diversas origens. As principais são:

- a) cinzas e material carbonizado, resíduos sólidos de combustão. Mesmo que inicialmente pequenas e moles, essas partículas podem se aglomerar e endurecer pela compactação provocada pelo movimento secundário do pistão;
- b) partículas metálicas e óxidos provenientes do desgaste;
- c) poeira admitida junto com o ar e não bloqueada pelo sistema de filtragem;
- d) partículas metálicas provenientes do processo de fabricação;
- e) resíduos de areia utilizada na fundição do bloco e cabeçote.

2.5.5 Desgaste por adesão

A primeira idéia básica para o desgaste adesivo foi à adesão e quebra de uma junção (área real de contato) entre as superfícies deslizantes (HOLM, 1929; ARCHARD, 1953).

Outros mecanismos de desgaste adesivo foram propostos por Kerridge (1955) e Hirst e Lancaster (1960) que relatam que de fato ocorre a transferência de um metal para outro, e o metal transferido é removido subsequentelemente como partículas “desgastadas”. Esse tipo de mecanismo de desgaste adesivo é explicado pelo modelo proposto por Sasada (1972, 1976) que propõe que para formar partículas desgastadas, tem que ocorrer simultaneamente um processo de transferência e crescimento.

2.5.5.1 Adesão metal – metal

A força de adesão ou força de separação é sempre maior do que a força de contato (10^{-10} torr), como observado na Tabela 2.1. A tendência à adesão não é determinada pela solubilidade ou tamanho relativo dos átomos entre os metais. A maior adesão ocorre para uma combinação de metais iguais, como por exemplo, Ferro – Ferro, mas combinações de metais diferentes também podem apresentar altas forças de adesão.

A proporção da força de adesão para a força de contato pode ser muito alta, cerca de 20 vezes ou mais em alguns casos. O processo de adesão é instantâneo e pode ocorrer em temperaturas moderadas ou muito baixas (BUCKLEY, 1981).

Tabela 2.1 - Força de adesão de vários metais em contato com o ferro em sistema de vácuo (BUCKLEY, 1981)

Metal	Solubilidade no ferro (%at.)	Força de adesão para Fe (mN)
Ferro		>4.0
Cobalto	35	1.2
Níquel	9.5	1.6
Cobre	<0.25	1.3
Prata	0.13	0.6
Ouro	<1.5	0.5
Aluminio	22	2.5

Vários testes com uma enorme variedade de combinações de metais têm mostrado que quando a adesão é forte, há transferência do metal mais macio (dúctil) para o mais duro (resistente), como observado na Figura 2.15.

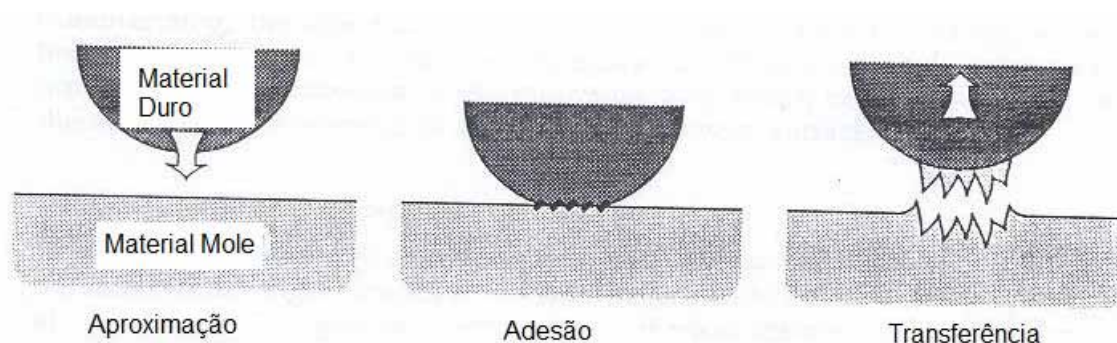


Figura 2.15 - Processo de transferência de metal devido à adesão (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

A forte adesão entre os metais pode ser explicada através da transferência de elétrons entre as superfícies em contato, quando numerosos elétrons livres podem ser transferidos de um metal para o outro até a estabilidade.

Todos os metais mostram uma grande tendência à adesão quando em contato com outro sólido, mas há algumas particularidades que devem ser respeitadas. A grande maioria dos metais apresenta uma das 4 principais formas de estrutura cristalográfica: Cúbica de Face Centrada (CFC), Cúbica de Corpo Centrado (CCC), Hexagonal Compacta (HC) e Tetragonal. Tem-se observado que experimentalmente metais com estrutura hexagonal centrada mostram uma adesão muito menor que outros metais (BUCKLEY, 1981; SIKORSKI, 1963). Altas durezas, altos módulos de elasticidade e energia superficial do metal também suprimem a adesão.

A razão para a diferença na adesão entre os metais com durezas similares está na necessidade das asperidades dos metais deformarem plasticamente após o contato ter se estabelecido. Metais com estrutura hexagonal centrada têm poucos sistemas de deslizamento e são portanto menos dúcteis que metais com estrutura CFC ou CCC, resultando em uma menor adesão.

Adesão entre os metais também são influenciados pela reatividade química ou eletropositividade dos metais (BUCKLEY, 1981; BUCKLEY, 1968). Metais com

estrutura CFC com alto nível de atividade química possuem maiores forças adesivas. No entanto, esses metais são usualmente impróprios para contatos com deslizamento sem lubrificação.

2.5.5.2 Efeitos da adesão entre as superfícies em desgaste

Fortes adesões entre as asperidades das superfícies em desgaste têm dois efeitos: uma grande força de fricção é gerada e as asperidades podem ser removidas das superfícies para formar partículas do desgaste ou camadas de transferência de material.

a) Atrito devido à adesão

Uma teoria adesiva do atrito foi desenvolvida há meio século por Bowden e Tabor (1964), onde o coeficiente de atrito é definido pela equação (2.2) como:

$$\mu = r / p_y \quad (2.2)$$

Em que:

r : é a tensão efetiva sobre o material [Pa];

p_y : é a tensão do fluxo plástico do material [Pa]

A maior adesão ocorre entre metais idênticos, já materiais bimetálicos exibem fraca adesão, e, portanto baixo atrito. Materiais heterogêneos como aços e ferro fundido mostram-se com moderada adesão por que há a interferência de inclusões e fases não metálicas presentes na microestrutura. Coeficientes de atrito também são baixos para esses materiais (BOWDEN; TABOR, 1964).

2.5.5.3 Formação e crescimento das junções adesivas

Como citado no item anterior, materiais heterogêneos como aços e ferro fundido possuem moderada adesão, e para que a adesão ocorra, é só colocar os materiais em contato. Caso ocorra o contato na presença de oxigênio, como no presente trabalho, um filme de óxido de ferro é gerado, resultando na redução do coeficiente de atrito. Quando esse filme cresce até um determinado tamanho, a forte força de adesão Fe/Fe

passa a ser uma fraca adesão entre a camada de óxido de ferro, que é controlada pelas forças de Van der Waals.

O coeficiente de atrito entre as superfícies “limpas” do ferro é muito alta, maior que $\mu=3$. Esse valor pode ser explicado principalmente pelo fenômeno do processo de contato das asperidades e formação das junções adesivas (McFARLANE; TABOR, 1950).

Para explicar o processo de contato entre as asperidades e formação das junções adesivas pode-se assumir inicialmente que a carga normal que age sobre a asperidade é forte o bastante para deformá-la plasticamente. Desde que o contato é no estado plástico, há fluxo de material, e a área de contato será facilmente aumentada quando a tensão tangencial for introduzida. O aumento da área de contato irá resultar em uma redução da pressão normal, e também irá permitir uma maior força tangencial.

A força tangencial e a área de contato irão crescer até uma máxima tensão de cisalhamento permitida pelo material. Como resultado o coeficiente de atrito irá aumentar.

2.5.5.4 Deformação das asperidades e formação das partículas do desgaste

A ação combinada de adesão entre as asperidades e o movimento de deslizamento causa uma severa deformação plástica. Materiais de asperidades macias ou mais duras deformam em uma série de bandas de cisalhamento para se acomodar ao movimento relativo, não há deslizamento ao longo da linha de contato das asperidades. Quando cada banda de cisalhamento atinge certo limite, uma trinca é iniciada ou uma nova banda de cisalhamento é formada. A trinca se estende ao longo da asperidade e eventualmente uma partícula se destaca para a asperidade deformada. O mecanismo de cisalhamento e formação da trinca para formação de uma partícula do desgaste pode ser observado na Figura 2.16

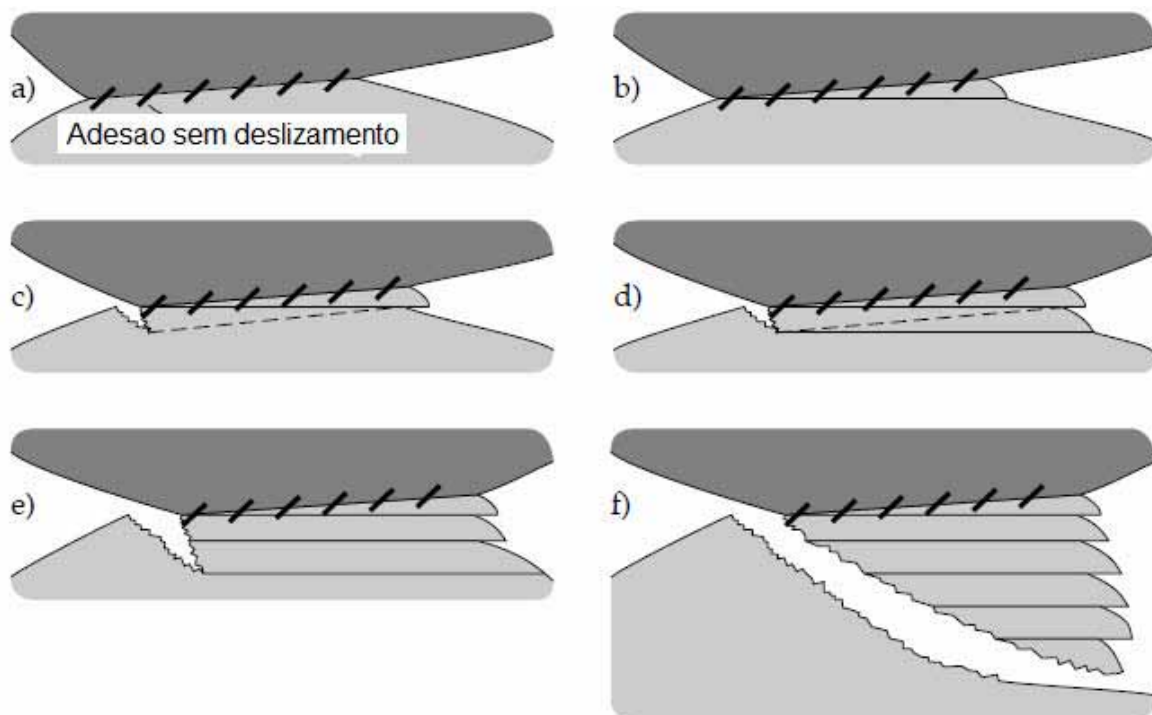


Figura 2.16 – Diagrama esquemático da formação de uma partícula de transferência adesiva (KAYABA; KATO; 1979)

As propriedades do material têm uma forte influência na deformação da asperidade e severidade do desgaste adesivo. Experimentos realizados em 1964 por Bowden e Tabor revelaram que as asperidades em contato de materiais frágeis tendem a romper de forma limpa com pequenas deformações e produzir poucas partículas quando comparados a materiais dúcteis. A ductilidade tem um indesejável efeito de acentuar o desgaste adesivo. O contato entre as asperidades que não produzem partículas do desgaste terão uma deformação plástica ainda mais extensa, como ilustrado na Figura 2.17.

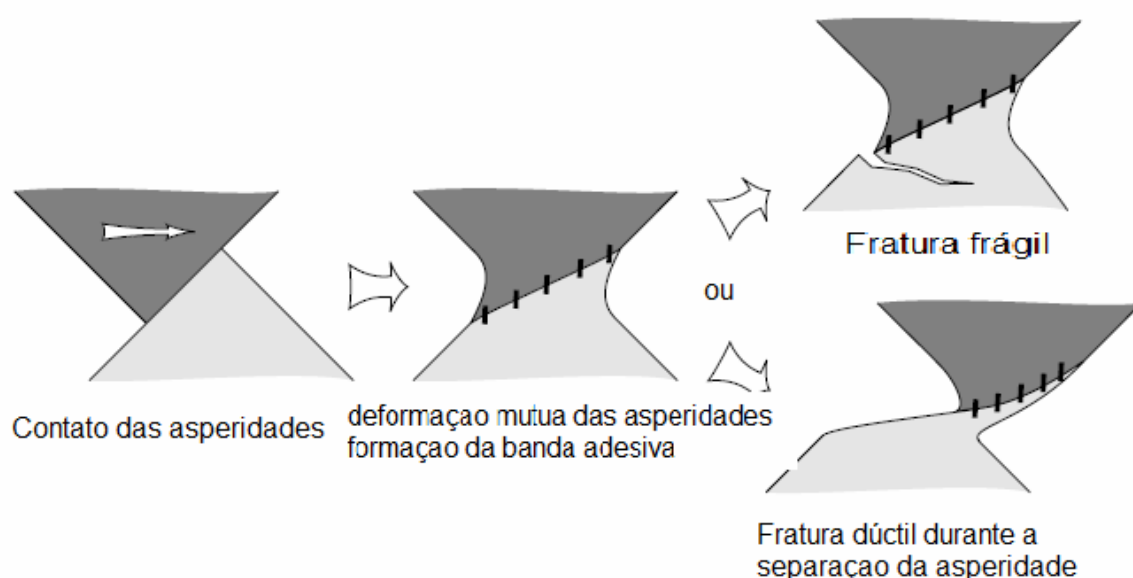


Figura 2.17 – Deformação das asperidades em um contato adesivo (VINGSBO; 1979)

2.5.5.5 Mecanismo de desgaste por adesão em metais

O desgaste por adesão é definido por Blau (1995) como o “Desgaste por transferência de material de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido à formação de junções na fase sólida”. Estas junções adesivamente formadas são cisalhadas e parte do material menos resistente é transferido ou pode permanecer entre as superfícies (CRNKOVIC; 1993).

O mecanismo de desgaste por adesão tem dependência da força normal aplicada nos corpos em contato, da velocidade relativa de deslizamento entre as superfícies, da temperatura, das durezas e rugosidades dos materiais e da afinidade química entre eles (WILLIAMS; 1996). O mecanismo produz também muitos fragmentos duros, dos materiais em trabalho, pela deformação e rompimento de junções adesivas, que em suas trajetórias de saída, promovem uma micro-abrasão nas superfícies por onde passam, sendo assim, responsável por uma superfície toda microranhurada. A abrasão nas superfícies dos materiais, produzidas pelas partículas geradas no desgaste, levam a uma interpretação similar do mecanismo de desgaste abrasivo.

Diferentes mecanismos de desgaste têm sido propostos para um desgaste severo de metais. Todos envolvem deformação plástica, mas diferem em detalhes de processo

de cada um dos materiais envolvido. Não é difícil encontrar uma conclusão equivocada entre os prováveis mecanismos envolvidos em um determinado caso particular, mas uma análise crítica de ambas as superfícies desgastadas e dos fragmentos podem prover informações bastante úteis.

As superfícies desgastadas irão presumir a quantidade de fragmentos desgastados em todos os estágios do ciclo de vida (Figura 2.18), onde os estágios I e III apresentam um desgaste severo e o estágio II um nível de desgaste moderado ou taxa de desgaste constante (HOLMBERG, 2001).

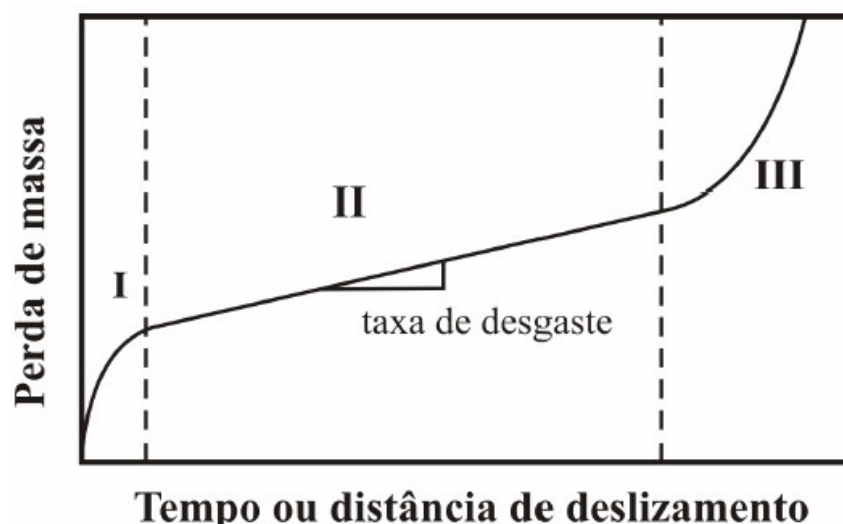


Figura 2.18 – Esquema da variação da perda de massa com a distância deslizada (HOLMBERG, 2001)

Identificar os fragmentos desgastados, no entanto, não é tão simples. Tão bem como a análise da topografia da superfície e microestrutura por microscopia óptica e MEV, têm sido utilizado recentemente Microscopia Eletrônica por Transmissão para estudar deformações e estruturas em materiais muito próximas à superfície desgastada. Outras técnicas como: Difração de raios X, microanálise de raios X por energia e comprimento de onda dispersiva e Espectroscopia Eletrônica Auger têm possibilitado também informações sobre a composição e estrutura dos materiais.

A avaliação das partículas desgastadas em cada um desses métodos podem também trazer valiosas dicas, apesar de que é de grande importância a questão do momento em que as partículas desgastadas foram coletadas, pois sua natureza ou

aparência pode mudar substancialmente, como por exemplo, o “*running*” de partículas desgastadas entre as superfícies deslizadas, e a oxidação de partículas metálicas após a separação.

Hutchings (1992) diz que no desgaste por deslizamento, o material é removido como protuberância ou fragmentos de asperidades pelo processo de adesão, e algumas partículas desgastadas certamente têm irregularidades, formas arredondadas que são apropriadas para o processo. Alguns mecanismos têm sido propostos pelo contato mostrando como cada asperidade pode contribuir diretamente para a formação de partículas desgastadas. A Figura 2.19 mostra de forma representativa, o mecanismo de adesão através do fluxo plástico em cada uma das pontas das asperidades e como esta resulta na formação de uma partícula de desgaste.

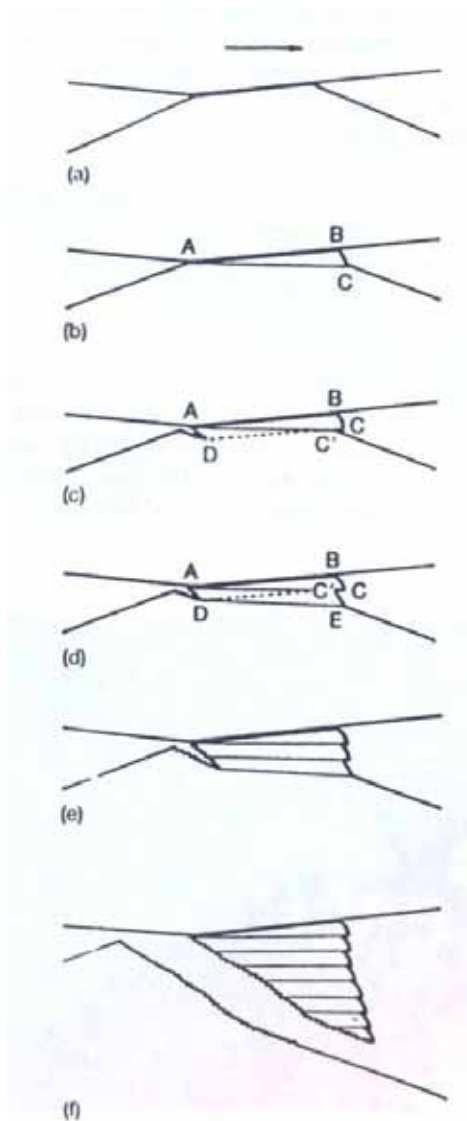


Figura 2.19 – Fluxo plástico da formação de uma partícula de desgaste (HUTCHINGS; 1992)

Nesse caso, laminações plásticas de sucessivas camadas (por exemplo, ao longo do plano AC) ocorrem em conjunto com a propagação de uma trinca (AD), ao longo de cada partícula separada. Forças adesivas não são necessárias para o material ser removido por um mecanismo, que depende somente de interação mecânica entre duas asperidades, mas eles podem ser invocados para explicar alguma subsequente transferência de particulados para uma das superfícies deslizadas.

O mecanismo da adesão propõe que a formação de um fragmento pela ruptura de uma asperidade é resultado imediato de uma transferência adesiva para a face oposta, para formar uma nova asperidade nessa superfície (Figura 2.20).

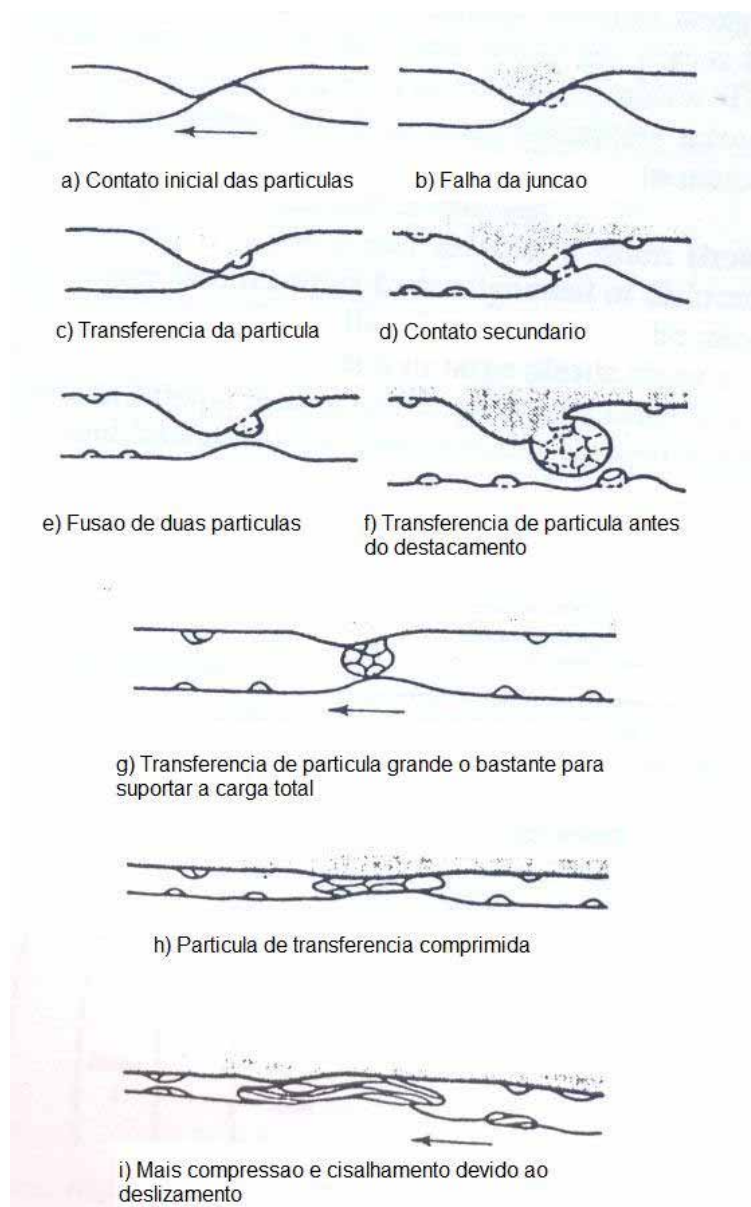


Figura 2.20 – Modelo de desgaste por adesão (HUTCHINGS; 1992)

Promover deslizamento causa mais fragmentos para serem formados, que aderem ao fragmento original até um maior aglomerado de partículas desgastadas eventualmente vir a ser destacada. Essa partícula do fragmento pode ser equiaxial, como mostrado pela Figura 2.20 g, ou pode ser achatada e alongada na direção do deslizamento por deformação plástica, formando uma “placa” composta por partículas desgastadas (como a Figura 2.20 i).

2.5.6 Desgaste por fadiga

Outro mecanismo tem se tornado conhecido por teoria da delaminação. Isso envolve a nucleação de trincas abaixo da superfície e a propagação delas paralelamente abaixo da superfície. As trincas originam-se junto com o material deformado plasticamente abaixo da superfície, por acaso, mas não necessariamente por lacunas causadas pelo corte de inclusões, e depois, crescimento e ligação simultâneos, estendendo-se até superfície.

A microestrutura logo abaixo da região deslizada, associada com um deslizamento severo em metais, certamente mostrará uma região fortemente deformada. O material pode ser subdividido em 3 regiões, Zona 1, 2 e 3, conforme Figura 2.21.

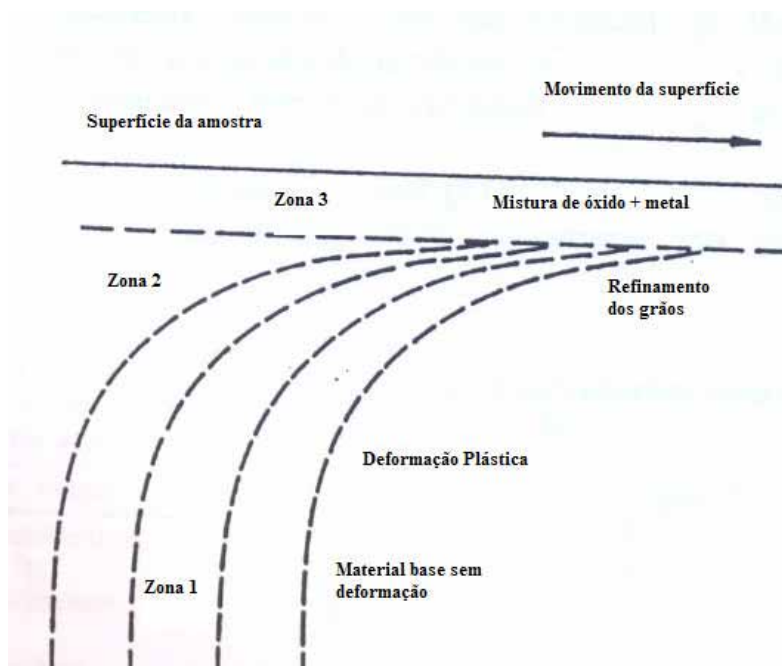


Figura 2.21 – Zonas da Teoria da Delaminação (HUTCHINGS; 1992)

A zona 1 é uma região distante da superfície e onde o material se apresenta sem deformação. A zona 2 contém material deformado plasticamente, com uma linha de deformação plástica de deslocando para a superfície, onde pode-se encontrar uma estrutura de grãos reorientados e refinados. O material próximo à superfície, na zona 3, sempre terá uma estrutura diferente a da zona 2, com grãos muito finos (às vezes com tamanhos na ordem de 10 nm) e contendo componentes não presentes no material base, como materiais transferidos ou óxidos (HUTCHINGS, 1992).

O material próximo à zona 2 ou 3, ou seja, na superfície ou próxima dela, mostrará uma estrutura lamelar, resultado do alinhamento das células de discordância e de contornos de subgrãos paralelos à superfície de deslizamento.

Mecanismos de desgaste em que trincas propagam-se paralelamente as lamelas, resultado da remoção de fragmentos, que podem ser compostos de camadas transferidas mecanicamente ligadas, ou contendo quantidades substanciais de material base da zona 2.

A complexidade do desgaste por deslizamento em um regime de desgaste severo pode ser facilmente ilustrada pela diversidade dos mecanismos citados anteriormente. Alguns irão produzir fragmentos em um simples passe, e outros irão requerer mais passes. Alguns diferentes mecanismos podem operar em seqüência ou simultaneamente durante o tempo de vida do sistema em deslizamento, e detalhes da topografia da superfície, composição e microestrutura próxima à superfície do material, e a natureza dos filmes e outros materiais adsorvidos também serão importantes (HUTCHINGS, 1992).

2.5.7 Desgaste por oxidação

O desgaste por oxidação é o desgaste de metais em sistemas não lubrificados na presença de ar ou oxigênio, onde a causa fundamental para esse tipo de desgaste é a reação química entre a superfície do material desgastado e um agente oxidativo, tal como o ar. O ar atmosférico possui como característica principal que uma rápida taxa de desgaste é acompanhada por uma diminuição do coeficiente de atrito. Esse tipo de desgaste foi postulado quando mudanças na composição química da partícula desgastada em desgaste por deslizamento a seco em aços em diferentes níveis de carga

e velocidades de deslizamento foram observadas (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001). Foi encontrado quando a carga e a velocidade de deslizamento foram altas o bastante para aumentar a temperatura de contato em algumas centenas de graus Celsius, e as partículas do desgaste em ferro metálico mudaram para partículas de óxido de ferro. Foi hipotetizado também que onde há uma espessa camada de filme de óxido nas superfícies desgastadas, prevalece o “desgaste intermediário” e se essa espessa camada de óxido de ferro for removida ou quebrada, irá prevalecer o “desgaste severo”, e a forma de desgaste por adesão é inevitável.

2.5.7.1 Cinética do crescimento do filme de óxido em metais

A taxa de oxidação dos metais é dependente da temperatura, como é esperado para uma reação química. A cinética de formação de oxidação em superfícies metálicas tem um importante papel no desgaste por oxidação. Para baixas temperaturas ou temperaturas ambientes, próximas a 20 °C, a oxidação do metal é inicialmente muito rápida e a espessura da camada de óxido é limitada pela passivação da superfície (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001). A limitação da espessura do filme é menor do que 2 nm (5 camadas atômicas) para aços quando a temperatura é menor do que 200 °C (FEHLNER; MOTT; 1970). Se a temperatura do aço é aumentada para, por exemplo, 500 °C, uma oxidação ilimitada ocorrerá, resultando em uma espessa camada de óxido (1 – 10 μm). A distinção entre as duas formas de oxidação é ilustrada na Figura 2.22.

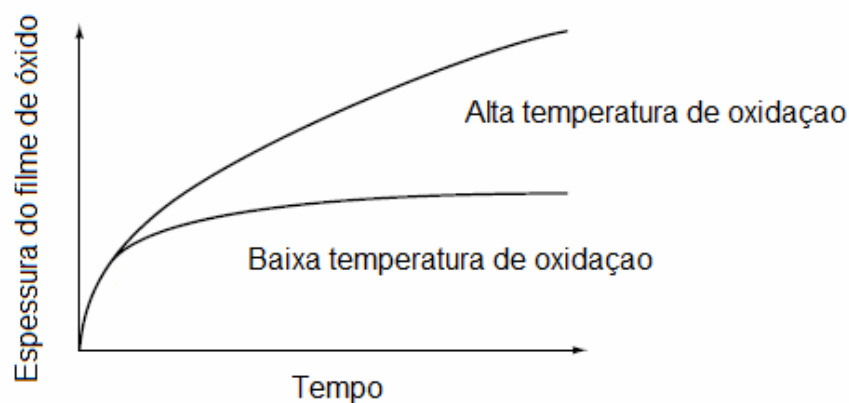


Figura 2.22 – Cinética de oxidação do metal a baixa e alta temperatura (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001)

As camadas de óxido formadas são suportadas por camadas do substrato endurecidas, geradas devido a deformações plásticas. Para altas temperaturas, no entanto, há altas taxas de oxidação e a causa direta é o aumento do desgaste. A rápida oxidação a altas temperaturas forma a base do desgaste por oxidação. As altas temperaturas podem ser impostas por fatores externos ou por alto aquecimento devido à força de atrito em altas velocidades de deslizamento, como ilustrado na Figura 2.23.

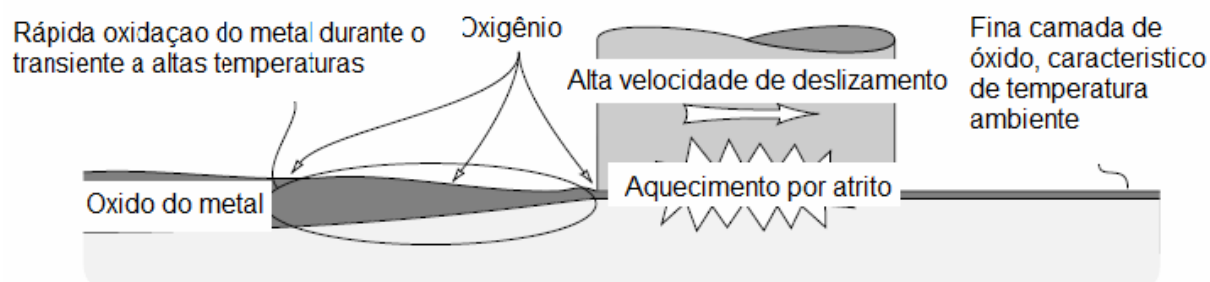


Figura 2.23 – Rápida oxidação de superfícies metálicas em contato a altas temperaturas (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001)

2.5.7.2 Desgaste por oxidação em altas velocidades de deslizamento

Para velocidades de deslizamento próximas a 1 m/s a superfície estará exposta a temperaturas superiores a algumas centenas de graus Celsius, e se a carga é baixa o bastante para permitir um desgaste intermediário, espessos filmes de óxido (alguns micrometros) irão surgir na superfície desgastada. As camadas de óxido formadas são espessas o suficiente para separar fisicamente as superfícies desgastadas, e é a razão do desgaste por oxidação ocorrer devido à formação e remoção dessas camadas de óxido.

Em contatos por deslizamento, em altas velocidades, um pequeno filme de óxido presente em uma superfície de aço não desgastado é rapidamente “destruído” e o atrito e a taxa de desgaste aumentam, iniciando um período de desgaste severo. Quando uma espessa camada de óxido é estabelecida, o estado de desgaste intermediário será encontrado e a taxa de desgaste decresce bruscamente. Quando cada camada de óxido atinge uma espessura crítica, a mesma se torna frágil para suportar a carga e tensão de corte do atrito, tornando possível a remoção da camada durante o deslizamento.

Outra alternativa para o mecanismo de remoção da camada de óxido é devido a processo de fadiga iniciado após um certo número de contatos entre as superfícies. Em altas velocidades de deslizamento algumas asperidades das superfícies estão sujeitas a uma sequência randômica de pequenos períodos de altas temperaturas de oxidação, onde os contatos das asperidades acontecem com as asperidades da superfície oposta. A cinética de oxidação é governada pelo nível de temperatura das asperidades em contato (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001).

2.5.7.3 Desgaste por oxidação em baixas velocidades de deslizamento

Quando os materiais ferrosos são expostos ao ar e sujeitos a baixas velocidades de deslizamento, a espessura inicial do filme é menor do que 2 nm, e é facilmente removida, resultando em um período de desgaste severo ou desgaste adesivo. Em velocidades abaixo de 1 m/s as temperaturas provenientes do atrito não são altas o bastante para gerar rápida oxidação no contato das asperidades. Embora espessos filmes de óxido ainda se formem nas superfícies desgastadas, eles serão resultado de partículas desgastadas e não da oxidação direta.

Os óxidos fraturados e partículas metálicas oxidadas compactas formam as “ilhas” de óxido nas superfícies desgastadas. A área dessas “ilhas” aumenta com a distância deslizada, e o desenvolvimento das ilhas é acompanhado de uma progressiva redução do coeficiente de atrito (WILSON, STOTT, 1980). O processo de desgaste a baixas velocidades é particularmente efetivo na formação de partículas consistentemente finas, divididas entre a mistura de óxidos e metal. Partículas do desgaste são formadas e sucessivamente deformadas, um processo que gera sucessivas novas superfícies para oxidação por oxigênio atmosférico, como mostrado na Figura 2.24.

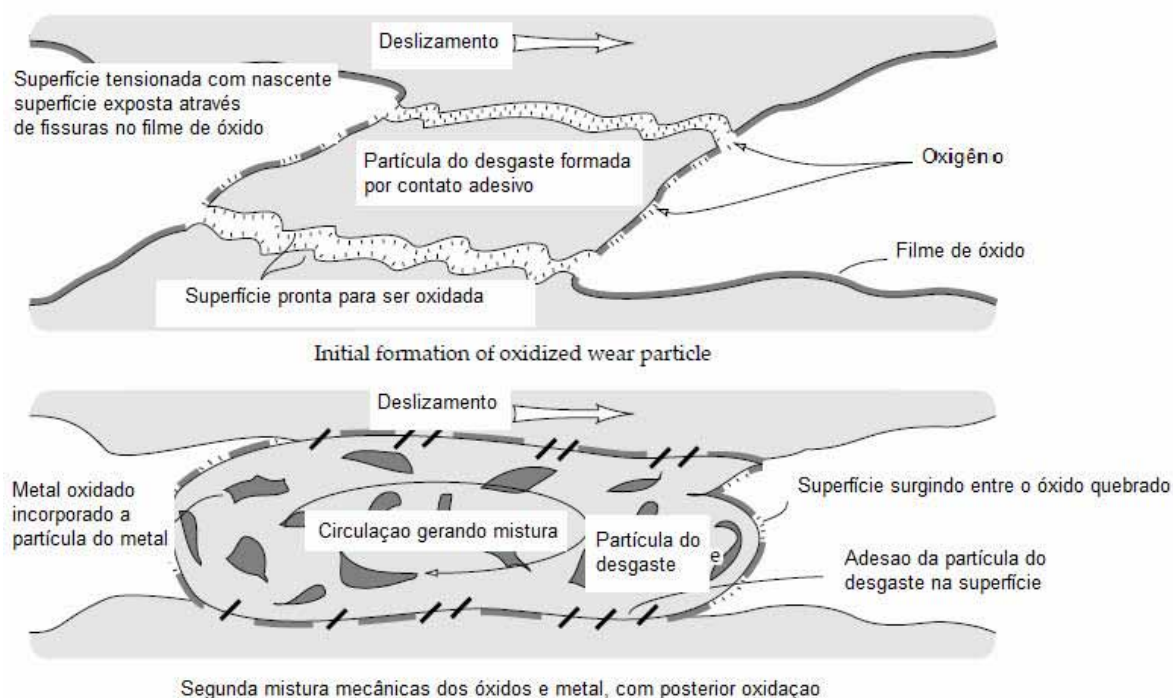


Figura 2.24 – Formação de partículas através da mistura de óxido e metal

2.5.8 Mecanismo de desgaste em Ferro Fundido

a) Influência da grafita na resistência ao desgaste

Os componentes, equipamentos e etc de ferro fundido cinzento possuem larga aplicação na engenharia, onde do ponto de vista técnico-econômico, os materiais com microestrutura mais conveniente para resistência ao desgaste são os com matriz perlítica contendo pequenas quantidades de ferrita livre.

Do ponto de vista tribológico, a presença de grafita no ferro fundido cinzento é desejável por que melhora a resistência ao desgaste. A grafita tem uma influência significativa no desgaste, pois age como um lubrificante sólido tanto no sistema lubrificado quanto no sistema a seco, sendo um importante agente lubrificante, e que, quando os núcleos de grafita em **flakes** possuem menores espaços interdendríticos e estão randomicamente distribuídos, o ferro fundido cinzento pode apresentar uma boa resistência ao desgaste e melhorar a condutividade térmica (TAKEUCHI, 1968).

Segundo Takeuchi (1970), se o material apresentar grandes concentrações e maiores tamanhos de grafita, há uma grande probabilidade de fratura e queda da

resistência ao desgaste, pois a fratura ocorre principalmente nas pontas dos núcleos de grafita. Além do tipo de grafita, a resistência ao desgaste depende também de outras propriedades do material tais como: composição, microestrutura, dureza e também das condições de trabalho.

Para Vadiraj et al. (2000) com um aumento do volume de grafitas, há um decréscimo gradual da resistência à tração e taxa de desgaste específico. O volume das grafitas aumenta com o aumento do carbono equivalente e diminuição do tamanho e espaço entre elas, onde o carbono dos “**flakes**” de grafita é liberado durante o teste de desgaste para lubrificar a interface de escorregamento, diminuindo o desgaste.

Angus e Lamb (1967) observaram a superfície dos ferro fundidos cinzentos ensaiados em condições de deslizamento à seco, e observaram que a estrutura perlítica confere boa resistência ao desgaste, mas quando se tem a presença de ferrita, que é uma fase mole, pode-se observar uma diminuição da resistência ao desgaste. Segundo Eyre e Williams (1973), que estudaram a influência da ferrita e do fósforo em ferro fundidos, a presença de ferrita aumenta o desgaste e que a presença de fósforo é positiva, pois o fósforo é um elemento comum em ferro fundido cinzento.

Quando a concentração de fósforo é próxima a 1%, forma-se uma rede contínua de eutético de fósforo (Steadita), aumentando a resistência ao desgaste do ferro fundido, sendo que em certas condições esse aumento pode ser considerável. A função do fosfeto no comportamento do desgaste do ferro fundido cinzento tem sido considerada ou sugerida por um ou mais autores, sendo:

- a) o fosfeto aumenta a resistência do ferro fundido em condições compressivas e da zona plástica;
- b) a lubrificação é facilitada pela ação capilar entre as partículas de fosfeto;
- c) fosfetos podem se distribuir pela superfície e formar um filme contínuo;
- d) o fosfeto pode se fundir e causar a redistribuição da tensão;
- e) uma rede contínua de fosfeto inibe completamente o efeito danoso da ferrita em uma matriz completamente ferrítica para suportar a carga.

Angus (1957) investigou o efeito da dureza e da steadita (eutético de fósforo) na resistência ao desgaste, e encontrou que uma dureza entre 180-240 HB e uma quantidade de steadita entre 0,70 e 1,40% trazem melhores resultados.

Com relação à influência das propriedades mecânicas na resistência ao desgaste, quanto maior o módulo de elasticidade do material, maior a resistência ao desgaste.

b) Mecanismo de desgaste em Ferro Fundido Cinzento

Takeuchi (1968) analisou o mecanismo de desgaste de fundidos cinzentos em sistemas não lubrificados. Através de investigação metalográfica algumas mudanças na natureza do desgaste foram determinadas, podendo-se observar mecanismos de forma oxidativa, mecânica e térmica.

Hase e Mischina (2009) estudaram a influência da carga normal e lubrificação no tamanho e quantidade de elementos “desgastados” e partículas mistas (mistura de dois materiais) no sistema Fe-Fe, onde o material ensaiado possuía uma pureza de 99,9% e dureza de 96,1 HV. Através de imagens de AFM (microscopia de força atômica), em um ensaio onde a força normal era de 1N e em sistemas à seco e lubrificados, respectivamente, os autores chegaram à conclusão clara de que a transferência de elementos “desgastados” na superfície deslizada diminui na presença de lubrificante. O crescimento das partículas mistas pela agregação dos elementos “desgastados” é facilmente observado na Figura 2.25. Em sistema a seco, se comparado a transferência de elementos “desgastados” e partículas mistas, na carga de 1 N a transferência de material é amplamente maior do que na carga de 0,1 N, justificando assim que quanto maior a carga, maior será a transferência de elementos “desgastados” e partículas.

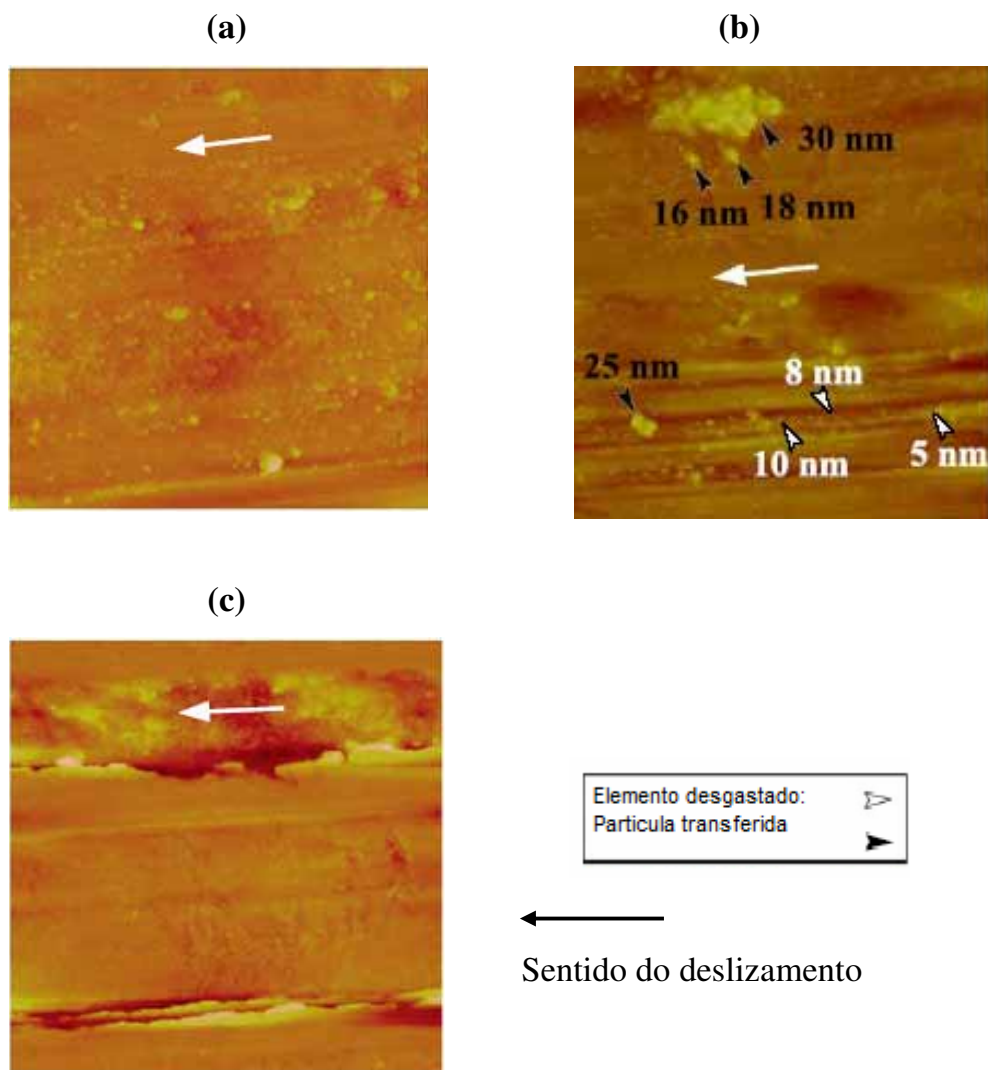


Figura 2.25 - a) sistema sem lubrificação a seco com carga de 1N, b) sistema sem lubrificação com carga de 0,1N e c) sistema com lubrificação com carga de 1N (Hase; Mischina, 2009)

Segundo Takeuchi (1968), desgaste é um fenômeno extremamente complexo, e determinar os mecanismos de desgaste em materiais com microestrutura heterogênea é particularmente muito difícil, como é o caso do ferro fundido cinzento.

Okoshi e Sakai (1941) estudaram exaustivamente a natureza do mecanismo de desgaste em ferro fundido, no entanto depois de vários experimentos eles nada concluíram após exaustivas discussões sobre os resultados. Por exemplo, sobre condições um pouco mais severas, ocorre desgaste por oxidação. Os autores assumiram que um aquecimento entre as superfícies de contato deveria gerar um aquecimento e depois, após alguma reação oxidativa, produzir quantidades apreciáveis de óxidos.

As citações acima são análises isoladas de fatores individuais afetando as características do desgaste do ferro fundido, e não se pode dizer que há um princípio estabelecido para o mecanismo de desgaste.

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

3.1 Corpos de prova

Os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova foram ligas em ferro fundido cinzento do catálogo de materiais da empresa Mahle Componentes de Motores, pertencentes ao grupo de materiais conforme norma ISO 6621-3, obtidos através do processo de fundição em molde de areia à verde (ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento MC 13) e processo de fundição por Centrifugação (ferro fundido cinzento centrifugado), conforme o Fluxograma 3.1. Todos os corpos-de-prova foram obtidos do mesmo lote de produção (corrida controlada) objetivando diminuir a heterogeneidade na microestrutura e composição química.

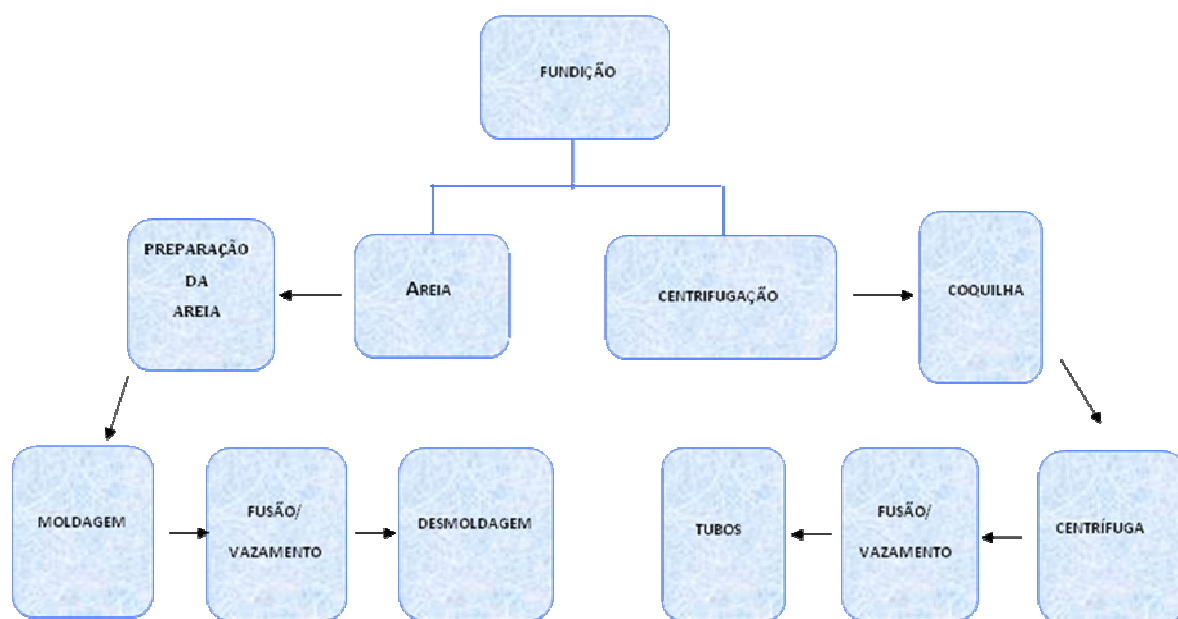


Figura 3.1. Fluxograma esquemático do processo produtivo

Os corpos de prova em fundido cinzento MC 12 e MC 13 foram usinados conforme Figura 3.2 (a) e 3.2 (b), na forma de discos e pinos respectivamente.

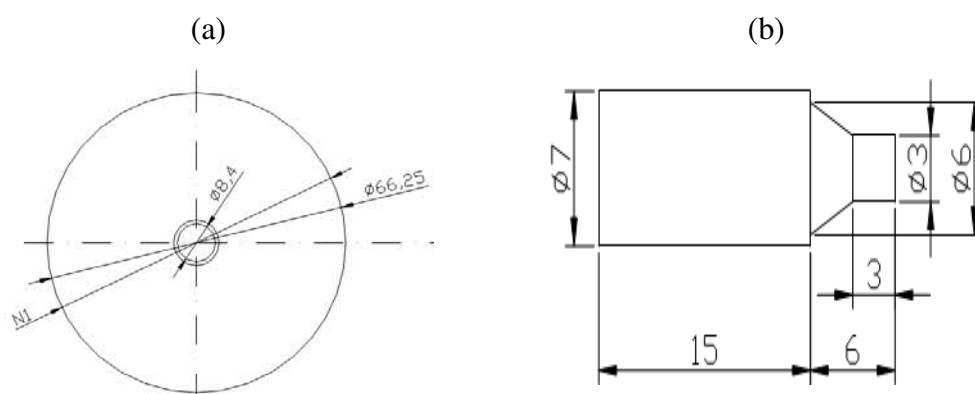


Figura 3.2. Desenho esquemático do cdp's empregados nos ensaios de desgaste (a) disco e do (b) pino

A Figura 3.3 representa resumidamente os processos de obtenção e caracterização dos corpos de prova empregados no trabalho.

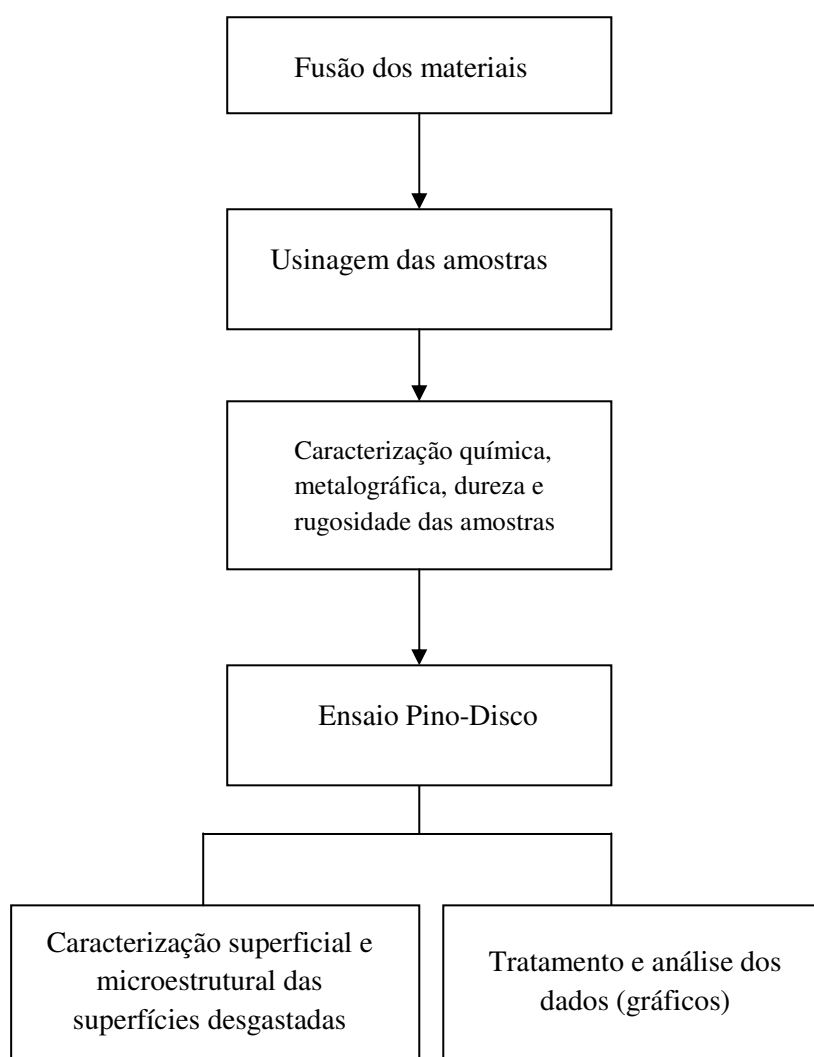


Figura 3.3. Fluxograma das etapas experimentais

3.2 Especificações da composição química, propriedades mecânicas e características macroestruturais dos materiais dos corpos-de- prova

Nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 pode-se observar a composição química, propriedades mecânicas e características microestruturais dos materiais utilizados no presente trabalho conforme especificação das normas de materiais do grupo Mahle.

Tabela 3.1 – Especificação da composição química dos materiais

Elemento Químico	Ferro Fundido Cinzento MC 12 (disco)	Ferro Fundido Cinzento MC 13 (disco)	FoFo Cinzento Centrifugado (pino)
Carbono	3,60 – 3,90	3,55 – 3,75	3,20 – 3,50
Silício	2,20 – 2,90	2,10 – 2,90	1,60 – 2,10
Manganês	0,50 – 0,80	0,60 – 0,80	0,60 – 0,80
Fósforo	0,30 – 0,50	0,30 – 0,40	0,35 – 0,80
Enxofre	0,10 máx	0,10 máx	0,09 máx
Cromo	0,40 máx	0,25 – 0,40	0,20 – 0,40
Molibdênio	0,20 máx	0,10 máx	0,30 – 0,50
Cobre	1,50 máx	0,50 – 0,70	-
Vanádio	0,05 – 0,15	0,10	-

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas

Propriedades Mecânicas	Ferro Fundido Cinzento MC 12 (disco)	Ferro Fundido Cinzento MC 13 (disco)	FoFo Fundido Cinzento Centrifugado (pino)
Módulo de Elasticidade (GPa)	83 - 126	105 - 140	110 Min.
Tensão de Ruptura (MPa)	380	420	250 Min.

Tabela 3.3 – Características microestruturais

Material	Matriz	Ferrita	Grafitização
* MC 12	Perlítica	5% máximo	Predominante tipo A
** MC 13	Perlítica	5% máximo	Predominante tipo A
FoFo Centrifugado	Perlítica	5% máximo	Predominante A e B

*** Ferro Fundido Cinzento MC 12:** Grafitização predominante tipo A, permissíveis grafitas tipo B e C.

**** Ferro Fundido Cinzento MC 13:** Grafitização predominante tipo A, permissível combinação com grafitas tipo D e E. Presença de grafitas tipo C é motivo de rejeição do material.

3.3 Análise química

As análises químicas dos materiais foram realizadas em um espectrômetro da marca Thermo Scientific, modelo ARL 3460 do Laboratório de Análises Químicas da Mahle Componentes de Motores, com exceção para as análises de C e S, realizadas em um equipamento Leco CS-125.

Para a análise via espectrômetro, seguiu-se os seguintes passos:

- coquilhamento da amostra em um recipiente de cobre refrigerado a água;
- desbaste de material na superfície da amostra, afim de deixá-la o mais plano possível;
- calibração e preparação do equipamento para a composição da liga a ser analisada;
- realização de três “queimas” na superfície da amostra, afim de garantir homogeneidade e repetibilidade da análise;

Para a análise química de C e S, utilizou-se uma parte do material da amostra coquilhada que foi macerada, misturada a um acelerador de tungstênio, colocada em um cadinho de alumina e levada ao equipamento para leitura dos teores de C e S.

3.4 Caracterização da microestrutura e das superfícies desgastadas

3.4.1 Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi empregada para a quantificação e análise das fases presentes nos materiais. Foi utilizado um microscópio da marca *Leica*, pertencente ao Laboratório Metalográfico da Mahle Componentes. Esse tipo de técnica possibilita a observação da microestrutura por utilizar baixos aumentos (100x e 500x) e alcançar grandes áreas.

As amostras foram preparadas de acordo com a seguinte metodologia:

- Corte das amostras com um disco abrasivo de corte;
- Embutimento em baquelite;
- Remoção de material com lixas de SiC, iniciando com granulometria de 100 mesh e progredindo para granulometrias menores, até 1200 mesh.
- Polimento com pano Struers e pasta de diamante de 1 micron por 2-3 minutos;
- Ataque químico com nital 2% (ácido nítrico mais álcool etílico) para análise da matriz.

3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As superfícies desgastadas das amostras dos pares ferro fundido cinzento centrifugado/ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ferro fundido cinzento MC 13, foram analisadas com ampliações de 100 a 10.000 vezes, tanto no modo elétrons secundários como no modo elétrons retroespalhados. Essas análises possibilitaram realizar observações microscópicas da morfologia da superfície desgastada acrescida às alterações observadas na superfície dos discos, e proporcionaram informações significativas do mecanismo de desgaste operante.

A análise química das superfícies desgastadas por EDS, bem como as micrografias por elétrons retroespalhados, proporcionaram informações úteis em relação à transferência de material entre as superfícies de contato, sendo de grande auxílio para o conjunto de informações em relação ao mecanismo de desgaste operante.

As análises foram realizadas no Laboratório de Análises Microestruturais do Centro Tecnológico da Mahle Componentes de Motores.

3.5 Ensaio de desgaste

Os testes foram realizados em um banco de ensaio do tipo pino-disco projetado e construído pela Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá (UNESP), instalado no Laboratório de Tribologia, Departamento de Materiais e Tecnologia.

A Figura 3.4 ilustra o conjunto do banco de ensaio de desgaste, com cada um dos sistemas indicados.

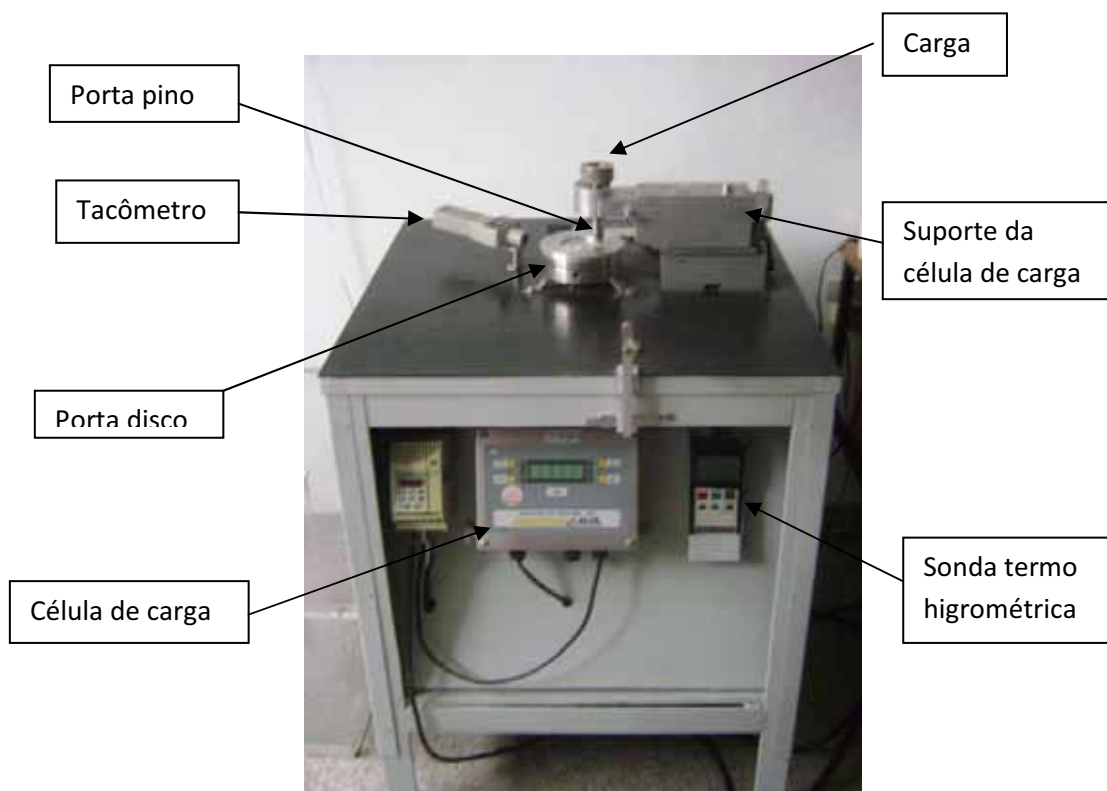


Figura 3.4 - Banco de ensaio de desgaste

O banco de ensaio de desgaste pino-disco é um equipamento freqüentemente utilizado na caracterização tribológica de vários tipos de materiais, devido a sua facilidade operacional e também por possibilitar a utilização de corpos de prova de pequenas dimensões, com menores custos. A ampla faixa de cargas e velocidades de deslizamento proporcionadas por este tipo de equipamento faz com que o mesmo seja utilizado na caracterização tribológica de materiais em que se deseja analisar o

comportamento de uma variável em função de um conjunto de outras que se mantêm fixas, obtendo-se boa repetibilidade nos experimentos, entretanto, é necessário o controle adequado das condições ambientais do ensaio, bem como o cuidado com o manuseio e limpeza dos corpos de prova.

O banco de ensaio de desgaste tipo pino-disco ilustrado na Figura 3.4 é formado basicamente pelos seguintes elementos: base de regulagem do raio de teste, haste de aplicação de carga, haste porta – pino, prato porta – disco, célula de carga e sistema de controle de umidade e temperatura.

A velocidade de deslizamento do par tribológico no teste de desgaste é obtida regulando-se a rotação do prato porta-disco e a base de regulagem do raio de teste. No presente trabalho a base de regulagem permaneceu fixa no diâmetro de 70,5 mm e a velocidade do prato porta-disco foi controlada por um tacômetro da marca Instrutherm TCR 8000.

A aplicação da carga normal é executada por peso morto, sobre uma haste que prende o pino de prova, comprimindo o mesmo contra a superfície do disco. A haste de aplicação de carga é guiada por um furo no braço de atrito, sendo a eliminação da rotação da mesma durante os ensaios, feita por um pequeno guia em posição paralela a haste. A Figura 3.5 ilustra o sistema de aplicação de carga, com detalhes do braço de atrito e detalhes da haste de aplicação de carga e do porta pino de prova.

A variação da umidade relativa e temperatura no ambiente de teste são monitoradas por uma sonda termo higrométrica Instrutherm HTR 152.

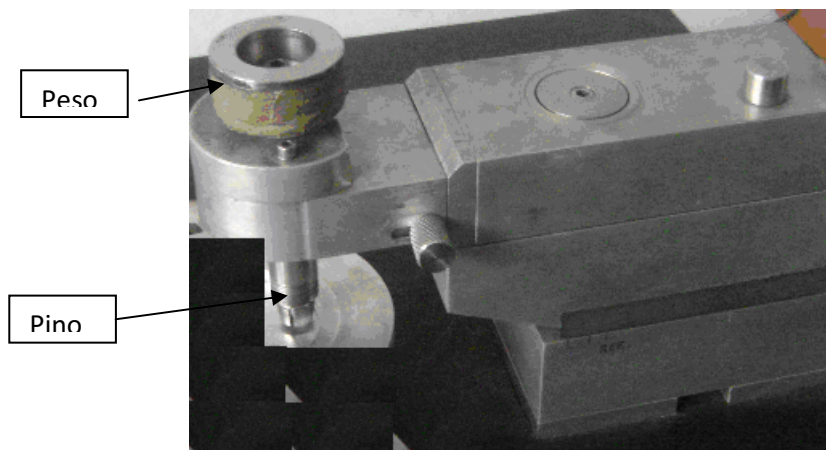


Figura 3.5 – Suporte da célula de carga

3.5.1 Calibração do banco de ensaio de desgaste

Para que o trabalho tivesse total confiabilidade nos resultados dos ensaios realizados no banco de ensaio de desgaste, foram feitas as seguintes calibrações:

a) Peso de aplicação de carga: O peso utilizado para a aplicação do carregamento sobre o pino de ensaio foi calibrado por pesagem em balança de precisão de $\pm 0,1$ mg.

b) Velocidade na borda do porta - disco: Determinada por um tacômetro digital da marca Instrutherm. Para o sistema em operação de deslizamento pino-disco, determinou-se um desvio médio de ± 3 rpm.

3.5.2 Parâmetros do ensaio

Os ensaios de desgaste foram executados para o par ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 x ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC sujeito as condições da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros de teste (velocidade, carga e distância total deslizada)

Velocidades (m/s)	Carga (N)	Distância total deslizada (m)
0,5	5	18000
1,0	5	18000
1,5	5	18000

O teste de desgaste foi realizado em condições não lubrificadas, em etapas com percurso de deslizamento de 3000 m, temperatura ambiente e umidade relativa entre 48 - 52%.

Antes de cada etapa (de 3.000 m), os corpos de prova, tanto o pino quanto o disco, foram limpos com álcool etílico em banho de ultrassom e posteriormente determinado suas massas por meio de uma balança analítica de precisão Shimadzu AY 220, com capacidade máxima de 220g e precisão de 0,1 mg.

Com os parâmetros de testes, tais como carga, velocidade e distância de deslizamento estabelecidos e ajustados, o controle das variáveis e a aquisição dos dados foram feitos manualmente.

Em seguida, os corpos de prova foram montados nos respectivos suportes, o ambiente foi protegido por uma campânula acrílica, e a umidade controlada no interior da mesma. Após cada etapa, os corpos de prova foram novamente limpos em banho de ultrassom com álcool etílico, onde se procedeu a pesagem dos mesmos.

NOTA: Para cada velocidade avaliada foram empregados novos corpos de prova.

3.5.3 Medidas de Desgaste

A quantificação do desgaste tanto no pino quanto no disco pode ser feita através da taxa e coeficiente de desgaste. O coeficiente de desgaste K^* é definido pelo volume de desgaste por unidade de carga e por unidade de distância de deslizamento, conforme ilustrado pela equação (3.1), com unidades usuais para K em $[\text{mm N}^{-1}\text{m}^{-1}]$, sendo o volume de desgaste V em $[\text{mm}^3]$, a carga W em $[\text{N}]$ e a distância de deslizamento X em $[\text{m}]$.

$$K^* = V / XW \quad (3.1)$$

Na avaliação do desgaste considerando-se o coeficiente de desgaste K^* , admite-se que o desgaste seja proporcional a carga normal e a distância de deslizamento, entretanto, isto nem sempre ocorre. No entanto, sua utilização torna-se aceitável, desde que não ocorram alterações significativas do mecanismo de desgaste envolvido durante o deslizamento. O volume de desgaste neste estudo seja para o pino como para o disco, foi determinado em função da diferença de massa antes e após cada etapa de teste, e da respectiva densidade média dos materiais do par tribológico.

Determinado o volume de desgaste em cada etapa de teste, têm-se o comportamento do volume de desgaste acumulado nas várias etapas em função da distância de deslizamento acumulada, onde se obtém em geral um estado de desgaste não linear (**running**), seguido de um estado de desgaste linear ou de taxa de desgaste

estacionária. A taxa de desgaste K é definida pelo volume perdido por unidade de distância, e os valores da taxa de desgaste podem ser obtidos por meio da equação (3.2), cujo valor de θ pode ser obtido através da linearização da curva no estado de desgaste estacionário (vide Figura 2.16).

$$K = \tan \theta = V / X \quad (3.2)$$

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios pino-disco dos materiais ferro fundido cinzento centrifugado (pinos) contra os discos em ferro fundido cinzento MC 12 e MC 13.

Além disso, busca-se apresentar dados sobre a composição química e microestrutural dos materiais, valores de desgaste do par pino–disco (taxa de desgaste), comportamento dos mecanismos de desgaste atuantes, baseando-se na análise das morfologias das regiões desgastadas (pino e disco), estabelecendo uma ampla discussão.

4.1 Composição química

A composição química dos materiais utilizados no presente trabalho pode ser observada abaixo (Tabela 4.1). Vale lembrar que, a composição química está de acordo com a especificação para cada um dos materiais, e em todas as ligas o balanço é de ferro.

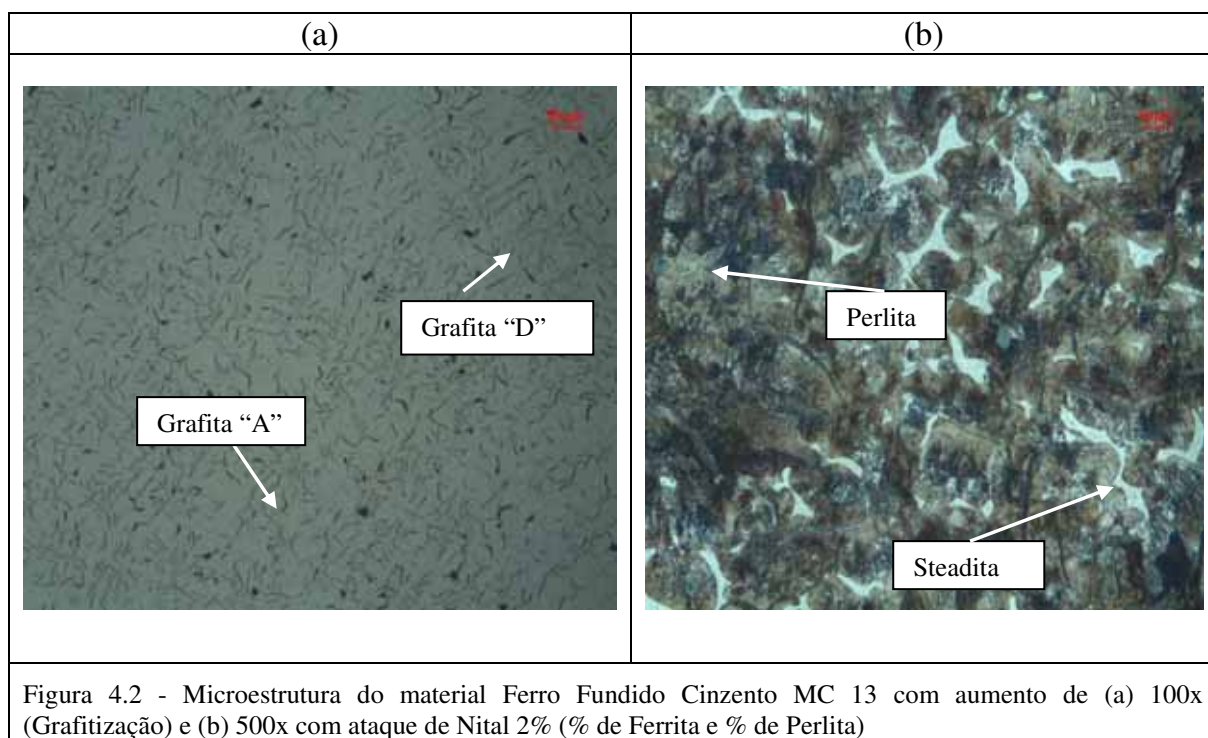
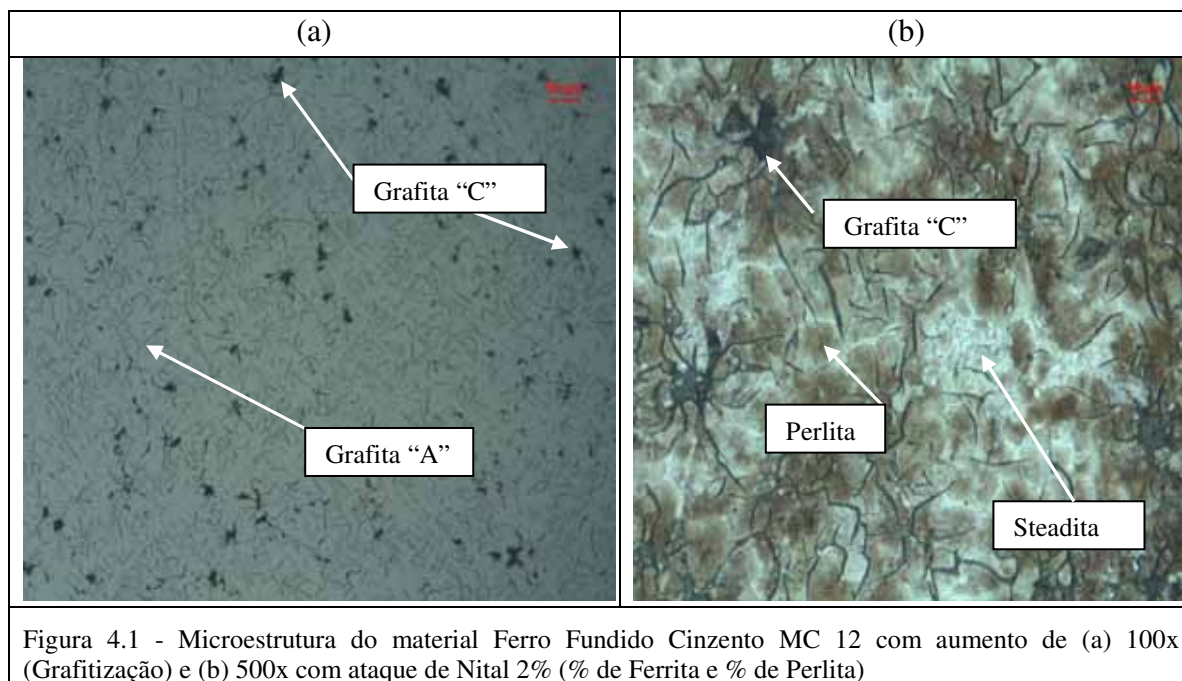
Tabela 4.1 - Composição química dos materiais

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
MC 12	3,72	2,46	0,67	0,39	0,043	0,98	0,19	0,11
MC 13	3,24	2,28	0,68	0,34	0,065	0,72	0,36	0,06
Centrifugado	3,35	1,82	0,71	0,39	0,07	-	0,28	0,41

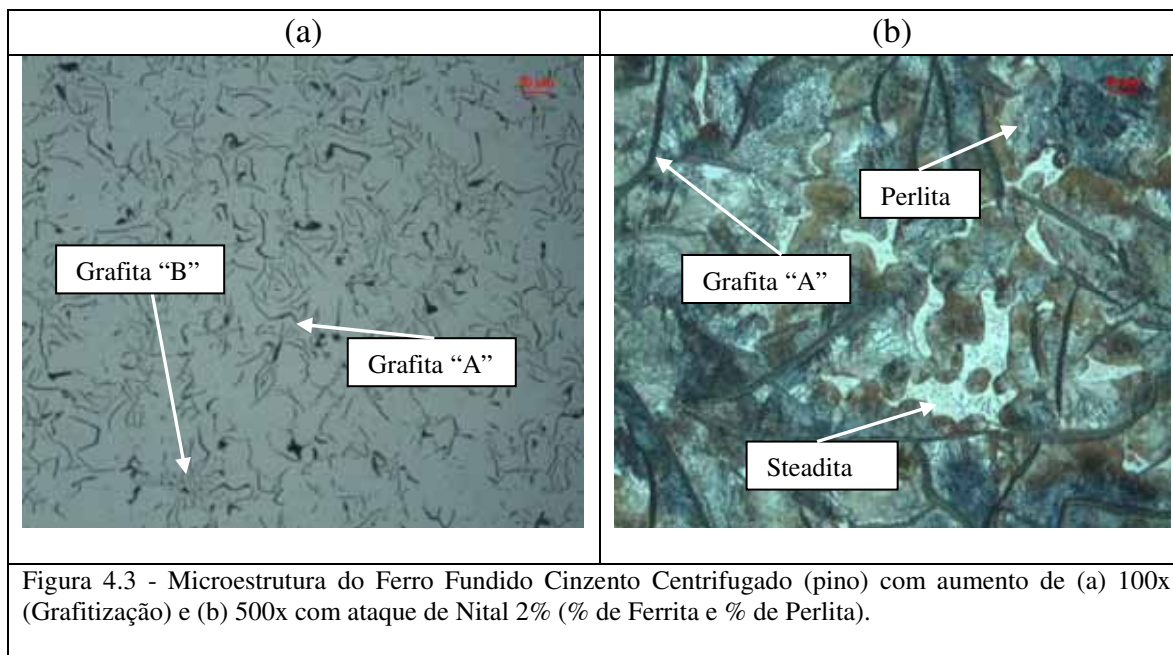
4.2 Caracterização da microestrutura

A homogeneidade microestrutural foi avaliada através da distribuição de grafitas e percentual de fases como ferrita, perlita e steadita, que permitem acompanhar a influência desses constituintes no desgaste dos materiais. Detalhes das análises qualitativas das fases presentes podem ser observadas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, para os materiais ferro fundido cinzento MC 12 (disco), ferro fundido cinzento MC 13 (disco) e ferro fundido cinzento centrifugado (pino). Nas Figuras 4.1a e 4.1b podemos observar que o material ferro fundido cinzento MC 12 é constituído de grafitas predominantes tipo “A”, com pequenas frações de grafita tipo “C” e matriz perlítica

com aproximadamente 2% de Ferrita livre e rede de Steadita descontínua uniformemente distribuída, respectivamente.



Para o material ferro fundido cinzento MC 13 (Figuras 4.2 a e 4.2b), podemos observar que a grafitação é predominante tipo D e E, com pequenas frações de grafita tipo A, e que a matriz é perlítica com no máximo 2% de Ferrita livre e rede de Steadita descontínua e homogênea. As Figuras 4.3a e 4.3b mostram a microestrutura do material do pino (ferro fundido cinzento centrífugo), com grafitação predominante tipo A e B, e matriz perlítica.



Observando-se as microestruturas, concluímos que os três materiais estão de acordo com as especificações, que a razão de Ferrita presente nos materiais é igual (com no máximo 2%) e matriz perlítica. A diferença básica entre eles são os tipos de grafita. O material ferro fundido cinzento MC 12 tem como característica grafitas mais grosseiras (tipo A e C), já o material ferro fundido cinzento MC 13 é formado por grafitas menores e finas, tipo A, D e E.

4.3 Resultados de desgaste

Para determinação das taxas de desgaste, primeiramente foram coletados os valores em gramas da perda de massa conforme descrito no item 3.5.2 (tabelas 1 e 2 do anexo). Os valores da perda de massa em função da distância deslizada foram plotados em gráficos (figuras 1 a 4 do anexo) e posteriormente linearizados para obtenção dos valores da taxa de desgaste ($K = \text{tg}$), como mostrado nas figuras de 5 a 8 do anexo.

4.3.1 Resultados da taxa de desgaste (mm^3/m) dos pares tribológico Ferro Fundido Cinzento Centrifugado x Ferro Fundido Cinzento MC 12 e Ferro Fundido Cinzento Centrifugado x Ferro Fundido Cinzento MC 13

O comportamento da taxa de desgaste em função da velocidade de deslizamento para os pares tribológicos ferro fundido cinzento centrifugado/ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13 são ilustrados pelas Figuras 4.4 e 4.5. Para os discos MC 12 (do par Centrifugado/ MC 12) e MC 13 (do par Centrifugado/ MC 13) podemos observar que, com o aumento da velocidade de deslizamento ocorre à queda da taxa de desgaste em ambos os pares tribológicos, no entanto, é mais uniforme (comportamento retilíneo) no material ferro fundido cinzento MC 12.

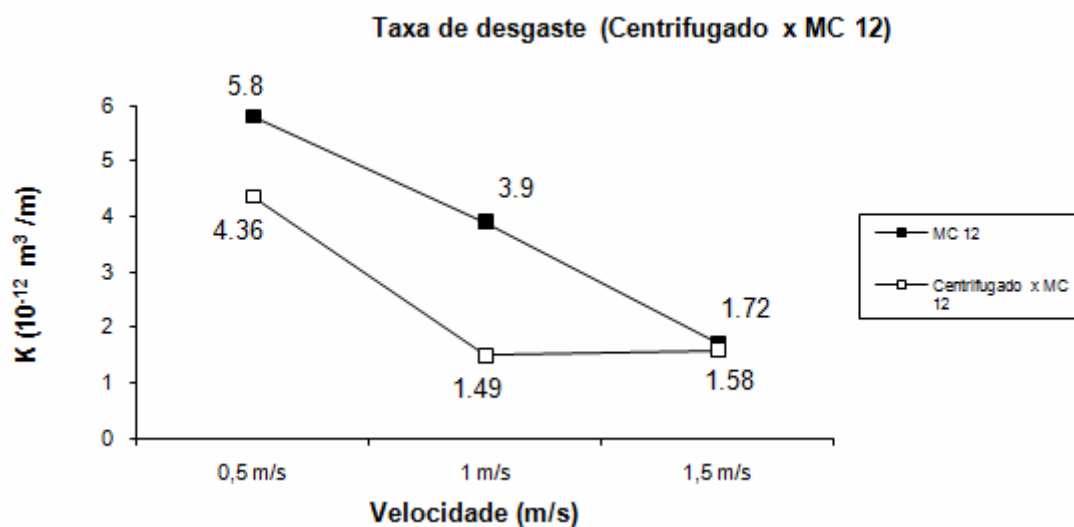


Figura 4.4 - Taxa de desgaste do par FoFo Cinzento Centrifugado x FoFo Cinzento MC 12

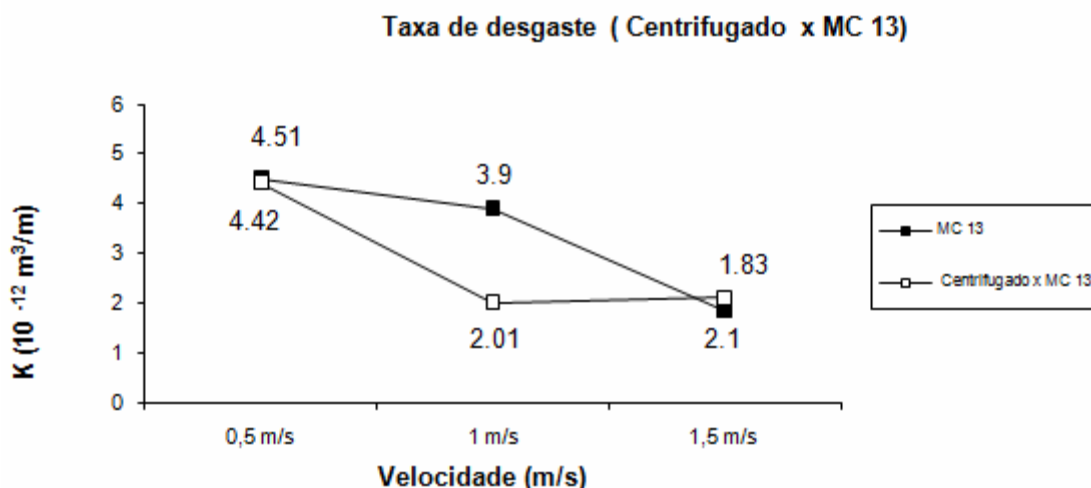


Figura 4.5 - Taxa de desgaste do par FoFo Cinzento centrifugado x FoFo Cinzento MC 13

Para os pinos, pode-se observar uma queda na taxa de desgaste até 1,0 m/s, com tendência de estabilização e inversão da curva em 1,5 m/s.

O par centrifugado/ MC 13 apresenta taxas de desgaste, entre o pino e o disco, mais próximas do que as taxas de desgaste do par centrifugado/ MC 12, no entanto, pode-se concluir que avaliando o desempenho dos pares com relação à resistência ao desgaste, que o par centrifugado/MC 13 apresenta melhor desempenho a 0,5 m/s e o par centrifugado/ MC 12 nas velocidades de 1,0 e 1,5 m/s.

4.3.2 Resultados comparativos entre os discos MC 12 e MC 13 dos pares tribológicos Centrifugado/ MC 12 e Centrifugado/ MC 13

Nesse tópico será apresentado o gráfico comparativo (Figura 4.6) da taxa de desgaste dos materiais MC 12 e MC 13. Como descrito no item 4.3.1, a taxa de desgaste dos materiais é decrescente e retilíneo com o aumento da velocidade de deslizamento.

Nas velocidades de deslizamento de 1,0 e 1,5 m/s os materiais MC 12 e MC 13 apresentam taxas de desgaste similares, uma vez que nessas velocidades prevalece o mecanismo de oxidação, formando uma camada de óxido sobre a superfície que separa as superfícies do pino e do disco, evitando o contato entre as asperidades (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001). No entanto, na velocidade de 0,5 m/s, no

qual prevalece o mecanismo de desgaste por adesão, observa-se uma diferença significativa entre as taxas de desgaste dos materiais, com o material MC 12 se desgastando mais que o material MC 13. Essa diferença pode ser justificada por:

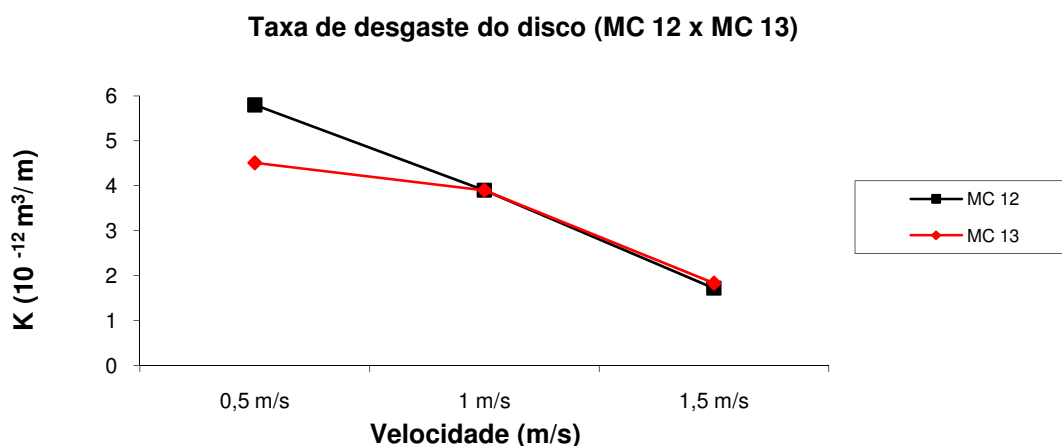


Figura 4.6 - Taxa de desgaste dos discos FoFo MC 12 x FoFo MC 13

a) O material MC 12 apresenta menores valores de módulo de elasticidade e tensão de ruptura, possibilitando assim maiores deformações das asperidades e maior coeficiente de atrito;

b) A presença de grafitas mais grosseiras (tipo C, por exemplo) no material MC 12. De acordo com Takeuchi (1968) e Valdiraj (2000), quanto maior o tamanho e espaços entre as grafitas, maiores serão as taxas de desgaste e menor a resistência à tração.

c) Outro importante ponto é que o material MC 13 possui maiores quantidades de elementos formadores de carbonetos (Cr e Mo = 0,42%) do que o material MC 12 (Cr e Mo = 0,30%). Como citado nos itens 2.4.1 e 2.5.3.2, carbonetos são fases duras que aumentam a resistência ao desgaste quando presentes nos materiais.

d) Ambos os materiais apresentaram em suas microestruturas 2% de ferrita livre e rede uniforme e descontínua de steadita.

4.3.3 Resultados comparativos entre os pinos de FoFo Centrifugado ensaiados contra os materiais MC 12 e MC 13

De acordo com a Figura 4.7 pode-se observar um comportamento similar das taxas de desgaste dos pinos em ferro fundido cinzento centrifugado deslizado contra os discos ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento MC 13, onde a taxa de desgaste decresce da velocidade de 0,5 m/s para 1,0 m/s e aumenta ligeiramente na velocidade de 1,5 m/s. Esse aumento da taxa de desgaste após a velocidade de 1,0 m/s pode ser explicado segundo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001) e (WILSON; STOTT, 1981) pelo fato dessa velocidade ser considerada crítica para materiais metálicos, pois a partir dessa velocidade há uma mudança no mecanismo de desgaste e na taxa de desgaste.

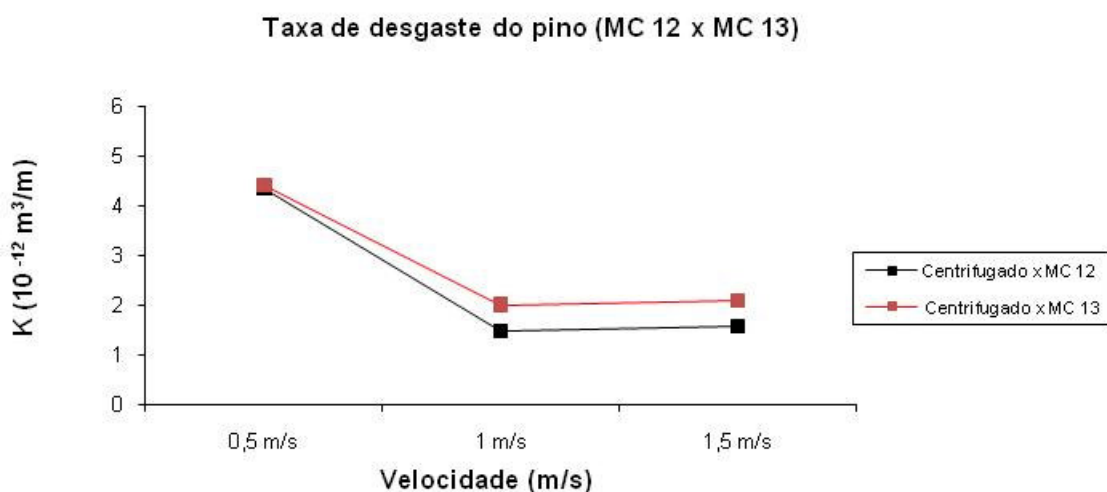


Figura 4.7 - Taxa de desgaste dos pinos ensaiados contra (FoFo MC 12 e FoFo MC 13)

Entre 0,5 m/s e 1,0 m/s a temperatura entre as superfícies sobe e promove a formação de uma camada de óxido que protege a superfície dos materiais, diminuindo o desgaste. Acima de 1,0 m/s a camada de óxido cresce demais, tornando-se frágil. A carga aplicada e a tensão de corte provocado pelo deslizamento levarão ao rompimento dessa camada, aumentando a taxa de desgaste. Esse processo é ainda mais dinâmico

nos pinos, pois eles estão sempre em contato com a superfície dos discos, portanto estão mais sujeitos a altas temperaturas e maiores contatos entre as asperidades.

Os pinos em ferro fundido cinzento centrifugado ensaiados contra o disco em MC 13 apresentaram um desgaste ligeiramente maior do que os pinos ensaiados contra o material MC 12. Como dito anteriormente (no item 4.3.2), o material ferro fundido cinzento MC 13 possui maiores quantidades de elementos formadores de carbonetos (Cr e Mo = 0,42%) do que o material ferro fundido cinzento MC 12 (Cr e Mo = 0,30%), que podem aumentar a resistência ao desgaste do material e aumentar a taxa de desgaste do componente em contato. Outra explicação para um maior desgaste do material centrifugado deslizado contra o material MC 13 é que o material MC 13 possui grafitas menores, liberando assim menos carbono para superfície de contato, diminuindo o efeito da lubrificação sólida.

4.4 Resultados das observações microscópicas das superfícies desgastadas

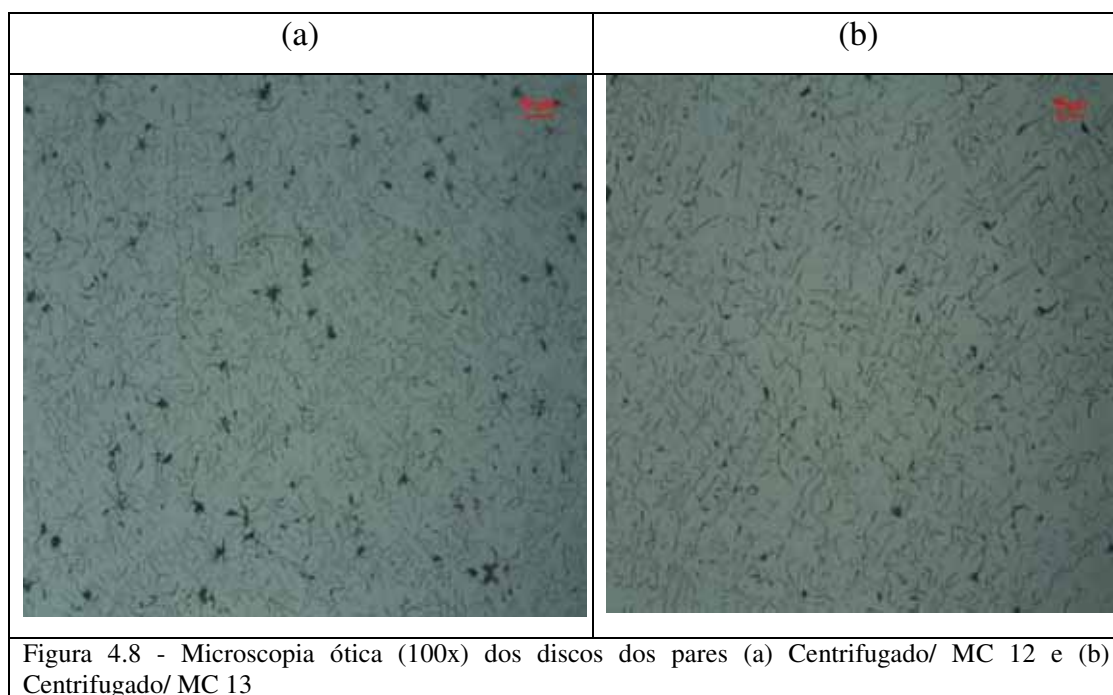
As observações microscópicas das superfícies desgastadas dos discos em ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento MC 13 e do pino em ferro fundido centrifugado foram realizadas dentro de uma faixa de magnitude de aumento de 100 a 5.000 vezes, com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se as técnicas de análise por elétrons retro espalhados e EDS, possibilitando assim a observação de detalhes com melhor definição.

- a) Centrifugado/ MC 12 e Centrifugado/ MC 13 deslizados a uma velocidade de 0,5 m/s
- b) Centrifugado/ MC 12 e Centrifugado/ MC 13 deslizados a uma velocidade de 1,0 m/s
- c) Centrifugado/ MC 12 e Centrifugado/ MC 13 deslizados a uma velocidade de 1,5 m/s

a) Micrografias das superfícies desgastadas dos pares tribológicos deslizados a velocidade de 0,5 m/s

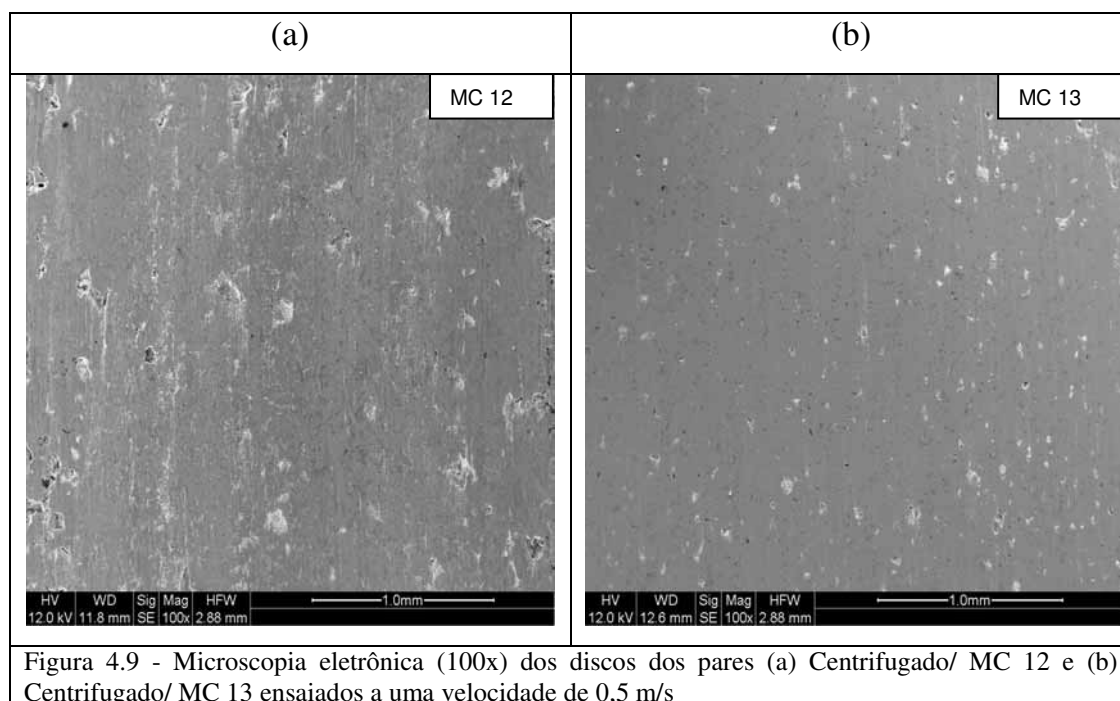
As Figuras 4.8 a 4.16 ilustram detalhes da microestrutura e da superfície desgastada dos pares tribológicos ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13 deslizados a 0,5 m/s, com aumento de 100 a 5.000 x.

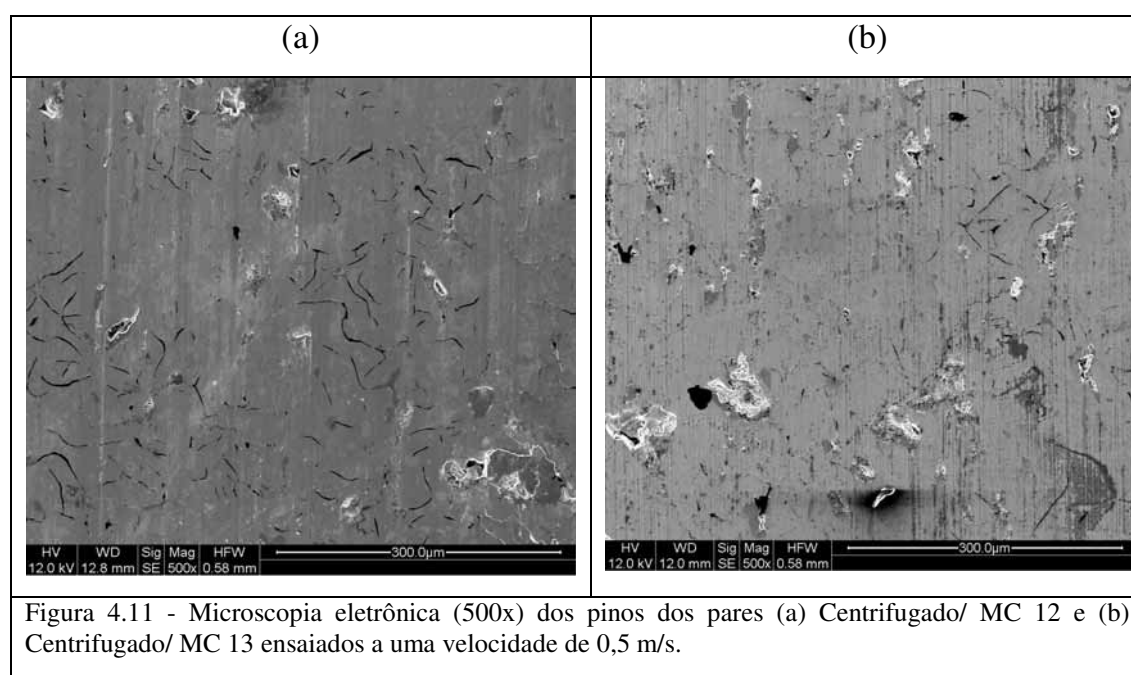
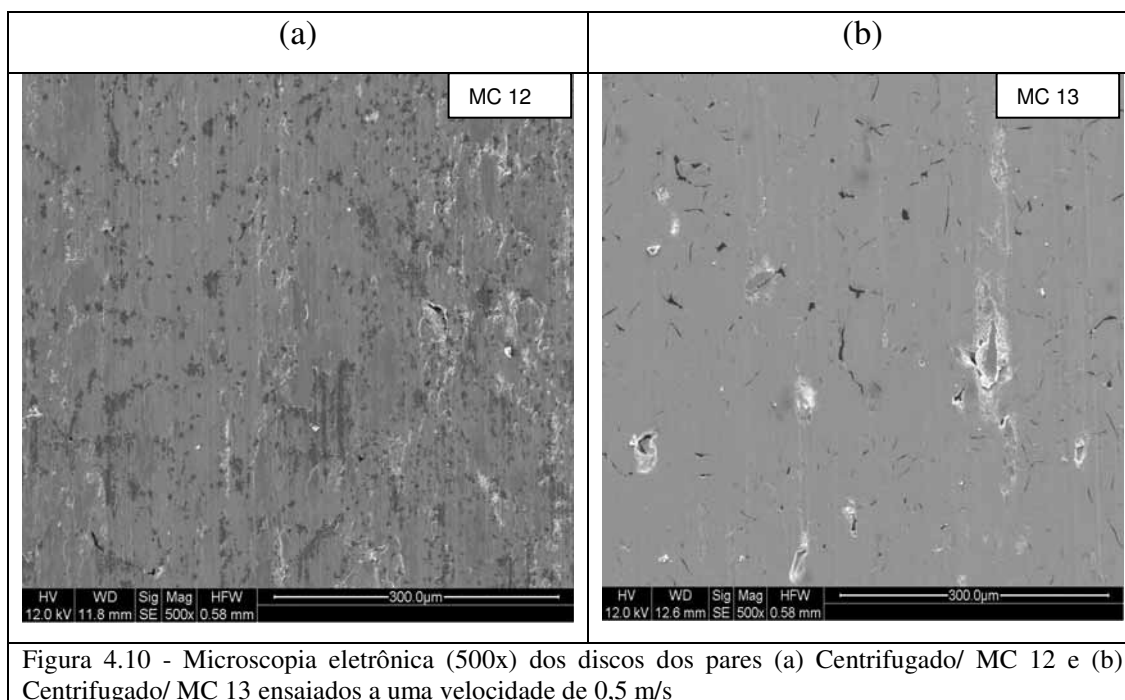
A Figura 4.8 representa a microestrutura dos materiais MC 12 e MC 13 no estado bruto, antes de iniciar o deslizamento. Assim como mostrado e descrito nas Figuras 4.1 e 4.2, pode-se observar a presença de grafitas em quantidades, tamanhos e distribuição referente a cada tipo de material.

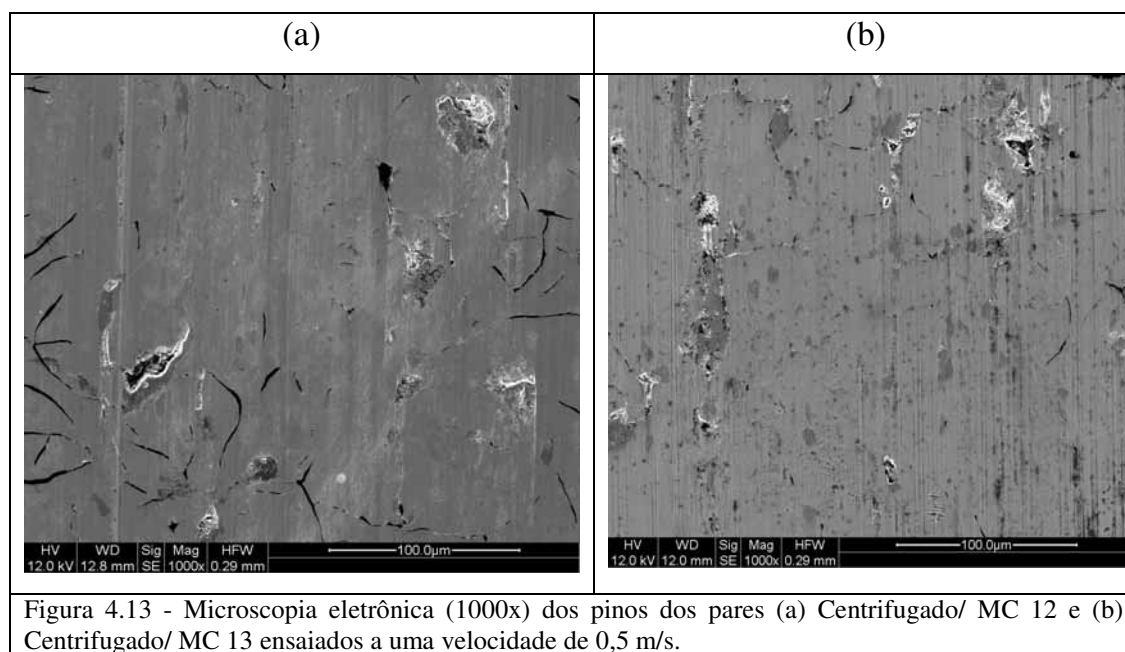
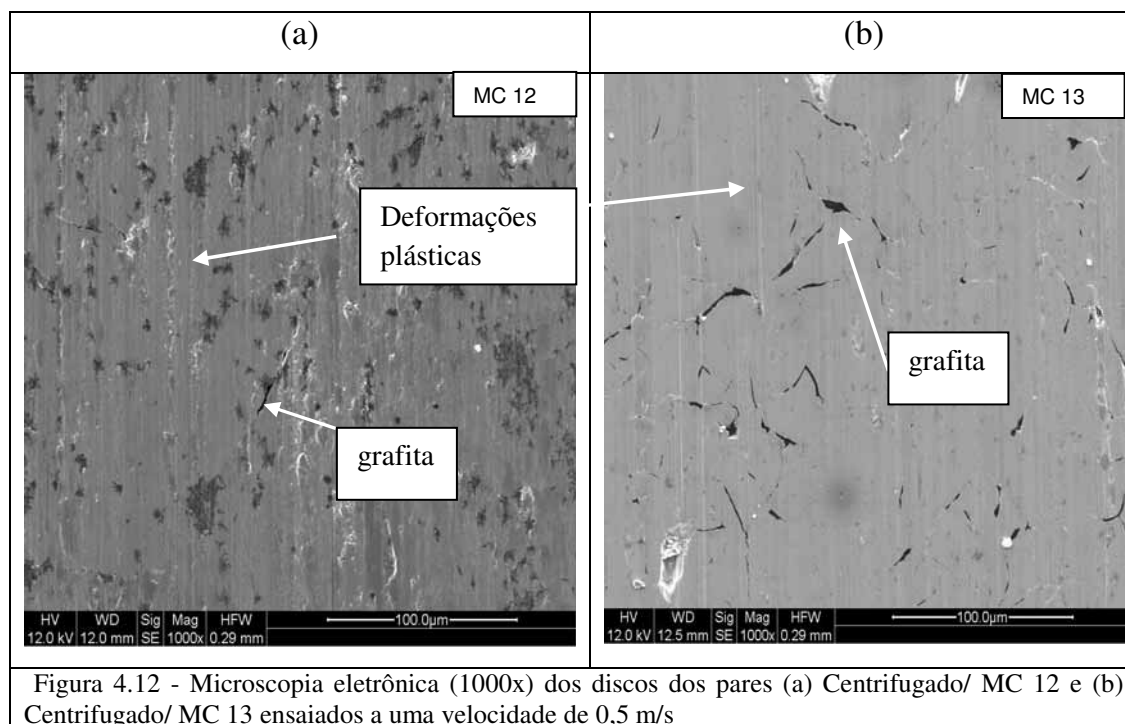


Nas Figuras 4.9 a 4.13 pode-se observar detalhes gerais das superfícies, tais como: presença de porosidades, grafitas e de uma tribocamada depositada sobre a superfície. Leves deformações plásticas na direção de deslizamento também são observadas, evidenciando o desgaste dos materiais.

A fina tribocamada depositada sobre a superfície desgastada dos materiais, e que é evidenciada nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, é produto da adesão entre os materiais Centrifugado/ MC 12 e Centrifugado/MC 13, já que na velocidade de 0,5 m/s o fino filme de óxido é formado e rapidamente removido, e a partir daí prevalece o contato entre as asperidades, originando as partículas do desgaste contendo os materiais do pino e do disco (WILSON, STOTT; 1980).

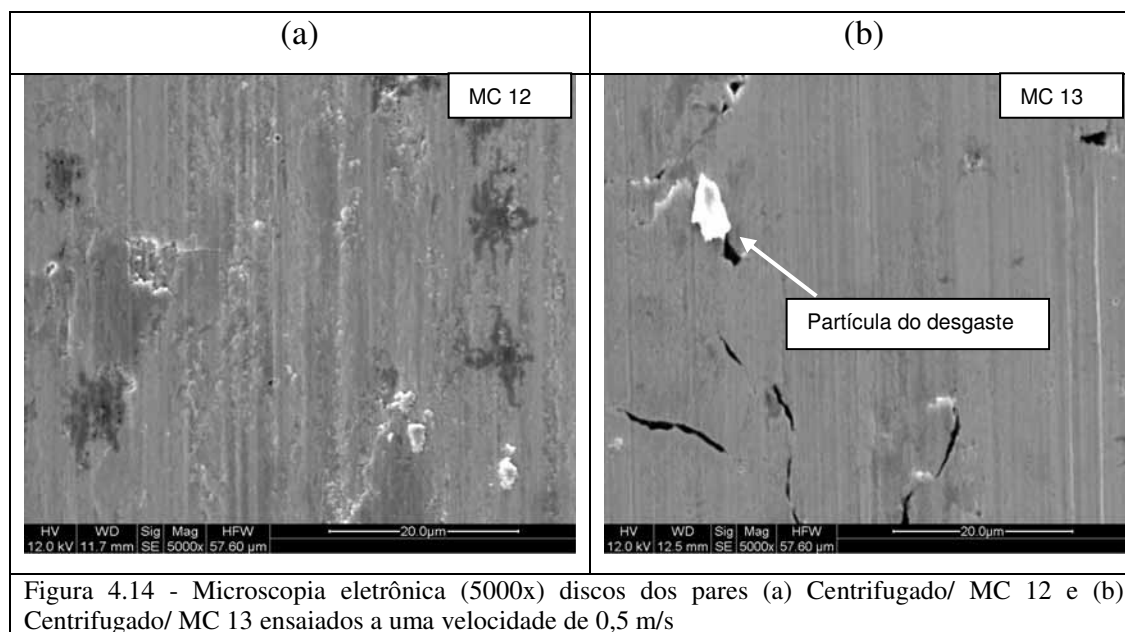




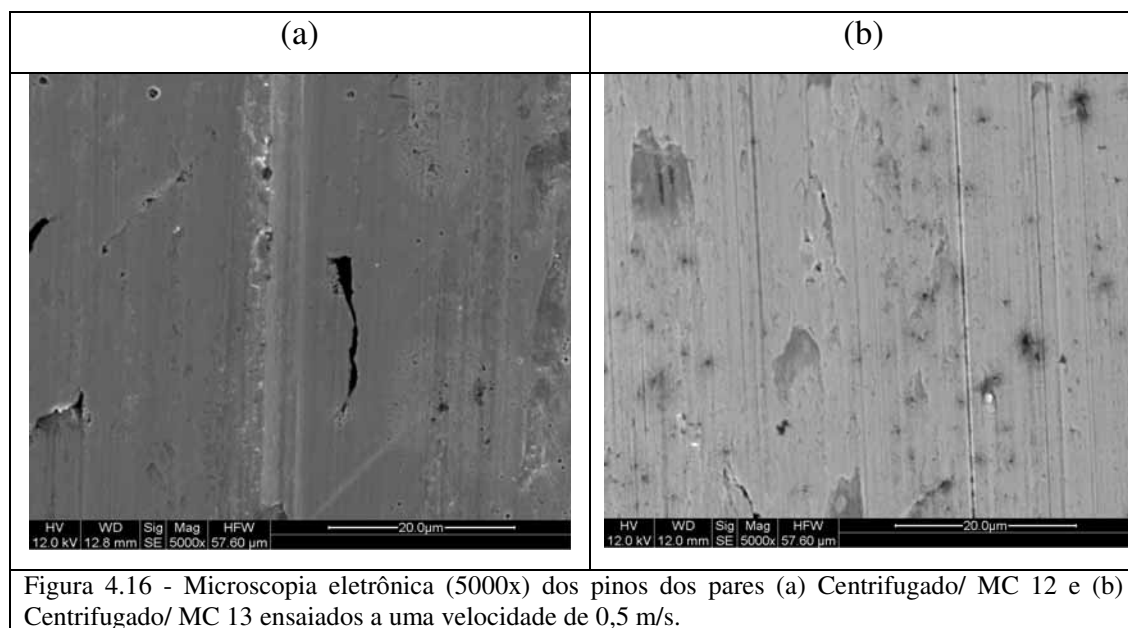
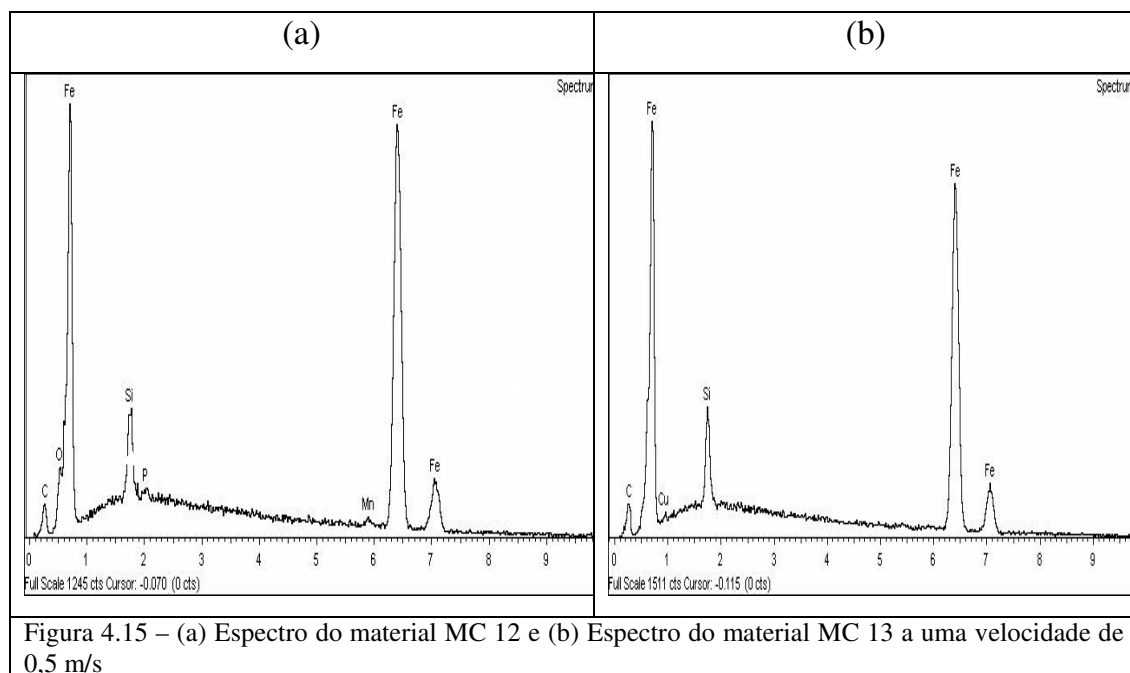


Na Figura 4.6, o gráfico da taxa de desgaste entre os materiais MC 12 e MC 13 mostra que o material MC 12 apresenta maior taxa de desgaste a velocidade de 0,5 m/s. A evidência de que o material MC 12 apresentou maior taxa de desgaste está na presença de deformações plásticas mais intensas, como pode ser observado na figura

4.14. Além das deformações plásticas, pode-se observar na Figura 4.14 (b) a presença de partículas do desgaste sobre a superfície, característica do mecanismo de adesão.

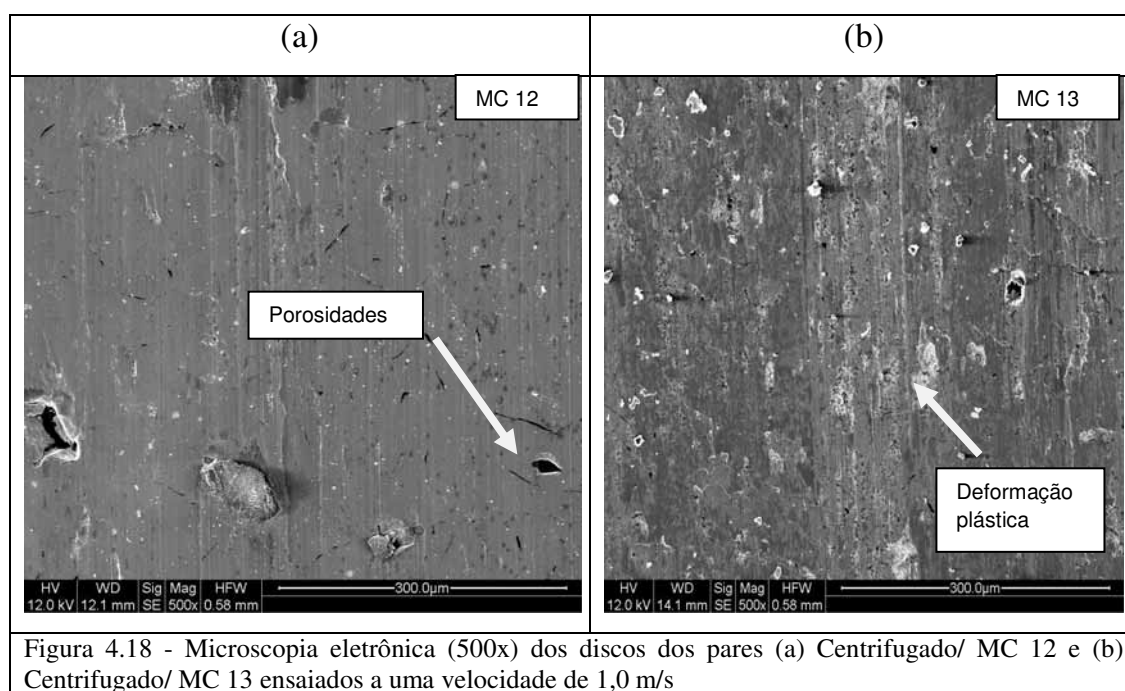
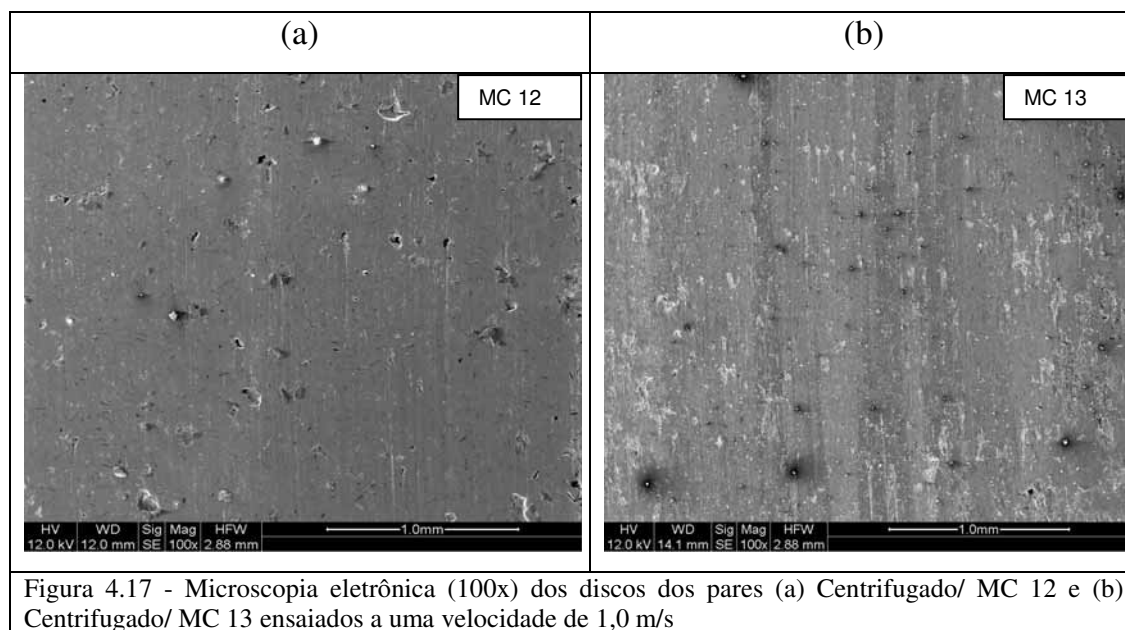


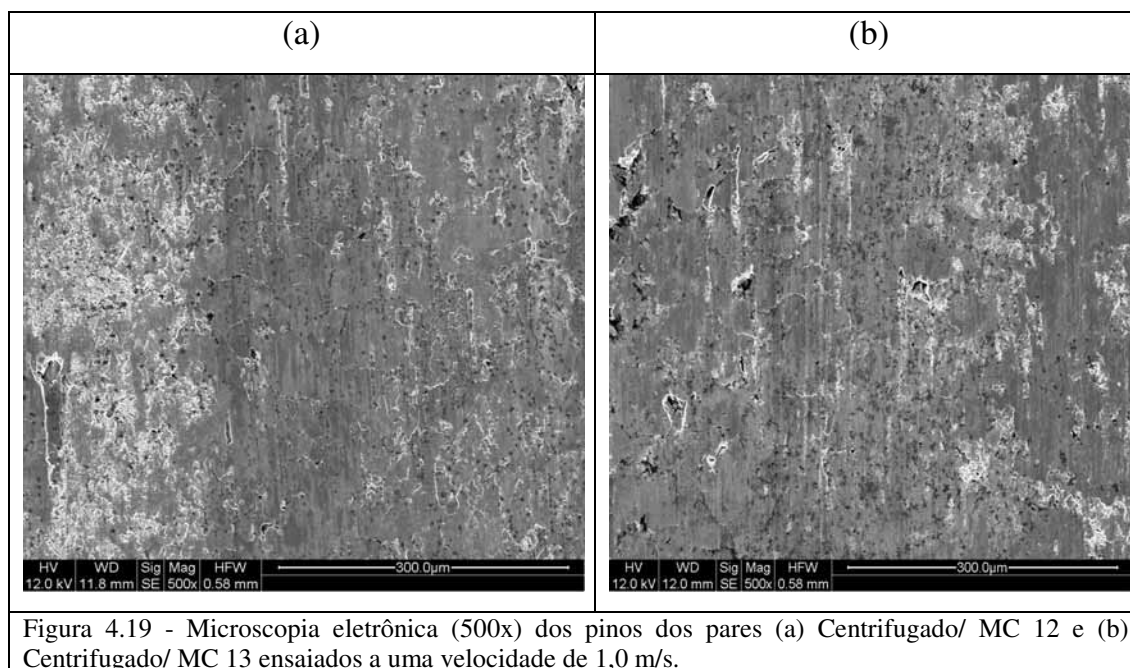
A Figura 4.15 mostra o espectro da superfície desgastada dos materiais MC 12 (Centrifugado/ MC 12) e MC 13 (Centrifugado/ MC13) contendo somente os elementos químicos especificados para os materiais. Não foi possível observar a presença do elemento oxigênio, evidenciando assim que a superfície desgastada não foi oxidada.



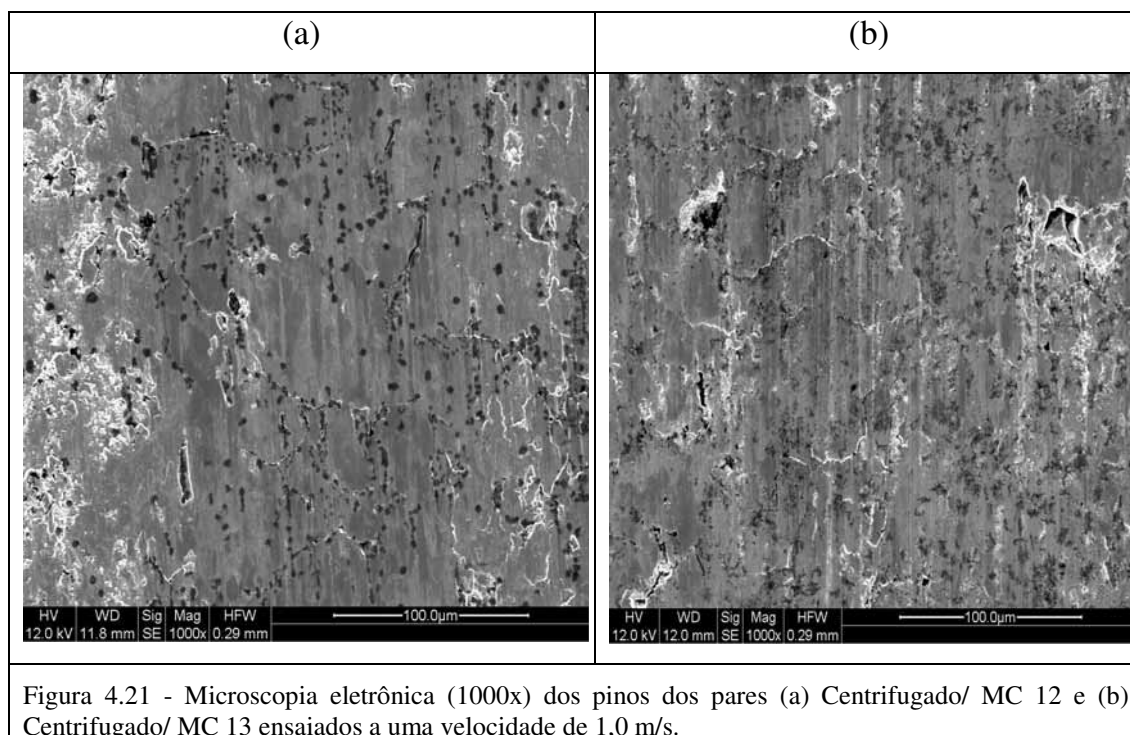
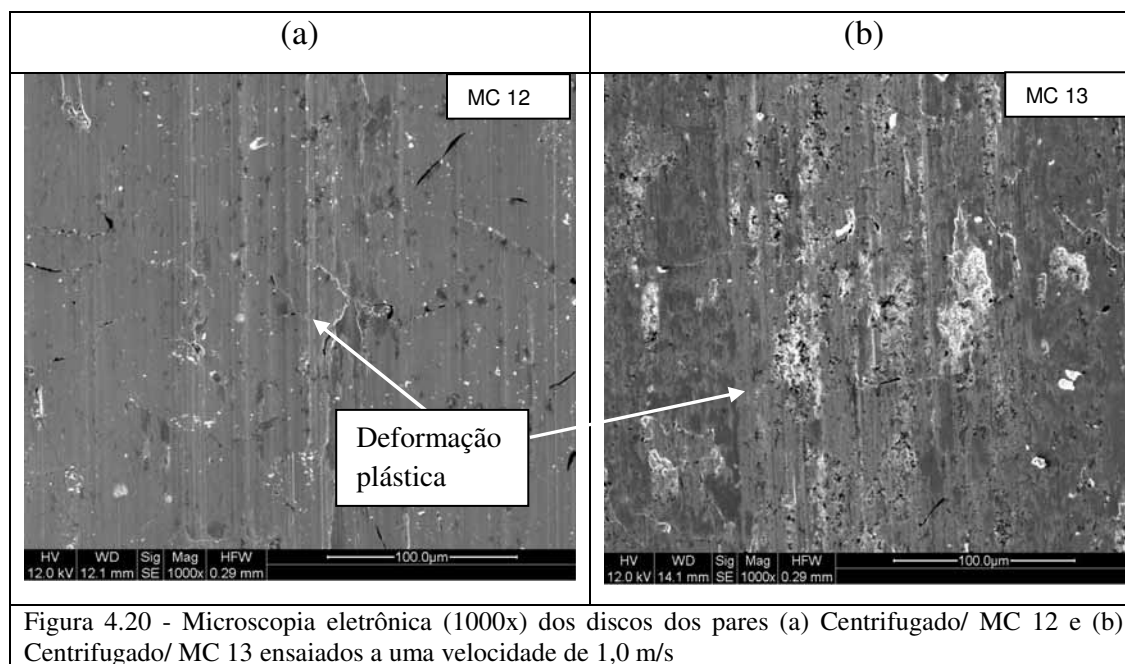
As Figuras 4.17 a 4.24 ilustram as micrografias das superfícies desgastadas dos pares ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13 a uma velocidade de 1,0m/s.

Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 podemos observar a presença de uma tribocamada (metal + oxidação), deformação plástica, porosidades e pequenas partículas provenientes do desgaste sobre a superfície dos materiais.



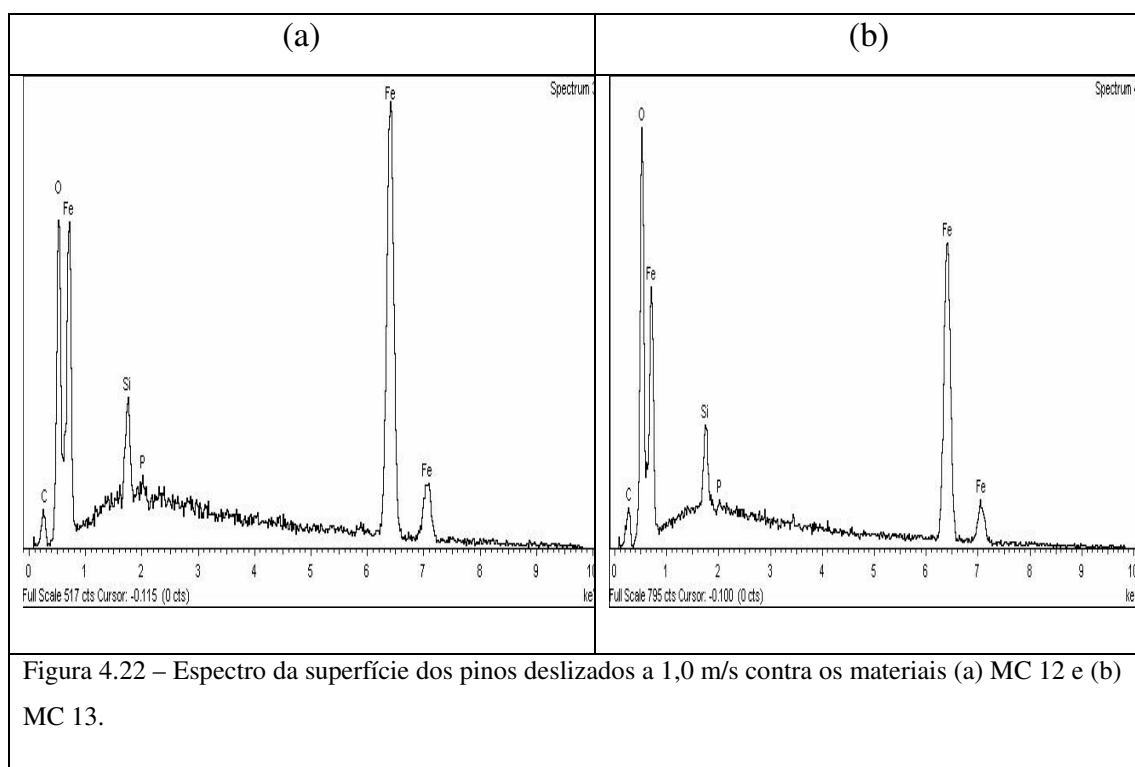


A tribocamada depositada sobre as superfícies dos materiais deslizados a velocidade de 1,0 m/s é mais intensa do que nos materiais deslizados a 0,5 m/s, uma vez que nas Figuras 4.17 a 4.19 não se pode visualizar a presença de grafitas e porosidades na superfície dos materiais. Nessa velocidade de deslizamento o contato entre as asperidades se torna mais freqüente, o que aumenta a quantidade de material transferido de uma superfície para outra.



Na Figura 4.21 pode-se observar que a tribocamada recobre toda a superfície do material, impossibilitando a visualização da matriz. A composição química da superfície da Figura 4.21 obtida através da análise via EDS mostra a presença de

elementos químicos como: Fe, Si, C e P. Esses elementos, no entanto são básicos na composição do ferro fundido cinzento centrifugado. A presença de oxido indica que houve oxidação, porem a oxidação se da na superfície das partículas desgastadas e não pela formação de um filme de óxido, como descrito na Figura 2.24.



Com aumento de 5000 x (Figura 4.23) pode-se observar a presença de finas e dispersas partículas provenientes do desgaste, além de deformação plástica gerando pequenas ranhuras. Assim como descrito no item 2.5.7.3, em velocidades iguais ou menores que 1,0 m/s os óxidos fraturados e partículas metálicas oxidadas formam as chamadas “ilhas” de óxido na superfície. Já na Figura 2.24 não possível observar a presença de partículas ou deformações plásticas, mas sim a deposição de tribocamada sobre a superfície dos pinos (WILSON, STOTT; 1980).

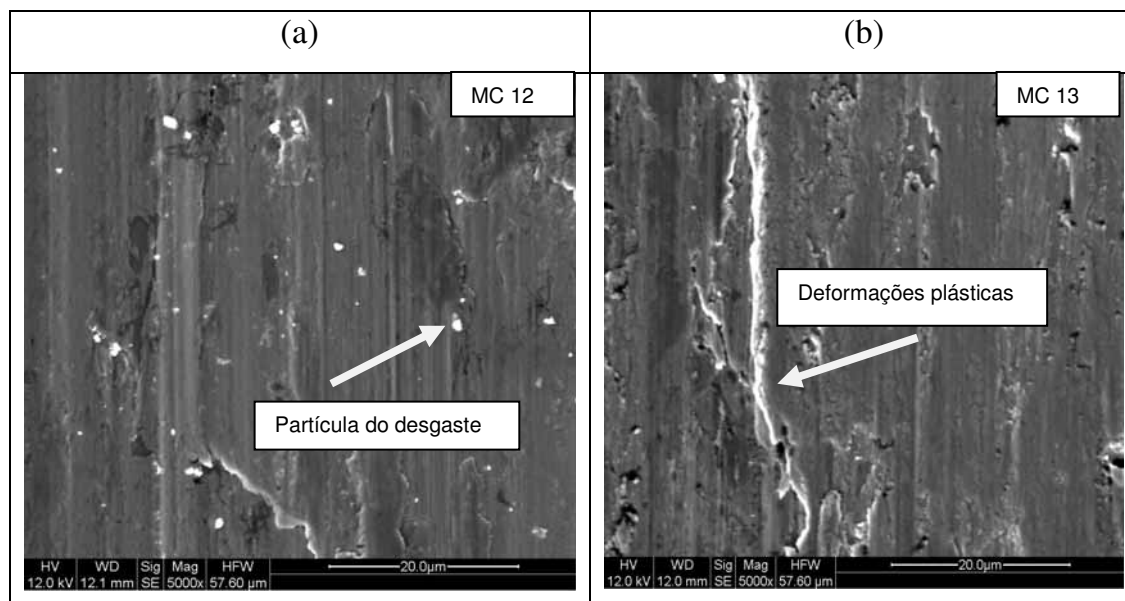


Figura 4.23 - Microscopia eletrônica (5000x) dos discos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s

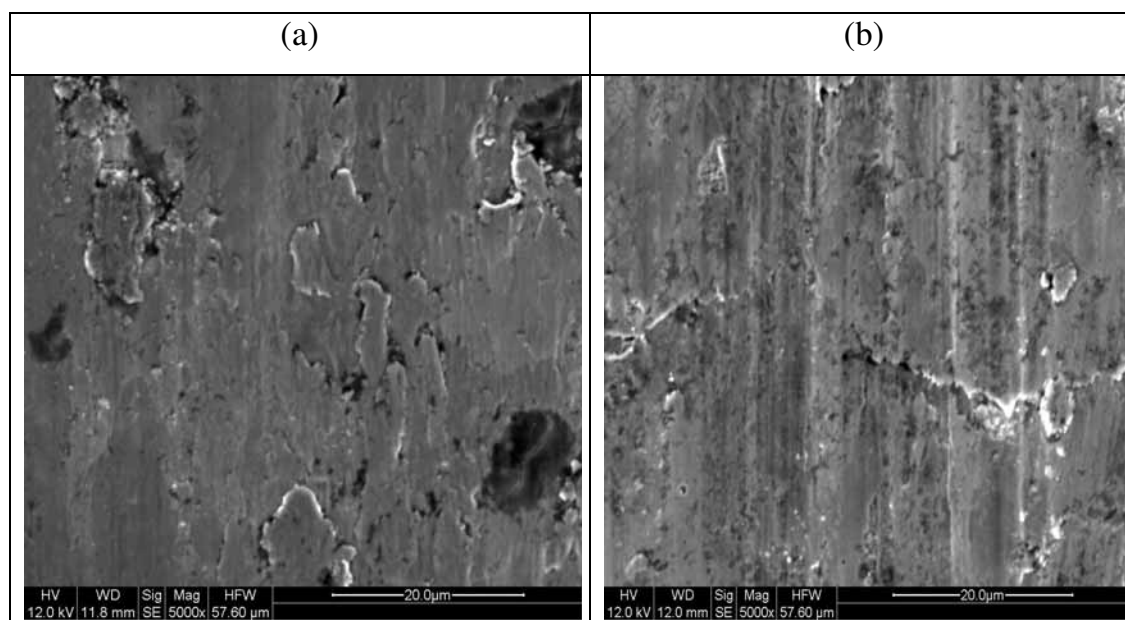
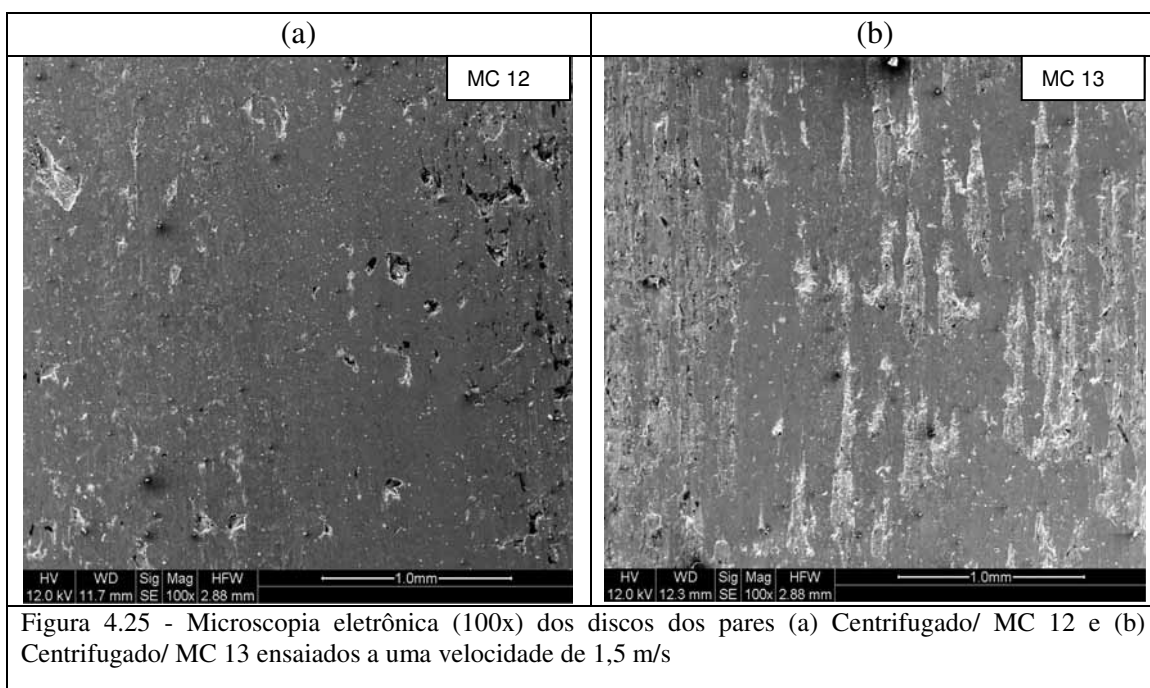
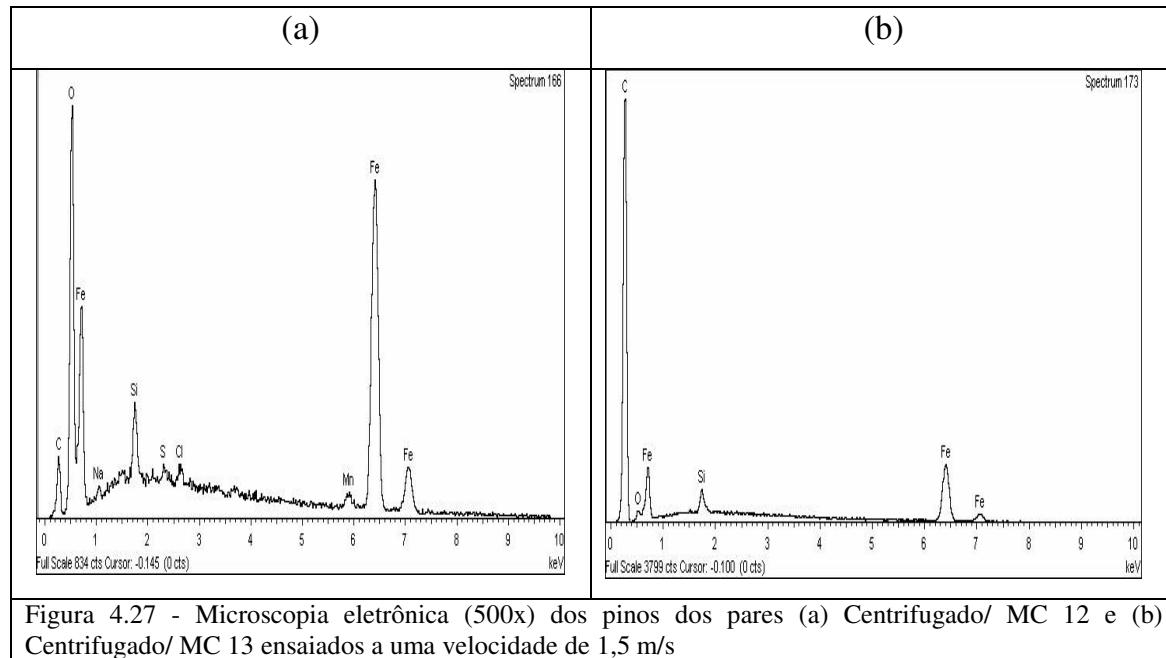
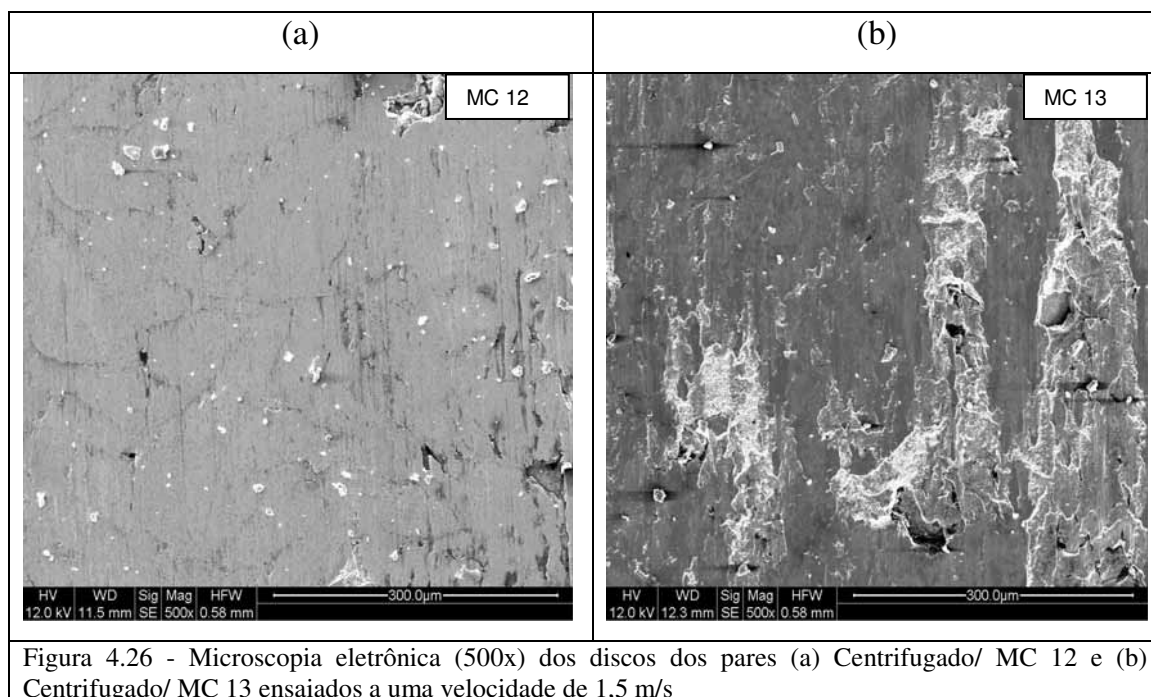


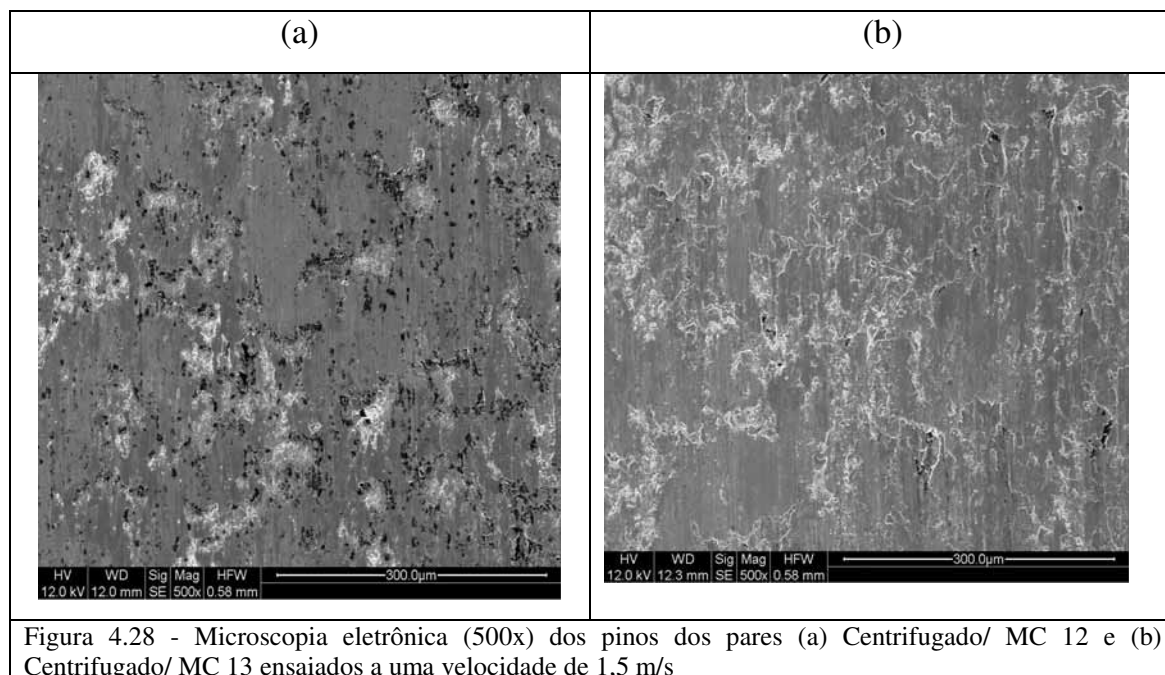
Figura 4.24 - Microscopia eletrônica (5000x) dos pinos dos pares (a) Centrifugado/ MC 12 e (b) Centrifugado/ MC 13 ensaiados a uma velocidade de 1,0 m/s

As Figuras 4.25 a 4.34 representam as superfícies desgastadas dos pares: ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13 deslizados a uma velocidade de 1,5 m/s.

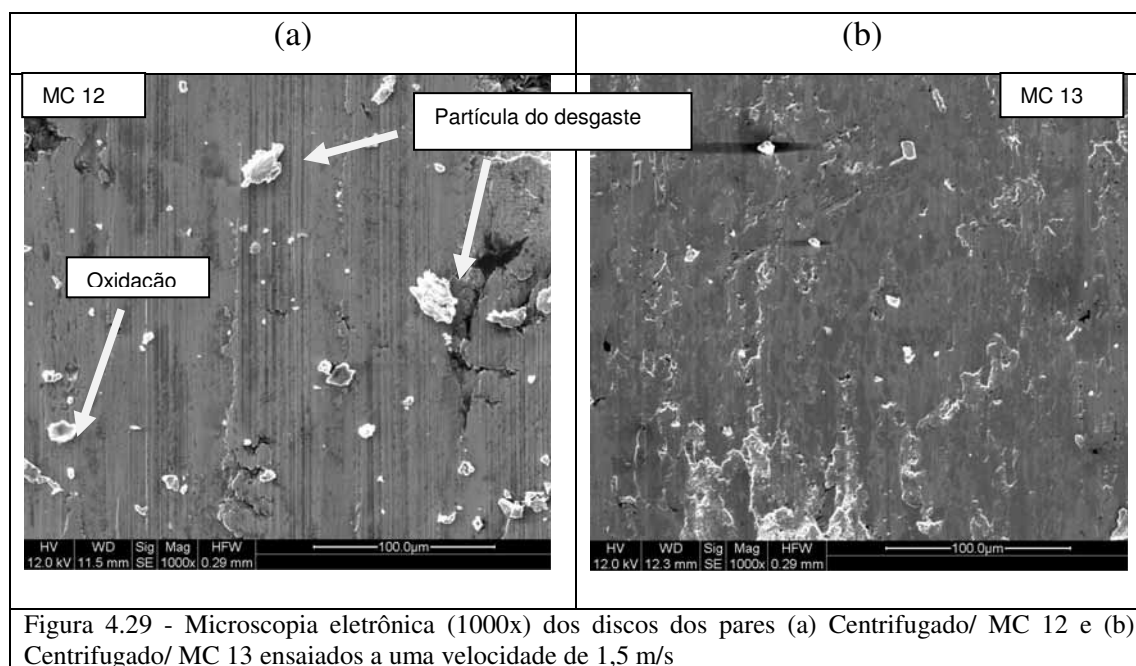
Nas Figuras de 4.25 a 4.28 pode-se observar as superfícies desgastadas dos materiais com magnitude de aumento de 100 e 500x, onde é possível visualizar a presença de uma tribocamada, porosidades e deformação plástica no sentido do deslizamento. A análise da composição química da superfície via EDS mostra a presença de oxigênio no espectro da Figura 4.27, indicando a oxidação da superfície.

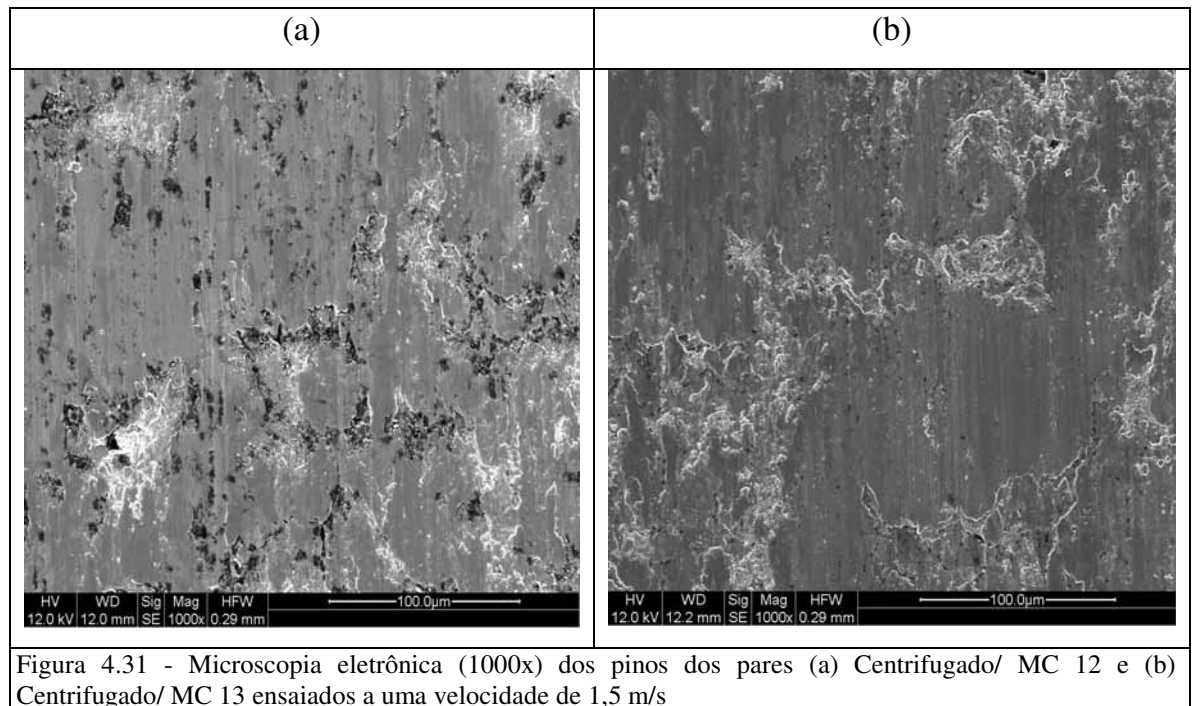
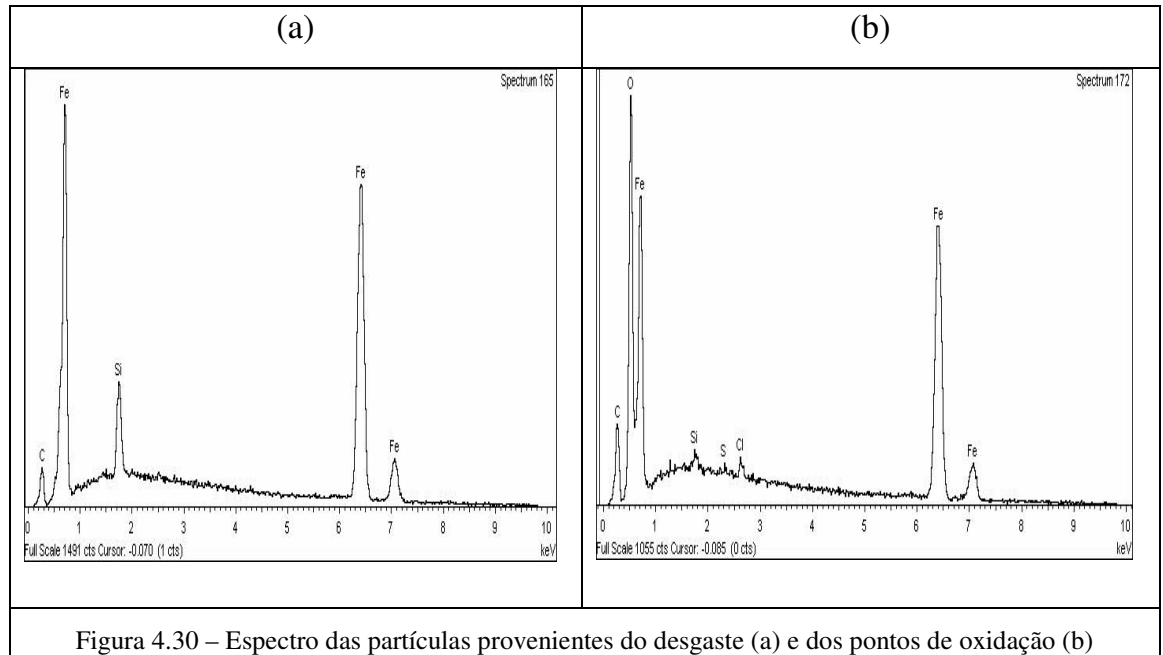




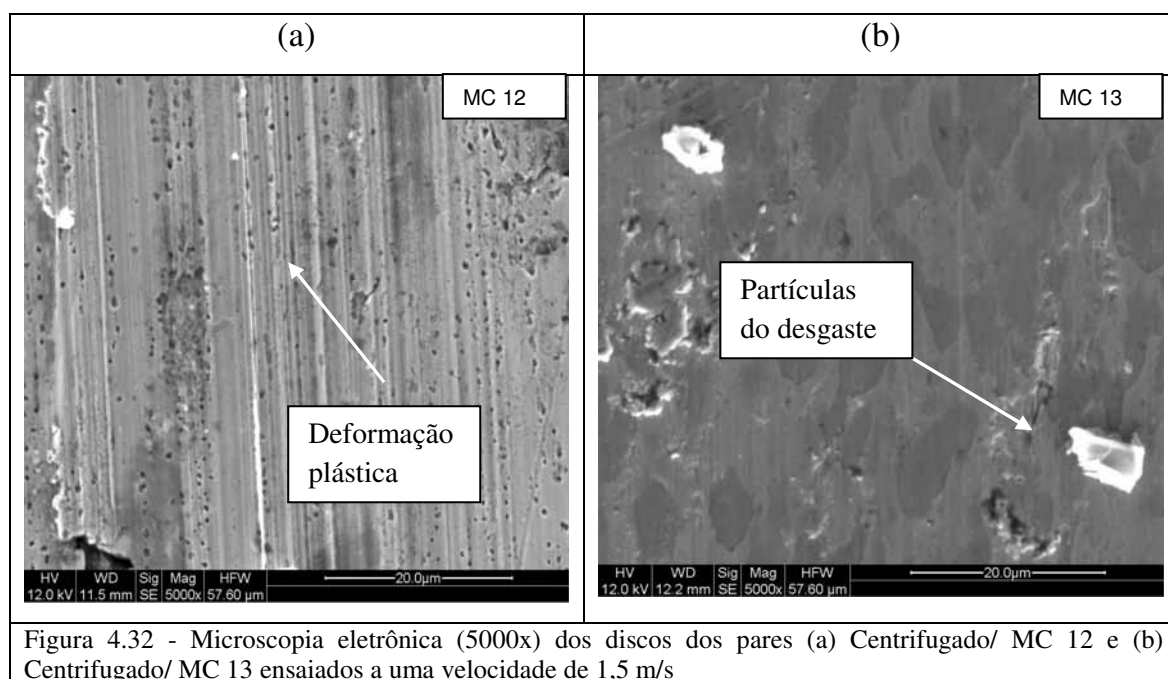


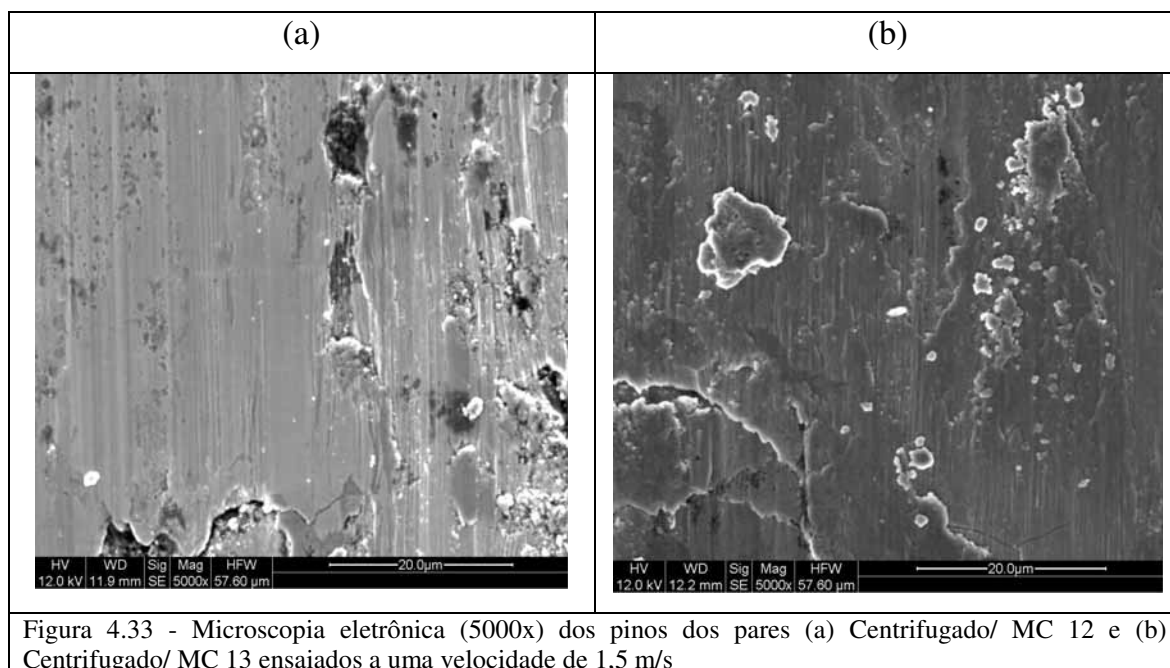
Na Figura 4.29 podemos observar a presença de inúmeros particulados provenientes do deslizamento do disco com o pino. Esses particulados se apresentam maiores e em maior quantidade do que nas velocidades de 0,5 e 1,0 m/s, e são produtos da mistura de partículas metálicas (Figura 4.30 a) e partículas de óxido (Figura 4.30 b) gerados a partir da quebra da camada de óxido aderida na superfície.





As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam detalhes da deformação plástica na superfície dos materiais MC 12 e MC 13 e ferro fundido centrifugado respectivamente. As deformações plásticas na velocidade de 1,5 m/s são mais intensas e claras do que nas velocidades de deslizamento anteriores, uma vez que as partículas formadas nessa velocidade de deslizamento são maiores, mais duras e estão em maior quantidade, fazendo com que o mecanismo de abrasão atue com mais intensidade, aumentando a deformação plástica.





4.5 Considerações gerais sobre a análise microscópica das superfícies desgastadas dos materiais MC 12, MC 13 e centrifugado

A análise microscópica das superfícies desgastadas pelo uso da microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários e retroespalhados, proporcionou o exame da morfologia da superfície, ou seja, tornou possível identificar a presença de ranhuras, defeitos (porosidades), tribocamada (óxido + metal) e de partículas provenientes do processo de desgaste por deslizamento nos pares tribológicos ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13.

As análises químicas via EDS possibilitaram a caracterização de cada um dos materiais utilizados no presente trabalho, bem como a transferência de material e da tribocamada formada durante o processo de deslizamento.

4.5.1 Influência da velocidade no desgaste por deslizamento

Observou-se que à medida que a velocidade de deslizamento aumentava de 0,5 m/s para 1,0 m/s e de 1,0 m/s para 1,5 m/s, aumentava-se também o depósito da tribocamada formada por óxido e metal sobre a superfície dos materiais.

O crescimento da camada de óxido e da mais intensa transferência de material está de acordo com o proposto por (STACHOWIAK; BATCHELOR; 2001). O aumento da temperatura e o conseqüente aumento do filme de óxido e transferência estão relacionados ao maior número de contato entre as asperidades à medida que se aumenta as velocidades de deslizamento.

Como para baixas velocidades de deslizamento (0,5 m/s, por exemplo) o potencial de oxidação é baixo, a fina camada de óxido que se forma é facilmente removida, propiciando o contato metal – metal e entrando no estágio de desgaste severo (desgaste por adesão). À medida que a velocidade de deslizamento aumenta até 1,0 m/s o filme ou a camada de óxido também cresce, diminuindo o coeficiente de atrito. No entanto, até essa velocidade de deslizamento o material ainda está no estágio de desgaste severo (adesivo), mas compete com o mecanismo de desgaste por oxidação (desgaste intermediário) (WILSON, STOTT, 1980).

Já em velocidades de deslizamento mais altas, como 1,5 m/s, por exemplo, pode-se observar maiores quantidades de óxido depositados sobre a superfície, bem como a presença de inúmeros particulados sobre a superfície. Particulados gerados pelo mecanismo de adesão e pelo mecanismo de oxidação, onde as camadas crescem até certo limite e por fadiga se fragmentam, formando partículas de material oxidado, que se misturam as partículas de metal formando a tribocamada de óxido + metal.

A redução do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste devido a mudança de desgaste severo para intermediário estão de acordo com os resultados obtidos graficamente (figuras 4.4 a 4.7), onde há um decréscimo da taxa de desgaste à medida que há um aumento da velocidade de deslizamento.

4.5.2 Transferência de material e geração de particulados

Observou-se que à medida que a velocidade de deslizamento aumentava, ficava mais nítido a presença das partículas sobre a superfície dos materiais desgastados. Como citado no item 4.5.1, a velocidade de deslizamento de 0,5 m/s não há uma camada de óxido espessa, e a mesma é removida facilmente. Por ser removida facilmente, haverá então o contato entre as asperidades dos metais, propiciando a

adesão, formação de junções, crescimento e separação das partículas, conforme mostrado no mecanismo da Figura 2.20.

A velocidade de deslizamento de 1,0 m/s foi possível identificar partículas provenientes do desgaste e da oxidação, embora pouca intensidade. Mesmo o desgaste sendo severo a essa velocidade (adesivo) pode-se observar a transferência de partículas entre os materiais do disco e do pino, e quebra da camada de óxido, formando as chamadas ilhas de óxidos (WILSON; STOTT, 1980).

A formação da tribocamada de metal + óxido é mais evidente nas micrografias dos materiais desgastados a velocidade de 1,5 m/s. Segundo Stachowiak e Batchelor (2001), essa tribocamada se forma no início do deslizamento a velocidade de 1,5 m/s, quando o pequeno filme de óxido é removido e há o contato metal-metal. À medida que o percurso aumenta a camada de óxido cresce e o desgaste passa a ser intermediário, podendo até haver a separação entre as superfícies. A camada de óxido cresce até um tamanho crítico, não suportando mais a carga aplicada e fragmentando-se em pequenas partículas de óxido.

Detalhes das partículas do desgaste e sua composição química são representadas pelas figuras 4.29 e 4.30, onde as partículas são maiores e em maior quantidade do que nas outras velocidades e apresentam oxigênio na sua composição química, comprovando a oxidação da superfície durante o deslizamento.

4.6 Mecanismo de Desgaste

Conforme as observações feitas no item 4.4 e as discussões do item 4.5, pode-se definir que o mecanismo de desgaste por velocidade de deslizamento é:

0,5 m/s: adesão

1,0 m/s: adesão + oxidação

1,5m/s: oxidação

Após a formação das partículas provenientes dos mecanismos de adesão e oxidação, ocorre também o processo de micro abrasão, uma vez que essas partículas encruam com o decorrer do deslizamento, propiciando assim a deformação plástica da superfície dos materiais.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos gráficos da taxa de desgaste e dos mecanismos de desgaste atuantes no ensaio pino/disco dos pares: ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 e ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13, pode-se concluir que:

1. A taxa de desgaste decresce linearmente com o aumento da velocidade de deslizamento para os discos (MC 12 e MC 13). Para os pinos (ferro fundido cinzento centrifugado) a taxa de desgaste decresce de 0,5 para 1,0 m/s e tem um leve aumento de 1,0 para 1,5 m/s;
2. As taxas de desgaste dos discos são maiores do que as taxas de desgaste dos pinos;
3. O par tribológico ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 13 possui melhor desempenho na velocidade de deslizamento de 0,5 m/s e o par tribológico ferro fundido cinzento centrifugado/ ferro fundido cinzento MC 12 possui melhor desempenho nas velocidades de deslizamento de 1,0 m/s e 1,5 m/s;
4. A ação da temperatura na formação da camada de óxido é maior e mais intensa nos pinos do que no disco, uma vez que o pino a seção transversal do pino estará sempre em contato com a superfície do disco. A instabilidade gerada pode ser o fator responsável pela inflexão na curva da taxa de desgaste;
5. As deformações plásticas ficaram mais evidentes e intensas a medida que a velocidade de deslizamento aumentou;

6. O mecanismo de desgaste por adesão é predominante na velocidade de 0,5 e compete com mecanismo desgaste por oxidação na velocidade de deslizamento de 1,0 m/s;

7. Na velocidade de deslizamento de 1,5 m/s prevalece o mecanismo de desgaste por oxidação;

8. Em todas as velocidades de deslizamento os mecanismos de desgaste por adesão e oxidação são seguidos de microabrasão.

CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, B.S. Company perspectives in vehicle tribology – Volvo. In: 17th Leeds – Lyon Symposium on Tribology – Vehicle Tribology. **Tribology series**, Oxford, UK: Elsevier Ltd, v.18, p. 503-506, 1991.

ANGUS, H.T. The wear of cast iron machine tool slides, shears and guideways. **Wear**, v.1, p.40 - 57, 1957/1958.

ANGUS, H.T; LAMB, A.D; SCHOLLES, J.P. Conditions leading to Failure of cast iron brakes. **Metals & Materials**, p.18-28, 1967.

ARCHARD, J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal Applies Physics**, v.24, p.981-988, 1953.

BARBER, G.C; LUDEMA, K.C. The break-in stage of cylinder ring wear: a correlation between fired engines and a laboratory simulator. **Wear**, v.118, p.57-75, 1987.

BLAU, P.J. Glossary of terms. In: __ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology: USA, v.18, p. 1-213, 1995.

BOOKER, J.F. Dynamically loaded journal bearings: maximum film pressure. Trans ASME, **Journal of Lubrication Technology**, p.534-543, 1969.

BOOKER, J.F. Dynamically loaded journal bearings: mobility method of solution. Trans ASME, **Journal of Basic Engineering**, p.537 – 46, 1965.

BOWDEN, F.P; TABOR, D. The friction and Lubrification of solids, Part 2, Oxford University Press, 1964.

BUCKLEY, D.H. Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrification. **Elsevier**, 1981.

BUCKLEY, D.H. The Influence of the Atomic Nature of Crystalline Materials in Friction. **ASLE Transactions**, v.11, p. 89-100, 1968.

CANALE, L.C.F; XU, G.; LIU, J.; TOTTEN, G. Surface Engineered Coatings and Surface Additive Interactions for Boundary Film Formation to Reduce Frictional Losses in the Automotive Industry: A review. **SAE International**, 2005.

CHALLEN, J.M; OXLEY, P.L.B. An Explanation of the Different Regimes of Friction and Wear Using Asperity Deformation Models, **Wear**, v.53, p.229-243, 1979.

COLPAERT, H. Ferros Fundidos Comuns. In: **Metalografia macrográfica e micrográfica dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009. p.311-348.

CRNKOVIC, S.J. **Comportamento de um aço ABNT-1020 bifásico revenido quanto ao atrito e desgaste**. 1993. 276f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

CRNKOVIC, S.J. **Comportamento tribológico de compósitos com matriz em alumínio, reforçado com partículas cerâmicas de SiC, em deslizamento não lubrificado contra Ferro Fundido**. 2004. 87f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratingueta, 2004.

CZICHOS, H. Failure criteria in thin film lubrication: the concept of a failure surface. **Tribology**, v.8, p.14-20, 1974.

DOWSON, D.; Higginson, E. Elasto- hydrodynamic lubrication. **Pergamon Press, INC**, 1991.

EYRE, T.S. Wear characteristics of metals. **Tribology International**, v.10, p.203-212, 1976.

EYRE, T.S. Wear of grey cast iron under unlubricated sliding conditions. **Lubrication Engineering**, v.29, n.2, p.65-72, 1973.

EYRE, T.S.; WILLIAMS, P. Effect of phosphorus on the friction and wear characteristics of grey cast iron. **Wear**, v.24, p.337-349, 1973.

FEHLNER, F.P; MOTT, N.F. Low temperature oxidation. **Oxidation of metals**, v.2, p.56-99, 1970.

FERRARESE, A. **Efeito do desgaste do primeiro anel de pistão no seu desempenho de vedação e raspagem**. 2004. 59f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FESSLER, R. US department of energy workshop on industrial research needs for reducing friction and wear. **Argonne National Laboratory**, 1999.

GAHR, K.H.Z. Microstructure and Wear of Materials. **Elsevier**, Amsterdam, 1987.

HASE, A.; MISHINA, H. Wear elements generated in the elementary process of wear. **Tribology International**, v.42, p.1684-1690, 2009.

HILL, S.; WUNSCH, E.; TUNG, S. Bench Wear testing of common gasoline engine cylinder bore surface/piston ring combinations. **Tribology Transactions**, v.39, n.4, p.929-935, 1996.

HIRST, W.; LANCASTER, J.K. The influence of speed on metallic wear. **Proceedings of the Royal Society**, v. 259(a), p.228-241.

HOLM, R. Electric contacts: theory and applications. Stockholm, 1946.

HOLM, R. Über metallische kontaktwiderstände. **Wiss Veroff Siemens-Werk**, v.7, n.2, p.217-258, 1929.

HOLMENBERG, K. Reability aspects on tribology. **Tribology International**, v.34, p. 801-808, 2001.

HUTCHINGS, I.M. Sliding Wear. In: ____ **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. England: Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, 1992, p. 77-103.

KAYABA, T. The Latest Investigations of Wear by the Microscopic Observations, **JSLE Transactions**, v.29, p. 9-14, 1984.

KAYABA, T.; KATO, K. The analysis of adhesive wear mechanisms by successive observations of the wear process in SEM. **Procedures International Conference on Wear of Materials**, Dearborn, Michigan, 1979.

KERRIDGE, M. Metal transfer and the wear process. **Proceedings of the Physics Society**, v. 68(b), p. 400-407, 1955.

LANNA, M.A. Usinagem de carbono-carbono com ferramentas cerâmicas revestidas com diamante por CVD. In: ____ **48º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Curitiba – PR, 2004.

McFARLANE, J.S.; TABOR, D. Relation between friction and adhesion, **Proceedings of Royal Society**, London, Series A, v.202, p.244-253, 1950.

MOORE, M.A.; DOUTHWAITE, R.M. Plastic Deformation Below Worn Surfaces, **Metallurgical Transactions**, v.7A, p.1833-1839, 1978.

MOORE, M.A.; KING, F.S. Abrasive Wear of Brittle Solids. **Wear**, v.60, p.123-140, 1980.

NAKASA, M. Engine friction overview. Proceedings of International. **Tribology Conference**. Yokohama –Japan, 1995.

OKOSHI, J.; SAKAI, H. Repts. **Japan Society of Mechanical Engineers**. v.7, p.29, 1941.

PINT, S.; SCHOCK, H. Design and Development of a software Module for Analysis of Three Dimensional Piston Ring Wear. **Paper SAE 2000-01-0920**, 2000.

REGNEY, D.A. Comments on the sliding wear of metals. **Tribology International**, v. 30, n.5, p.361-367, 1997.

SASADA, T. Frictional damage in solid surfaces: with special reference to the adhesive wear, **Japan Society Mechanical Engineers**, v.75, n.641, p.905-912. 1972.

SASADA, T.; NOROSE, S. The formation and growth of wear particles through mutual material transfer. In: Proceedings of the JSLE-ASLE international lubrication conference (1975), **Elsevier**, Amsterdam, p.82-91.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering tribology**: Tribologia. 2^a ed. Butterworth Heinemann, Boston, p. 504-570; 872, 2001.

STOETERAU, R.L. Tribologia, 2004. 179f. **Apostila para curso de Tribologia** (Departamento de Engenharia Mecânica) - Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SWAIN, M.V. Microscopic Observations of Abrasive Wear of Polycrystalline Alumina, **Wear**, v.35, p.185-189, 1975.

TAKEUCHI, E. The mechanism of sliding wear of lubricated flake graphite cast iron. **Wear**, Tokyo, v.15, p.201-208, 1970.

TAKEUCHI, E. The mechanisms of wear of cast iron in dry sliding. **Wear**, Tokyo, v.2, 1968.

TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

TOROBAN, H.; PATHAK, J.P.; TIWARI, S.N. Wear characteristics of Al-Si alloys. **Wear**, v.172, p.49-58, 1994.

TUNG, S.; McMILLAN, M. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. General Motors Research and Development center, USA. **Tribology International**, v.37, p.517-536, 2004.

VADIRAJ, A.; BALACHANDRAN, G.; KAMARAJ, M.; GOPALAKRISHNA, B.; RAO, D.V. Wear behavior of alloyed hypereutectic Gray cast iron. **Tribology International**, v.43, p.647-653, 2010.

VATAVUK, J. **Mecanismos de desgaste em anéis de pistão e cilindros de motores de combustão interna**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

VINGSBO, O.; HOGMARK, S. Wear of Steels. ASM Materials Science Seminar on Fundamentals of Friction and Wear of Materials. 4-5 October, 1980, Pittsburg, Pennsylvania, editor: D.A. Rigney, Metals Park, Ohio, Publ. ASM, p. 373-408, 1981.

VINGSBO, O. Wear and wear mechanisms. **Procedures International Conference on Wear of Materials**, Dearborn, Michigan, 1979.

WILLIAMS, J.A. Wear and surface damage. In:_____ **Engineering tribology**. Tribologia, 2^a ed., Avon: Bookcraft Ltd., p. 488, 1996.

WILSON, J.E.; STOTT, F.H.; WOOD, G.C. The development of wear protetive oxides and their influence on slide friction. **Proceedings of the Royal Society.**, London, Series A, v.369, p. 557-574, 1980.

XU, L.; KENNON, N.F. A Study of the Abrasive Wear of Carbon Steels. **Wear**, v.148, p.101-112, 1991.

ANEXO

1 – Determinação da taxa de desgaste

1.1 – Tabelas de volume (mm^3) perdido

Tabela 1 - FoFo Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC 12

Distância	v = 0,5 m/s		v = 1,0 m/s		v = 1,5 m/s	
	Centrifugado	MC 12	Centrifugado	MC 12	Centrifugado	MC 12
3000	1.43	0.67	0.68	1.03	0.51	0.52
6000	3.01	2.49	1.16	2.19	0.99	1.03
9000	4.68	4.10	1.62	3.35	1.43	1.55
12000	5.57	6.81	2.10	4.75	1.92	2.07
15000	6.93	7.65	2.52	5.65	2.41	2.26
18000	7.97	8.54	2.91	6.88	2.98	2.52

Tabela 2 - FoFo Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC 13

Distância	v = 0,5 m/s		v = 1,0 m/s		v = 1,5 m/s	
	Centrifugado	MC 13	Centrifugado	MC 13	Centrifugado	MC 13
3000	1.75	1.38	1.07	0.67	0.72	0.58
6000	3.10	2.74	1.99	1.58	1.32	1.07
9000	4.39	4.03	2.55	2.77	1.97	1.54
12000	5.78	5.54	3.16	3.71	2.62	2.07
15000	7.04	7.01	3.80	4.74	3.12	2.61
18000	8.06	8.12	4.59	5.80	3.42	3.19

1.2 - Volume acumulado (mm^3) x distância de deslizamento

a) FoFo Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC 12

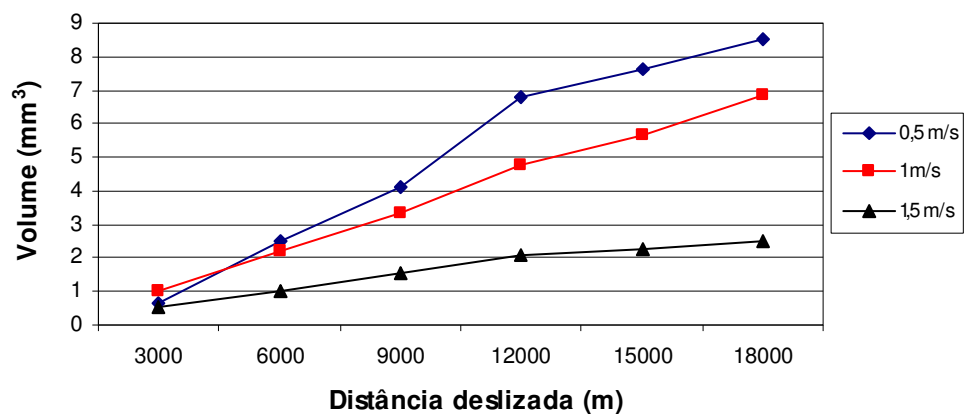


Figura 1 - Desgaste em função da velocidade para o disco (FoFo Cinzento MC 12)

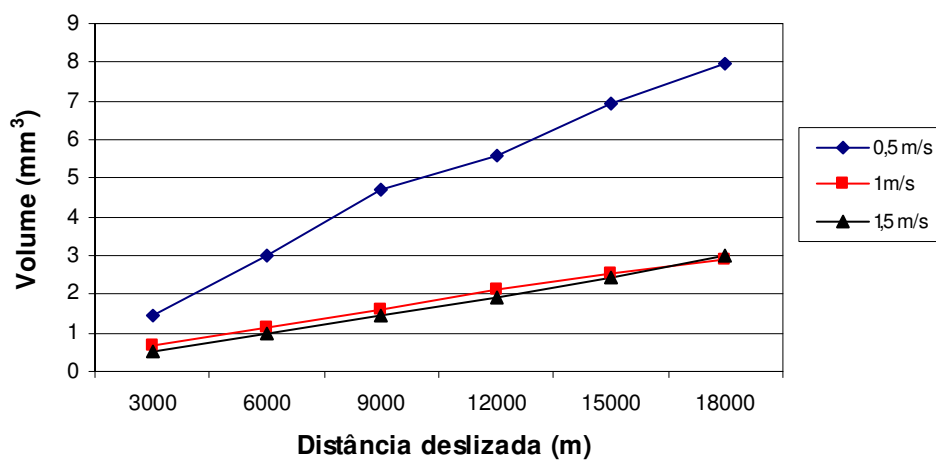


Figura 2 - Desgaste em função da velocidade para o pino FoFo Cinzento Centrifugado ensaiado contra o material FoFo Cinzento MC 12 (disco)

b) FoFo Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC 13

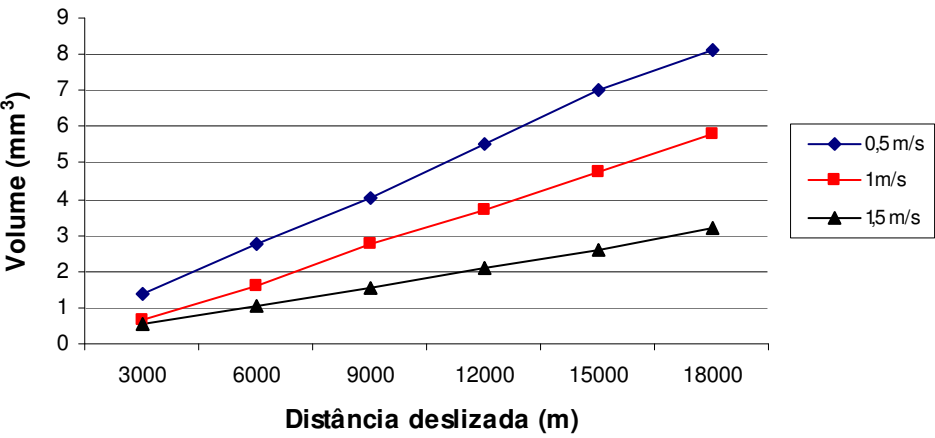


Figura 3 - Desgaste em função da velocidade para o material FoFo Cinzento MC 13

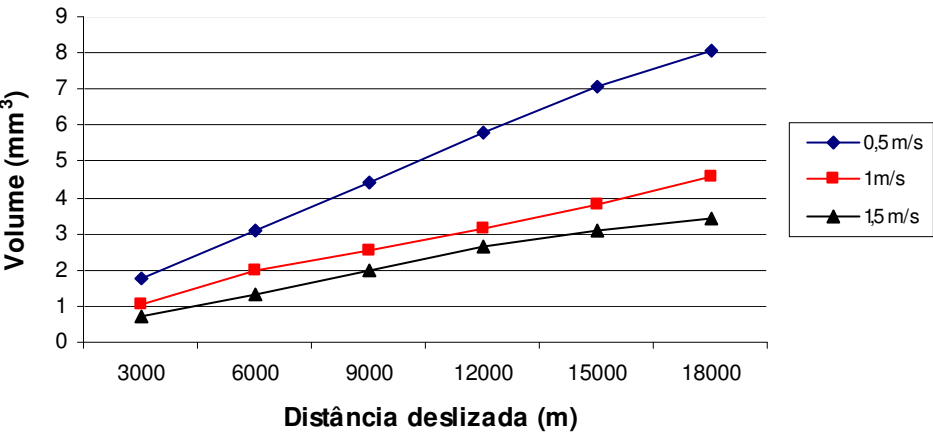


Figura 4 - Desgaste em função da velocidade para o pino (FoFo Cinzento Centrifugado) ensaiado contra o material FoFo Cinzento MC 13

1.3 Determinação da taxa de desgaste

a) FoFo Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC 12

Através da regressão linear foi possível chegar à equação da curva, que ajudará na definição da taxa de desgaste K como citado na equação 3.2, cujo o valor de “ n ” na equação $y = m + n.x$ é o valor da tg de .

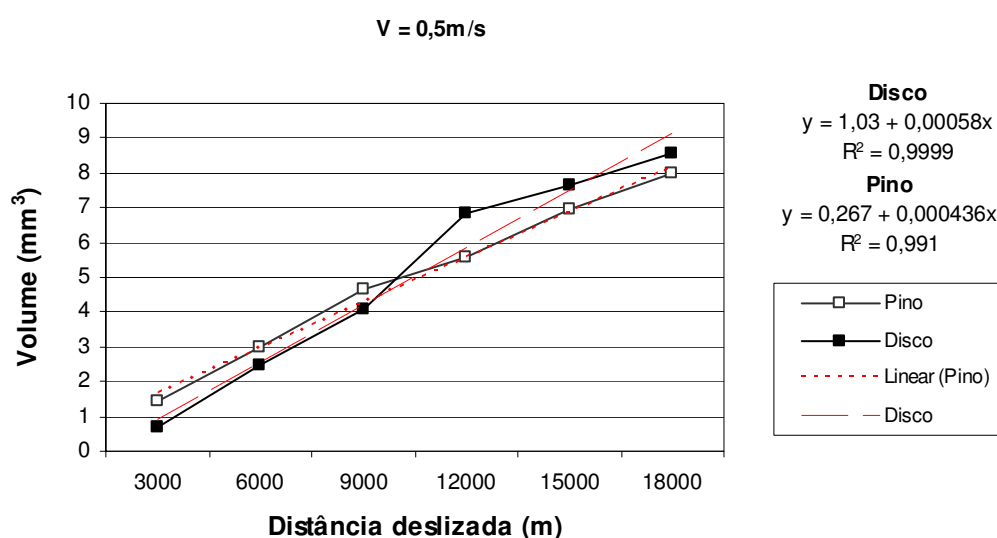


Figura 5 – Volume desgastado do par FoFo MC 12 (disco)/ FoFo Centrifugado (pino) a velocidade de 0,5 m/s

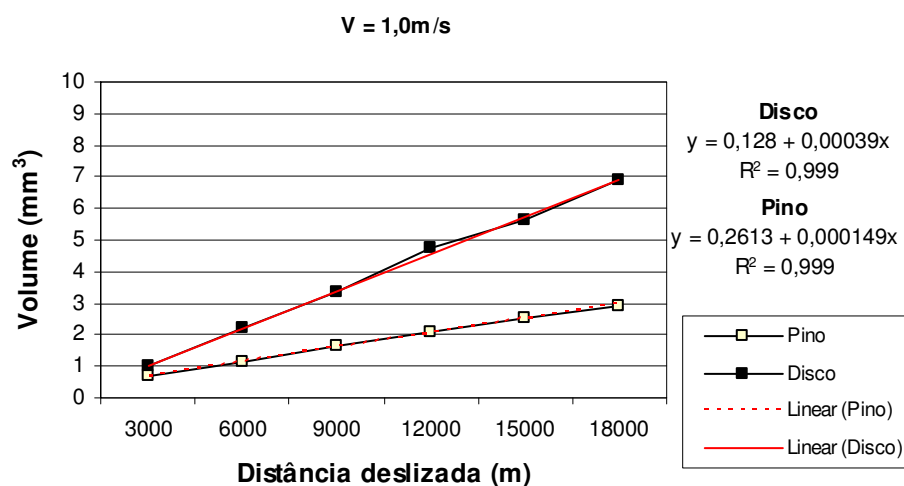


Figura 6 – Volume desgastado do par FoFo MC 12 (disco)/ FoFo Centrifugado (pino) a velocidade de 1,0 m/s

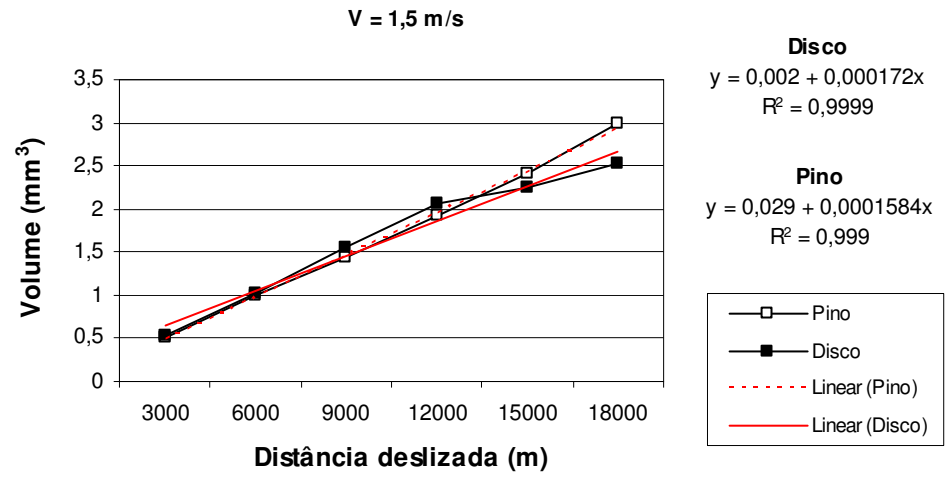


Figura 7 – Volume desgastado do par FoFo MC 12 (disco)/ FoFo Centrifugado (pino) ;
a velocidade de 1,5 m/s

b) FoFo Cinzento Centrifugado/ Ferro Fundido Cinzento MC 13

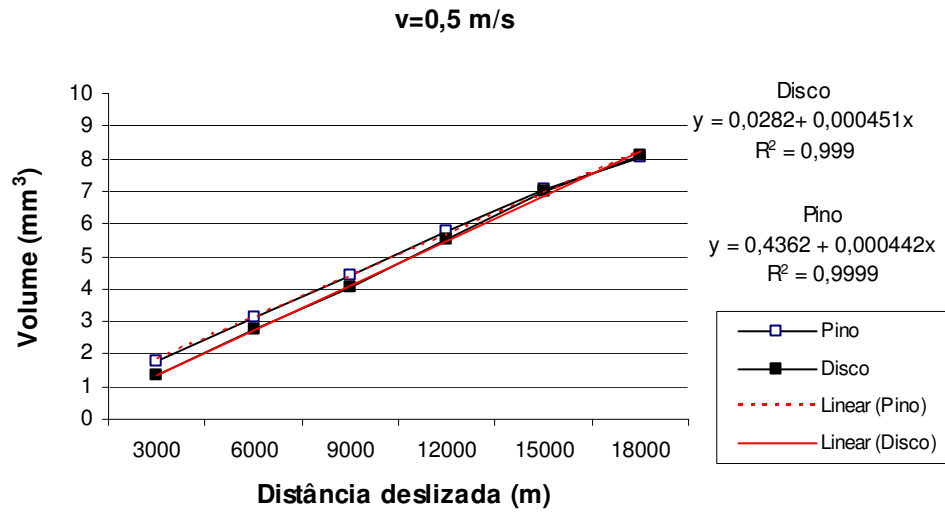


Figura 8 – Volume desgastado do par FoFo MC 13 (disco)/ FoFo Centrifugado (pino) a velocidade de 0,5 m/s

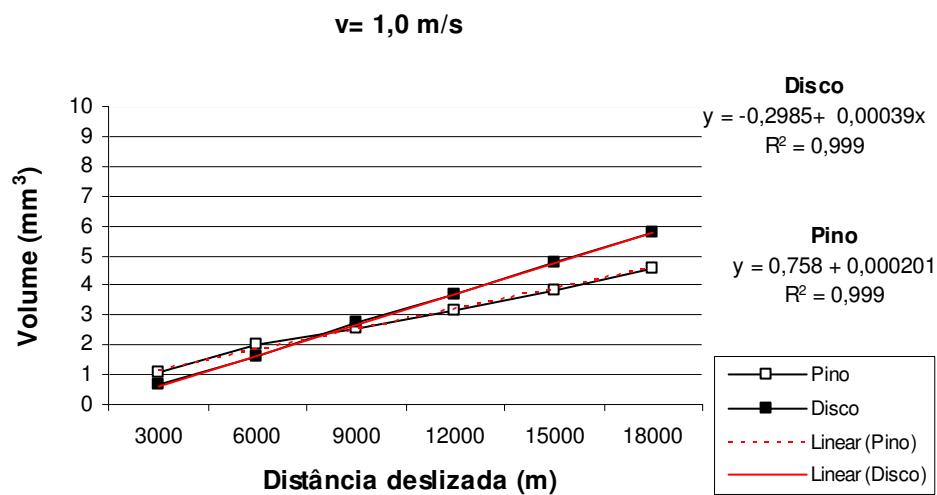


Figura 9 – Volume desgastado do par FoFo MC 13/ FoFo Centrifugado (pino) a velocidade de 1,0 m/s

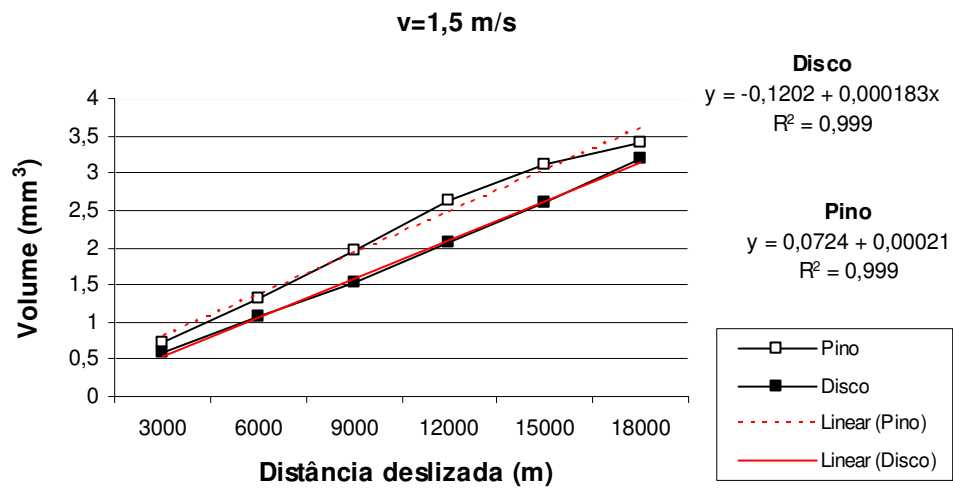


Figura 10 – Volume desgastado do par FoFo MC 13/ FoFo Centrifugado (pino) a velocidade de 1,5 m/s

Tabela 3 - Resultados experimentais da taxa de desgaste dos pares tribológicos FoFo Cinzento MC 12/ FoFo Cinzento Centrifugado e FoFo Cinzento MC 13/ FoFo Cinzento Centrifugado

Par tribológico		Parâmetros do ensaio		Taxa de desgaste	
		v	HR	Kpino	Kdisco
Pino	Disco	m/s	%	mm ³ /m	
FoFo Centrifugado	MC 12	0,5	48 - 52%	0,00043	0,00058
		1		0,00015	0,00039
		1,5		0,00016	0,00017
FoFo Centrifugado	MC 13	0,5	48 - 52%	0,00044	0,00045
		1		0,00020	0,00039
		1,5		0,00021	0,00018