

EDISON GUSTAVO CUEVA GALÁRRAGA

**ESTUDO DO DESGASTE EM MATERIAIS UTILIZADOS EM
DISCOS DE FREIO DE FERRO FUNDIDO COM GRAFITA
LAMELAR E VERMICULAR**

**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Título de Doutor em Engenharia**

São Paulo

2002

RECEBIDO
21/11/02
POLÍTECNICA
CAMPUS MARQUÊS DE SÃO CARLOS

OK

EDISON GUSTAVO CUEVA GALÁRRAGA

**ESTUDO DO DESGASTE EM MATERIAIS UTILIZADOS EM
DISCOS DE FREIO DE FERRO FUNDIDO COM GRAFITA
LAMELAR E VERMICULAR**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin

São Paulo

2002

Dedico este trabajo a mis padres: José Rafael y María Mercedes, a mis hermanos: Marcelo, Nancy, Viviana, Katya y José, y a mi esposa Paola porque sin su apoyo, cariño y comprensión no hubiese podido realizarlo.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
TERMO DE JULGAMENTO
DE
DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos 17 dias do mês de dezembro de 2002, às 13:00 horas, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores André Paulo Tschiptschin, orientador do candidato, Amilton Sinatora, Wilson Luiz Guesser, Sinésio Domingues Franco e Eduardo Albertin, iniciou-se a Defesa de Tese de Doutorado do(a) Sr(a) **EDISON GUSTAVO CUEVA GALÁRRAGA.**

Título da Tese: "ESTUDO DO DESGASTE EM MATERIAIS UTILIZADOS EM DISCOS DE FREIO FUNDIDO COM GRAFITA LAMELAR E VERMICULAR"

Concluída a arguição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o(a) candidato(a):

- Prof.Dr. André Paulo Tschiptschin..... (APROVADO)
- Prof.Dr. Amilton Sinatora..... (Aprovado)
- Prof.Dr. Wilson Luiz Guesser..... (aprovado)
- Prof.Dr. Sinésio Domínguez Franco..... (Aprovado)
- Prof.Dr. Eduardo Albertin..... (Aprovado)

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária de Pós-Graduação.

São Paulo, 17 de dezembro de 2002.
A COMISSÃO JULGADORA

Secretária: Maria Cristina Vígolo
Obs.: Resolução 4476, de 17.09.1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da arguição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato aprovado ou reprovado.
Homologado pela C.P.G. em reunião realizada 29/01/03.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin, pela acertada orientação e pela oportunidade de trabalhar em seu grupo.

Aos professores Dr. Amilton Sinatora e Dr. Deniol Tanaka pelas facilidades oferecidas na realização deste trabalho no LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP.

À Indústria de Fundição Tupy e a Cobreq pela doação dos ferros fundidos e as pastilhas de freio utilizados neste trabalho.

Ao Dr. Wilson Luiz Guesser pelas proveitosas idéias recebidas que me ajudaram a redirecionar e desenvolver meu plano de pesquisa.

Ao CNPq e a Fapesp pelo apoio financeiro recebido.

Aos técnicos (Paulão, Lívio, Danilo, Márcia Ribeiro, Cláudio e Francisco), aos funcionários (Cláudia e Clélia, da Biblioteca) e ao pessoal administrativo (Márcia, Cristina e Ivo, da Secretaria) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Aos todos os colegas de graduação e pós-graduação, pela amizade e a grande disposição para discutir e analisar diversos temas relacionados com este trabalho.

Aos meus amigos da Metalurgia: Alejandro Toro e Érika, Antonio José Ramirez e Tatiana, Modesto Hurtado e Ana Lúcia, Claudia Patrícia Serna e Nelson, Wilson Carlos da Silva Jr., José Francisco dos Santos, Adonias Ribeiro Franco, Carlos Mario Garzón, Claudia Patrícia Ossa, Wanderson Santana da Silva, Wilson de

Souza Paulino, Eduardo Monlevade, e aos meus amigos da Mecânica: Márcia Marie Marú, Giuseppe Pintaúde e Carlos Henrique da Silva por essa convivência espetacular que tivemos durante todo este tempo.

Á minha família brasileira de São Caetano do Sul, pelo incentivo e carinho recebido.

A mi tío Dr. Segundo Filiberto Galárraga Silva y su esposa Gabriela por haberme acogido como un integrante más de su hogar y por todo el cariño que me dieron durante mi estadía con ustedes.

Aos meus sogros, Osvaldo e Ginette Dolce e aos meus cunhados Rubens e Cecília, para os quais não tenho palavras suficientes para agradecer o apoio recebido e sobre todo a infinita confiança que depositaram em mim durante esta difícil fase da minha vida. MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1.	Definição e classificação dos ferros fundidos	2
2.2.	Propriedades dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e vermiculares	3
2.3.	Elementos de Liga	10
2.4.	Sistemas de freio	11
2.4.1.	Tambor de freio	15
2.4.2.	Disco de freio	16
2.4.3.	tipos de disco de freio	18
2.4.4.	Materiais dos discos de freio	20
2.4.5.	Materiais alternativos	24
2.4.6.	Material das pastilhas de freio	26
2.4.7.	Mecanismos de desgaste presentes nos sistemas de frenagem de veículos automotores	29
	Desgaste oxidativo	33
	Desgaste abrasivo	34
	Desgaste por fadiga superficial	38
	Desgaste adesivo	39
	Transições no desgaste por deslizamento	42
2.4.8.	Desgaste em discos de freio	45
2.4.9.	Desgaste das pastilhas de freio	47
2.5.	Objetivos	54

3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1. Materiais	55
3.2. Caracterização do material no estado bruto de fundição	56
a) Metalografia	56
b) Propriedades Mecânicas	57
c) Dilatometria	58
3.3. Caracterização da pastilha de freio	61
a) Fluorescência de Raios X	61
b) Difração de Raios X	61
c) Metalografia	61
d) Propriedades Mecânicas	62
3.4. Ensaio de desgaste: Pino contra Disco	62
a) Corpos de prova	63
b) Parâmetros de ensaio	65
c) Ensaio com força de atrito “igual”	66
3.5. Tratamentos térmicos no ferro fundido vermicular	66
a) Caracterização das amostras tratadas termicamente	66
b) Ensaio de desgaste	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1. Caracterização dos ferros fundidos	68
4.1.1. Análises metalográficas	68
4.1.2. Propriedades mecânicas	74
4.1.3. Dilatometria	75
4.2. Caracterização da pastilha de freio	80
4.2.1. Fluorescência de raios X	80
4.2.2. Difração de raios X	81
4.2.3. Metalografia	82
4.2.4. Propriedades mecânicas	86

4.3.	Tratamentos térmicos dos ferros fundidos vermiculares	87
4.3.1.	Metalografia	87
4.3.2.	Difração de raios X	88
4.3.3.	Propriedades mecânicas	89
4.4.	Ensaio de desgaste - pino sobre disco	90
4.4.1.	Carga cíclica aplicada: 600 N (Pressão: 4 MPa)	90
4.4.1.1.	Perda de massa	90
4.4.1.2.	Temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito	95
4.4.1.3.	Análises das Superfícies Desgastadas	102
	Rugosidade	102
	Microscopia óptica	105
	Microscopia eletrônica de varredura	107
4.4.1.4.	Ensaio com carga de 500 N	116
	Força de atrito e temperatura	116
	Perda de massa	117
4.4.2.	Carga cíclica aplicada: 300 N (Pressão: 2 MPa)	119
4.4.2.1.	Perda de massa	119
4.4.2.2.	Temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito	122
4.4.2.3.	Análises das superfícies desgastadas	127
	Rugosidade	127
	Microscopia óptica	128
	Microscopia eletrônica de varredura	130
4.4.2.4.	Ensaio com carga: 250 N e 200N.....	136
	Força de atrito e temperatura	136
	Perda de massa	137
4.4.3.	Carga cíclica aplicada: 100 N (Pressão: 0.7 MPa)	140
4.4.3.1.	Perda de massa	140
4.4.3.2.	Temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito	143
4.4.3.3.	Análises das superfícies desgastadas	147
	Rugosidade	147
	Microscopia óptica	148

	Microscopia eletrônica de varredura	150
4.4.3.4.	Ensaio com Carga de 60N	157
	Força de atrito e temperatura	158
	Perda de massa	158
4.4.4.	Ferro fundido vermicular tratado termicamente Carga cíclica aplicada: 600 N (Pressão: 4 MPa)	160
4.4.4.1.	Perda de massa	160
4.4.4.2.	Temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito	163
4.4.4.3.	Análises das superfícies desgastadas	166
	Rugosidade dos discos	166
	Microscopia óptica	167
	Microscopia eletrônica de varredura	168
4.4.5.	Disco de freio real	172
	Rugosidade	172
	Microscopia óptica	173
	Microscopia eletrônica de varredura	174
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	177
6.	CONCLUSÕES	186
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	187
	BIBLIOGRAFIA	188

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1.	Cinzento: grafita em forma de lamelas alongadas. Vermicular: grafita em forma de partículas aleatoriamente orientadas. Nodular: grafita em forma de nódulos.....	4
Figura 2-2.	Ferro fundido vermicular com 10 % de nodularidade.....	6
Figura 2-3.	Resistência à tração e limite de escoamento, de ferros fundidos com 85 a 100% de perlita, em função da temperatura e da nodularidade.....	7
Figura 2-4.	Resistência à tração e limite de escoamento de um ferro fundido vermicular com nodularidade entre 0 e 10%, em função do teor de perlita.....	8
Figura 2-5.	Tipos de freios freqüentemente usados: a) disco de freio e b) tambor de freio.....	13
Figura 2-6.	Representação esquemática da transmissão de forças num sistema de freio.....	14
Figura 2-7.	Disco de Freio de Automóvel	17
Figura 2-8.	Tipos de disco de freio de automóvel. a) simples e ventilado, b) furado, c) ranhurado e d) misto.....	19
Figura 2-9.	Durante o deslizamento relativo entre duas superfícies rugosas, a força de atrito representa o trabalho necessário para que uma superfície escorregue por cima da outra, passando pelas posições: a), b) e c).....	30
Figura 2-10.	Contacto entre duas superfícies rugosas. Somente pequenas partes das superfícies estão realmente em contacto. A área real de contacto aumenta com o aumento da carga. a) carga baixa, e b) carga alta.....	31
Figura 2-11.	Processo de desgaste oxidativo: a) formação ilhas de oxido, b) e c) crescimento dessas ilhas, e d) destruição das camadas oxidadas e formação novas ilhas de oxido. <i>Debris</i> entre as duas superfícies.....	34

- Figura 2-12.** Representação esquemática do desgaste abrasivo: a) a dois corpos, e b) a três corpos..... 35
- Figura 2-13.** Interações físicas entre as partículas abrasivas e as superfícies dos materiais..... 36
- Figura 2-14.** Mudança de tipo de mecanismo de desgaste e da taxa de desgaste em função do ângulo de ataque..... 37
- Figura 2-15.** Formação de trinca sub-superficial propagando-se paralela a superfície do material..... 38
- Figura 2-16.** Delaminação – Suh (1973): a) alisamento da superfície do material de menor dureza, b) acumulação de deformação abaixo da superfície, c) formação de trincas sub-superficiais e d) formação de uma partícula de desgaste com a forma de uma lamina..... 40
- Figura 2-17.** Transferência adesiva – Kabaya (1979): a) contacto entre asperezas, b) junção, c) propagação de uma trinca e pequeno deslocamento d) formação de uma segundo junção, e) propagação de uma nova trinca e outro pequeno deslocamento, e f) separação da cunha do volume do material por ruptura..... 40
- Figura 2-18.** Elementos transferidos – Sasada (1979): As partículas de desgaste não são produzidas diretamente a partir dos fragmentos de material desprendidos das superfícies em deslizamento. Pequenas partículas se aderem as superfícies e se juntam com outras ficando cada vez maiores at’serem removidas do contacto como *debris*..... 41
- Figura 2-19.** Variação da taxa de desgaste em função da carga aplicada (par Latão 60/40 e Stellite - 61% Co, 30% Cr -). A rugosidade da superfície desgastada com cargas acima de 0,8 kg é aproximadamente 100 vezes maior que a correspondente a condições de carga abaixo da transição..... 42

Figura 2-20.	Influência da velocidade sobre a taxa de desgaste de um aço 0,64% C. Carga: 30 kg.....	43
Figura 2-21.	Influência da carga sobre a taxa de desgaste de um par pino-anel de aço 0,52% C. (x pino - o anel). Velocidade de deslizamento: 100 cm/s.....	44
Figura 2-22.	Correlação entre desempenho de frenagem e conteúdo de partículas de carbonitreto de titânio nas superfícies dos discos de freio.	48
Figura 2-23.	Representação esquemática da formação de trincas por fadiga térmica em discos de freio.....	50
Figura 2-24.	Situação de contacto entre a pastilha de freio e o disco de freio, mostrando platôs de contacto primários e secundários, e o fluxo de <i>debris</i> parcialmente empilhados nos platôs.....	51
Figura 2-25.	Platôs de contacto numa pastilha de freio orgânica. Os platôs primários são fibras de aço que suportam os platôs secundários formados por <i>debris</i> compactados. Fotos de MEV: a) elétrons secundários, b) elétrons retro-espalhados....	52
Figura 2-26.	Uma lasca de platô secundário sendo removida da superfície da pastilha de freio por mecanismos adesivos.....	53
Figura 3-1.	Fator de forma da grafita. L = comprimento do veio de grafita, D = largura do veio de grafita.	57
Figura 3-2.	Métodos utilizados na determinação das temperaturas: a) austenitização - A_{c1} , b) formação de perlita - T_p e c) transformação martensítica - M_s	60
Figura 3-3.	Esquema da máquina de ensaios pino no disco.	62
Figura 3-4	Pino (pastilha de freio) com haste usado nos ensaio de desgaste.	63
Figura 3-5.	Corpos de prova para os ensaios de desgaste (discos de 75 mm de diâmetro) extraídos dos discos de ferro fundido cinzento de 300 mm de diâmetro.	64

Figura 4-8. Curvas de dilatométrica do ferro fundido vermicular mostrando somente as inflexões correspondentes à austenitização durante o aquecimento e a formação de perlita durante o resfriamento.	78
Figura 4-9. Microestrutura do ferro fundido vermicular resultante do ciclo de dilatométrica, aquecimento: 40 °C/s e resfriamento: 1 °C/s.	79
Figura 4-10. Curva de dilatométrica do ferro fundido vermicular mostrando as inflexões da formação de perlita e de martensita durante o resfriamento.	79
Figura 4-11. Microestrutura do ferro fundido vermicular resultante do ciclo de dilatométrica, aquecimento: 40 °C/s e resfriamento: 5 °C/s.	80
Figura 4-12. Difrátograma da pastilha de freio. Radiação: Cu α	81
Figura 4-13. As regiões claras são grafita, e as brilhantes são fibras de ferro e partículas de latão. As análises EDS indicam a composição química destes componentes. Microscopia óptica	82
Figura 4-14. Pastilha de freio (MEV – BSE) com o espectro de difração de raios x ao lado. As regiões escuras são grafita, as brancas são as fibras de ferro e as partículas de latão. As regiões cinzas são partículas não metálicas de menor tamanho.....	84
Figura 4-15. As regiões escuras são grafita, as cinzas escuras são as fibras de ferro e as regiões claras são as partículas de menor tamanho.....	85
Figura 4-16. Partículas menores que constituem a matriz da pastilha de freio, com suas respectivas análises químicas. MEV – BSE....	86
Figura 6-17. Microestruturas obtidas no ferro fundido vermicular depois dos tratamentos térmicos.....	88
Figura 4-18. Difrátograma da amostra temperada em óleo.....	89
Figura 4-19. Desgaste medido nos discos. Carga: 600N.....	90
Figura 4-20. Desgaste medido nos pinos. Carga: 600 N.....	94

Figura 4-21. Ciclos de carregamento mostrando os máximos valores alcançados pela temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito no ferro fundido cinzento Fe250.....	96
Figura 4-22. Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N.....	97
Figura 4-23. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N.....	99
Figura 4-24. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N.....	100
Figura 4-25. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos discos em função do tempo de ensaio. Carga: 600 N.....	102
Figura 4-26. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos pinos em função do tempo de ensaio. Carga: 600 N.....	104
Figura 4-27. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 600 N.....	105
Figura 4-28. Superfícies desgastadas dos discos. a) As lamelas de grafita funcionam como depósitos de detritos. b) Detritos aderidos à superfície desgastada formando colônias.....	106
Figura 4-29. Detritos aderidos à superfície desgastada formando colônias e preenchendo defeitos superficiais (poros) e suas respectivas análises químicas EDS.....	108
Figura 4-30. MEV - Superfícies desgastadas dos ferros fundidos cinzentos.....	109
Figura 4-31. Superfícies desgastadas do ferro fundido vermicular. Marcas de desgaste abrasivo e deformação plástica mais severa que nos ferros fundidos cinzentos.....	110

Figura 4-32.	Seção transversal da superfície desgastada do ferro fundido vermicular. Matriz perlítica completamente destruída na borda superior, formando uma camada deformada de aproximadamente 2 μm de espessura. Grafita comprimida devido à deformação plástica da superfície.....	111
Figura 4-33.	Superfícies desgastadas dos pinos, depois dos ensaios de desgaste. As áreas reais de contacto são constituídas basicamente por fibras de ferro, óxidos de ferro e grafita.....	113
Figura 4-34.	Superfícies desgastadas dos pinos. Platôs de contacto e áreas vizinhas.....	114
Figura 4-35.	Detritos coletados após os ensaios de desgaste. a) Partícula de óxido de ferro, rodeado de partículas muito pequenas de carbono, coladas às fibras de papel filtro, usado para a coleta de detritos. b) Idem (a), com maior aumento.....	115
Figura 4-36.	Medidas de perda de massa comparativas dos discos obtidas de ensaios de desgaste realizados com carga de 600 e 500 N..	117
Figura 4-37.	Medidas de perda de massa comparativas dos pinos obtidas de ensaios de desgaste realizados com carga de 600 e 500 N..	118
Figura 4-38.	Desgaste medido nos discos de ferro fundido. Carga: 300 N..	119
Figura 4-39.	Desgaste medido nos pinos. Carga: 300N.....	121
Figura 4-40.	Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 300 N.....	123
Figura 4-41.	Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 300 N.....	124
Figura 4-42.	Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 300 N.....	125
Figura 4-43.	Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos discos em função do tempo de ensaio. Carga: 300 N.....	127

Figura 4-44.	Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos pinos em função do tempo de ensaio. Carga: 300 N.....	128
Figura 4-45.	Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 300 N.....	129
Figura 4-46.	Superfície desgastada de um disco de ferro fundido vermicular totalmente coberta por detritos. Carga: 300 N.....	130
Figura 4-47.	Acúmulo de detritos produzidos durante a frenagem sobre uma lamela de grafita e/ou poros (defeitos do material).....	131
Figura 4-48.	MEV - Superfícies desgastadas dos ferros fundidos cinzentos.....	132
Figura 4-49.	Superfícies desgastadas do ferro fundido vermicular.....	133
Figura 4-50.	Seção transversal à superfície desgastada do ferro fundido vermicular. Matriz perlítica completamente destruída na borda superior, formando uma camada deformada muito pequena.	134
Figura 4-51.	Superfícies desgastadas dos pinos. Carga: 300 N. Formação de platôs de contacto com sinais de desgaste abrasivo.....	135
Figura 4-52.	Detritos coletados depois dos ensaios de desgaste. Partículas de óxido de ferro rodeadas de partículas muito pequenas de carbono, coladas às fibras de papel filtro, usado para a coleta de detritos.....	136
Figura 4-53.	Medidas de perda de massa comparativas dos discos de ferro fundido vermicular, ensaiados com cargas de 300, 250 e 200 N, em função do tempo de ensaio.....	138
Figura 4-54.	Medidas de perda de massa comparativas dos discos obtidas de ensaios de desgaste realizados com carga de 300, 250 e 200 N, em função do tempo de ensaio.....	139
Figura 4-55.	Desgaste medido nos discos de ferro fundido. Carga: 100 N...	140
Figura 4-56.	Desgaste medido nos pinos desgastados. Carga: 100 N.....	142
Figura 4-57.	Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 100 N.....	144

Figura 4-58. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 100 N.....	145
Figura 4-59. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 100 N.....	146
Figura 4-60. Valor médio da rugosidade dos discos desgastados. Carga: 100 N.....	147
Figura 4-61. Valor médio da rugosidade dos pinos desgastados. Carga: 100 N.....	148
Figura 4-62. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 100 N.....	149
Figura 4-63. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 100 N. a) As lamelas de grafita atuam como barreiras e depósitos de detritos. b) Detritos arredondados aderidos à superfície desgastada formando.....	150
Figura 4-64. Ferros fundidos cinzentos: presença de defeitos superficiais (poros e aderências) nas superfícies desgastadas.....	150
Figura 4-65. Ferros fundidos cinzentos: marcas de desgaste abrasivo. Os poros e as lamelas de grafita servem como depósito de detritos de desgaste.....	151
Figura 4-66. Ferros fundidos cinzentos: grande deformação plástica do material das bordas da grafita que provocará a remoção de debris por micro-fadiga e delaminação.....	152
Figura 4-67. Ferro fundido vermicular: riscamento superficial próprio do desgaste abrasivo e presença de poros nas superfícies desgastadas.....	152
Figura 4-68. Ferro fundido vermicular: preenchimento das cavidades da grafita com detritos e matriz metálica não muito deformada plasticamente.....	153
Figura 4-69. Ferro fundido vermicular: o processo de desgaste ocorre através de mecanismos de adesão e abrasão.....	153

Figura 4-70. Ferro fundido vermicular: superfície transversal à superfície de desgaste. A espessura da camada sub-superficial afetada pela forças de frenagem é desprezível.....	154
Figura 4-71. Superfície desgastada do pino. Presença de platôs de contacto e marcas de desgaste abrasivo.....	154
Figura 4-72. Superfície desgastada do pino. Formação de um debris por delaminação.....	155
Figura 4-73. Superfície desgastada do pino. Composição química dos platôs de contacto.....	156
Figura 4-74. Detritos coletados após os ensaios de desgaste. Partículas de óxido de ferro, rodeadas de partículas muito pequenas de carbono.....	157
Figura 4-75. Perda de massa comparativa dos ensaios de desgaste realizados com os discos de ferro fundido vermicular e cargas de 100 N e 60 N.....	159
Figura 4-76. Desgaste medido nos discos de ferro fundido vermicular tratado termicamente. Carga: 600N.....	161
Figura 4-77. Desgaste medido nos pinos ensaiados contra os discos de ferro fundido vermicular tratado termicamente. Carga: 600 N	162
Figura 4-78. Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N.....	164
Figura 4-79. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função da microestrutura dos discos de ferro fundido vermicular.....	165
Figura 4-80. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função da microestrutura dos discos de ferro fundido vermicular.....	166
Figura 4-81. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies desgastadas dos discos tratados termicamente. Carga: 600 N..	166

Figura 4-82. Superfícies desgastadas dos discos tratados termicamente. Carga:600N.....	167
Figura 4-83. Superfícies desgastadas dos discos de ferro fundido vermicular de matriz ferrítica. - MEV -.....	169
Figura 4-84. Superfícies desgastadas dos discos de ferro fundido vermicular de matriz martensítica. - MEV -.....	171
Figura 4-85. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies desgastadas de um disco de freio real e dos discos de ferro fundido vermicular ensaiados no laboratório com a carga de 600 N.....	172
Figura 4-86. Superfícies desgastadas do um disco de freio real.....	173
Figura 4-87. MEV - Superfícies desgastadas de um disco de freio real.....	174
Figura 4-88. MEV - Superfícies desgastadas de um disco de freio real, observadas com maiores aumentos.....	175
Figura 4-89. Seção transversal da superfície desgastada do disco de freio real. Matriz perlítica e borda superior deformada plasticamente, formando uma camada de aproximadamente 2 μm de espessura.....	176
Figura 5-1. Desgaste acumulado nos discos depois de 21 horas de ensaio em função do tipo de ferro fundido e da carga de frenagem utilizada.....	177
Figura 5-2. Desgaste acumulado nos discos em função do tipo de ferro fundido e da temperatura alcançada durante os ciclos de frenagem.....	178
Figura 5-3. Desgaste acumulado nos pinos em função do tipo de ferro fundido utilizado como disco e da carga de frenagem aplicada.....	179
Figura 5-4. Desgaste acumulado nos pinos em função do tipo de ferro fundido usado como disco e da temperatura alcançada durante os ciclos de frenagem.....	180

- Figura 5-5.** Perda de massa comparativa dos ensaios de desgaste realizados em função da carga de frenagem aplicada e da temperatura após 21 h..... 181
- Figura 5-6.** Desgaste comparativo dos pinos que foram ensaiados contra discos de ferro fundido vermicular em função da carga de frenagem e do tempo de ensaio..... 184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1.	Propriedades básicas dos ferros fundidos.....	5
Tabela 2-2.	Condutividade térmica dos ferros fundidos cinzentos em função da classe e da temperatura.....	22
Tabela 3-1.	Composição química (% em peso) dos ferros fundidos estudados.....	56
Tabela 3-2.	Ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento em todos os ferros fundidos estudados usando dilatométria.....	59
Tabela 4-1.	Características microestruturais dos ferros fundidos estudados.....	73
Tabela 4-2.	Propriedades mecânicas medidas nos ferros fundidos estudados.....	74
Tabela 4-3.	Temperaturas de transformação obtidas por dilatométria.....	77
Tabela 4-4.	Componentes da pastilha de freio identificados por microscopia óptica.....	83
Tabela 4-5.	Propriedades mecânicas da pastilha de freio.....	87
Tabela 4-6.	Frações volumétricas dos microconstituintes obtidas no ferro fundido vermicular após os tratamentos térmicos.....	88
Tabela 4-7.	Propriedades do ferro fundido vermicular tratado termicamente.....	89
Tabela 4-8.	Perda de massa acumulada dos discos. Carga: 600N.....	90
Tabela 4-9.	Perda de massa acumulada dos pinos – Carga: 600 N.....	94
Tabela 4-10.	Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, obtidos durante os ensaios de desgaste. Carga: 600N.....	67 101
Tabela 4-11.	Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito medidos utilizando o ferro fundido vermicular e carga de 500N.....	116
Tabela 4-12.	Perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular e dos pinos, ensaiados com 500 N de carga aplicada.....	117

Tabela 4-13.	Perda de massa acumulada dos discos. Carga: 300N.....	119
Tabela 4-14.	Perda de massa acumulada dos pinos. Carga: 300N.....	121
Tabela 4-15.	Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito. Carga: 300 N.....	126
Tabela 4-16.	Valores de força de atrito e temperatura medidos no ferro fundido vermicular e cargas de 250 e 200 N.....	137
Tabela 4-17.	Perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular ensaiados com cargas de 300, 250 e 200 N.....	138
Tabela 4-18.	Perda de massa dos pinos ensaiados contra os discos de ferro fundido vermicular utilizando-se cargas de 300, 250 e 200 N.	139
Tabela 4-19.	Perda de massa acumulada dos discos. Carga: 100N.....	140
Tabela 4-20.	Perda de massa acumulada dos pinos. Carga: 100N.....	142
Tabela 4-21.	Valores de temperatura, força e coeficiente de atrito. Carga: 100N.....	146
Tabela 4-22.	Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito medidos utilizando o ferro fundido vermicular e carga aplicada de 60N.....	158
Tabela 4-23.	Perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular e dos pinos, ensaiados com 60 N de carga aplicada.....	159
Tabela 4-24.	Perda de massa medida nos discos tratados termicamente. Carga: 600N. Tempo de ensaio 21 h.....	160
Tabela 4-25.	Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, obtidos durante os ensaios de desgaste com os discos tratados termicamente.....	163

RESUMO

Foi estudada a resistência ao desgaste de três ferros fundidos cinzentos, normalmente usados na fabricação de tambores e discos de freio (um da classe 250 - Fe250, outro de alto teor de carbono - FeAC e outro ligado com titânio - FeTi) e de um ferro fundido com grafita vermicular, usado na fabricação de blocos de motores.

Os ensaios de desgaste foram realizados numa máquina de desgaste pino contra disco, sendo o pino fabricado de material utilizado em pastilhas de freio de automóveis, submetidos a pressões normais cíclicas de 4, 2 e 0,7 MPa, velocidade de rotação dos discos de 500 rpm e resfriamento por convecção forçada.

O desgaste foi analisado através das medidas da perda de massa dos discos e das pastilhas. Foram medidas, também, as temperaturas alcançadas pelas pastilhas durante os ciclos de frenagem, e calculadas as forças e os coeficientes de atrito no decorrer de cada ensaio.

Os resultados mostraram que a resistência ao desgaste apresentada pelos ferros fundidos cinzentos para cada condição de carregamento foi praticamente igual para todos eles, enquanto que o ferro fundido vermicular foi o que mais se desgastou. Entretanto, foi observado também, que o desgaste dos pinos foi praticamente igual em todos os casos, independentemente do tipo de material usado como disco de freio.

Verificou-se também, que nos ferros fundidos cinzentos, as forças de atrito e as temperaturas foram praticamente iguais para todos eles e para o ferro fundido vermicular estes valores foram muito maiores.

Ensaio de desgaste, realizados somente com o ferro fundido vermicular, usando-se forças de atrito semelhantes às alcançadas pelos ferros fundidos cinzentos, mostraram que o nível de desgaste era praticamente igual ao observado nos discos de ferro fundido cinzento. Verificou-se também, que as temperaturas alcançadas durante estes ciclos de frenagem foram igualmente semelhantes.

O ferro fundido vermicular foi submetido também, a tratamentos térmicos de ferritização e têmpera, visando estudar a influência da microestrutura

na resistência ao desgaste deste material. Os resultados mostraram que os ferros fundidos vermiculares com matriz ferrítica desgastaram mais do que os vermiculares com matriz perlítico-ferrítica (bruta de fundição), apesar disso, tendo alcançado os mesmos níveis de temperatura e força de atrito que os discos no estado bruto de fundição. No caso do vermicular com matriz martensítica, o desgaste foi menor e as temperaturas e forças de atrito, também foram menores.

Em todos os ensaios de desgaste realizados, foi observado que, os principais mecanismos de desgaste atuantes nas superfícies desgastadas dos discos, foram: abrasivo, oxidativo e de fadiga.

No caso das pastilhas de freio, o desgaste foi provocado, principalmente, por processos abrasivos e de desgaste por fadiga e delaminação.

Análises comparativas das superfícies desgastadas, obtidas através dos ensaios realizados no laboratório e as superfícies desgastadas de um disco de freio real, mostraram que, o aspecto das duas superfícies era muito parecido e que os mecanismos de desgaste atuantes em ambos os casos foram os mesmos.

O trabalho permite concluir que o ferro fundido vermicular poderia ser usado em discos de freio de veículos automotores, obtendo-se com eles níveis de desgaste e de forças de frenagem semelhantes às obtidas com os tradicionais ferros fundidos cinzentos, mas sendo necessário utilizar pressões de frenagem menores.

ABSTRACT

The wear resistance of three different types of gray cast iron (gray iron grade 250, high carbon gray iron and titanium alloyed gray iron), used in brake disc rotors, was studied and compared with the results obtained with a compact graphite iron. The wear tests were carried out in a pin-on-disc wear-testing machine, being the pin manufactured from friction material usually used in light truck brake pads. The rotating discs (500 rpm) were submitted to cyclical pressures of 0.7, 2 and 4 MPa and forced cooled.

The wear was measured by weighing discs and pads before and after the test. The operating temperatures and friction forces were also monitored during each test.

The results showed that compact graphite iron reached the higher maximum temperatures and friction forces as well as greater mass losses than the three gray irons to any pressure applied. However, when compact graphite iron was tested with lower applied pressures and same friction forces sustained by the gray iron rotors, CGI presented the same performance the gray cast iron did.

1. INTRODUÇÃO

Um tipo de ferro fundido que vem encontrando utilização crescente em aplicações onde condições de resistência mecânica, fadiga térmica e alta temperatura estão presentes é o ferro fundido com grafita vermicular ou compacta (Compact Graphite Iron - CGI).

Este material apresenta a grafita em forma de vermes, que confere propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento (alta condutividade térmica, baixa resistência e baixo alongamento) e o ferro fundido nodular (baixa condutividade térmica, alta resistência e alto alongamento), propriedades estas muito favoráveis, quando a fadiga térmica constitui solicitação importante.

Adicionalmente, o ferro fundido vermicular pode conter elementos de liga, tais como Mo e Si, objetivando melhorar suas propriedades a quente, sendo sua utilização em coletores de escapamento já consagrada. Adições de Ti são utilizadas principalmente para aumentar a resistência ao desgaste, característica reconhecida por Guesser e Guedes (1997) na fabricação de blocos de motor e por Powell e Levering (2002) em tambores de freio de veículos de grande porte.

As propriedades mecânicas, térmicas e de desgaste oferecidas pelos ferros fundidos vermiculares fazem dele um material com grande potencial de utilização em discos de freio.

No Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, Azevedo (1991), Vélez (1992 e 1997), Guedes (1996) e Cueva (1997) vêm desenvolvendo vários estudos em ferros fundidos, especialmente em ferros fundidos nodulares. O presente trabalho se insere nesta linha de pesquisa onde será estudada a resistência ao desgaste de ferros fundidos cinzentos, normalmente utilizados em discos e tambores de freio, e de um ferro fundido vermicular, que poderia ser usado para esses fins.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição e classificação dos ferros fundidos

Os ferros fundidos são basicamente ligas de ferro, silício e carbono contendo outros elementos tais como manganês, enxofre e fósforo, os quais modificam severamente as estruturas e as propriedades das ligas resultantes.

Para Angus (1976) e Sousa Santos (1989), em termos metalúrgicos, ferros fundidos cinzentos se diferenciam dos aços simplesmente porque o conteúdo de carbono nos ferros fundidos é suficientemente alto para formar partículas de grafita durante a solidificação. Apesar de que as partículas de grafita se formam quando o teor de carbono é maior que 2% em peso, a maioria dos ferros fundidos, comercialmente produzidos, possuem entre 3 – 4%. Enquanto o carbono constitui somente de 3 - 4% em peso de um componente de ferro fundido as partículas de grafita resultantes compreendem a 10 – 15% do volume da peça fundida.

Os ferros fundidos podem ser classificados em:

Ferros fundidos brancos: Onde o carbono presente na liga encontra-se na forma de cementita ou outros carbonetos. A seqüência de solidificação e a microestrutura desses materiais podem ser interpretadas pelo diagrama de equilíbrio metaestável Fe-Fe₃C, com as modificações necessárias em virtude da presença de outros elementos químicos.

Ferros fundidos cinzentos: No qual as fases formadas na solidificação são austenita e grafita, dando-se, portanto, sua solidificação, segundo o diagrama de equilíbrio estável. Nessas ligas obtêm-se grafita na forma de veios. Este é o mais comum dos ferros fundidos e representa aproximadamente 85% da produção mundial de ferro fundido.

Ferros fundidos mesclados: Quando a solidificação resulta na formação de áreas de ferro fundido branco e de ferro fundido cinzento, devido a que, parte de sua solidificação se dá segundo o sistema estável (austenita - grafita), e parte, segundo o metaestável (austenita - carboneto).

Ferros fundidos nodulares: Em que a grafita se apresenta na forma de nódulos no estado bruto de fusão, em decorrência da adição de certos elementos químicos ou condições particulares de fabricação, que modificam a forma de crescimento da grafita.

Ferros fundidos maleáveis: São ligas que solidificam como ferros fundidos brancos, sendo posteriormente submetidos a um tratamento térmico (maleabilização), onde a cementita se decompõe em grafita e austenita ou em grafita e ferrita.

Ferros fundidos vermiculares: Onde a grafita está na forma de vermes, que é uma forma intermediária entre a grafita em veios e em nódulos. São obtidos no estado bruto de fusão, através da adição de elementos de liga e controle do processo de solidificação.

2.2. Propriedades dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e vermiculares.

O ferro fundido cinzento é o mais barato e o mais fácil de produzir em grandes quantidades mantendo suas especificações controladas. É relativamente leve, resistente, fácil de usinar, amortece muito bem as vibrações e possui uma alta condutividade térmica, devido a que as lamelas de grafita estão interconectadas entre si. Entretanto, para Macnaughtan (1998), as extremidades pontudas e lisas das lamelas de grafita atuam como planos naturais de clivagem fazendo com que este ferro fundido seja relativamente pouco resistente e frágil.

Quando se desenvolveu o ferro fundido nodular descobriu-se que havia a

formação de um tipo intermediário de grafita, entre a lamelar e a esferoidal, quando o teor de Mg adicionado (durante o processo de nodularização) era insuficiente para produzir a esferoidização da grafita. Este tipo de ferro fundido com grafita intermediária, conhecida como grafita compacta (CGI) ou vermicular, tem partículas de grafita alongadas e aleatoriamente orientadas como nos ferros fundidos cinzentos, sendo porém, menores e mais grossas, de extremidades arredondadas e superfícies rugosas, como é mostrado na figura 2-1.

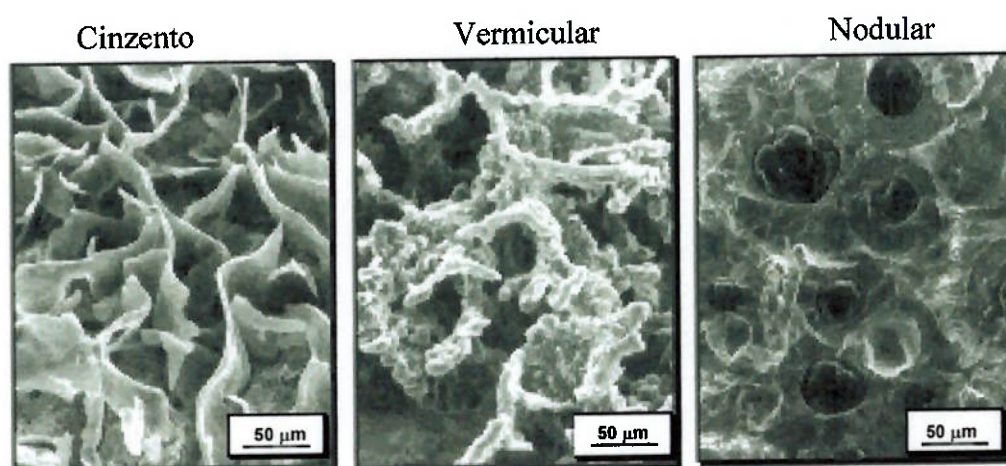


Figura 2-1. Cinzento: grafita em forma de lamelas alongadas. Vermicular: grafita em forma de lamelas curtas e grossas, aleatoriamente orientadas. Nodular: grafita em forma de nódulos. SinterCast (2002)

Da mesma forma que nos ferros fundidos cinzentos, as partículas de grafita estão interconectadas fornecendo boa condutividade térmica. As extremidades arredondadas e as superfícies rugosas previnem a formação e propagação de trincas. Estas características da grafita, segundo Pye (1982) e Liu (1981), conferem ao material um bom compromisso entre resistência mecânica e tenacidade, características de ferros fundidos nodulares, e boa condutividade térmica e propriedades de fundição, típicas dos ferros fundidos cinzentos.

Elliott (1988) afirma que os ferros fundido vermiculares exibem melhores propriedades de resistência à tração, tenacidade, ductilidade, fadiga, resistência ao impacto e melhores propriedades também em elevadas temperatura, quando comparados com ferros fundidos cinzentos de matriz semelhante.

Pye (1982) e Dunks (1981) asseguram que o ferro fundido vermicular tem resistência à tração pelo menos 75% maior e tenacidade 35% mais elevada, que o ferro fundido cinzento. E quando comparado com o ferro fundido nodular, a resistência à tração e a ductilidade são muito semelhantes entre si. Entretanto, a condutividade térmica dos ferros nodulares é menor que dos vermiculares, devido ao fato de que, no ferro fundido nodular, as partículas de grafita encontram-se isoladas de tal maneira que a contribuição desta fase para a condutividade térmica é praticamente nula. Ferros fundidos com grafita vermicular inevitavelmente incluem algumas partículas de grafita nodular, e quando o número de nódulos aumenta, a resistência e a tenacidade também aumentam, mas em detrimento da usinabilidade e da condutividade térmica.

Na tabela 2-1 são mostradas de forma resumida, algumas propriedades dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares, dependendo da microestrutura da matriz.

Tabela 2-1. Propriedades básicas dos ferros fundidos

Ferro Fundido	Matriz	Limite de Escoamento MPa	Resistência à Tração MPa	Resistência à Fadiga MPa	Condutividade Térmica W/m-K	Dureza HB
Cinzento	Perlita	115-210	200-270	95-110	44-52	175-230
Vermicular	Ferrita	240-305	330-410	155-185	40-45	130-190
	Perlita	345-415	410-580	190-225	31-40	200-250
Nodular	Ferrita	285-315	400-600	185-210	32-28	140-200
	Perlita	375-482	600-700	245-290	25-32	240-300

Dunks (1981), Pye (1982), Dawson (1999), SinterCast (2002)

Dawson (1999), estudando o ferro fundido vermicular, visando seu uso em cilindros de motores, levantou informações detalhadas das propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos vermiculares, em função da nodularidade da grafita, do teor de carbono e da influência da ferrita e da perlita. Ele classificou os ferros fundidos vermiculares segundo a nodularidade apresentada pela grafita, num ranking de -5 a 100%.

Neste ranking, o valor de nodularidade de -5% representa a uma microestrutura com grafita totalmente lamelar, 0% a uma estrutura totalmente compacta e 100% a uma microestrutura com grafita totalmente nodular.

Valores de nodularidade entre 0 e -5%, correspondem a microestruturas onde a grafita compacta está misturada com a grafita lamelar, e quanto mais negativo é este valor, mais grafita lamelar estará presente nesse ferro.

Na figura 2-2 é mostrada como exemplo uma fotografia de uma microestrutura de um ferro fundido vermicular, classificado por Dawson como tendo 10% de nodularidade.

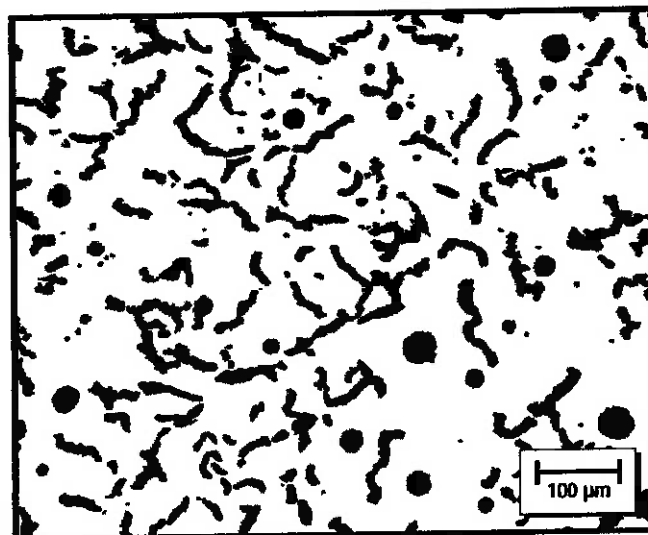


Figura 2-2. Ferro fundido vermicular com 10 % de nodularidade. Dawsom (1999)

Dawsom realizou também, ensaios de tração em três temperaturas diferentes: temperatura ambiente, 100 °C e 300 °C, sendo os resultados apresentados na figura 2-3, em que se encontram os valores de resistência à tração e limite de escoamento, em função da nodularidade e da temperatura de ensaio.

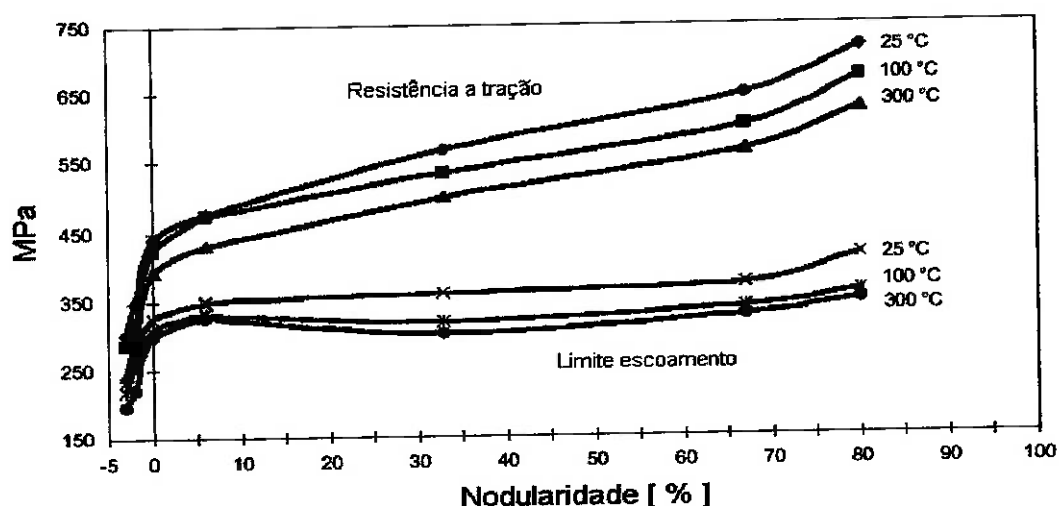


Figure 2-3: Resistência à tração e limite de escoamento, de ferros fundidos com 85 a 100% de perlita, em função da temperatura e da nodularidade. Dawsom (1999).

Esta figura mostra que, enquanto a resistência à tração aumenta gradualmente com o aumento da nodularidade, o limite de escoamento se mantém praticamente constante, e que a presença de pequenas frações de grafita lamelar provoca uma redução de 20 a 25% da resistência a tração.

A figura 2-3 mostra também, que para nodularidades maiores que 5%, o aumento da temperatura de ensaio de 25 para 300 °C, provoca uma diminuição da resistência à tração de aproximadamente 15%.

Dawson (1999) mostra também que, num ferro fundo vermicular com nodularidade entre 0 e 10%, o teor de perlita influi diretamente nos valores de resistência a tração e limite de escoamento, como é mostrado na figura 2-4. Além

disso, o aumento da temperatura de ensaio tem uma influência maior, na resistência à tração que no limite de escoamento.

Com relação ao alongamento, Dawsom afirma que nos ferros fundidos vermiculares, ele aumenta quando aumenta a nodularidade e diminui o teor de perlita.

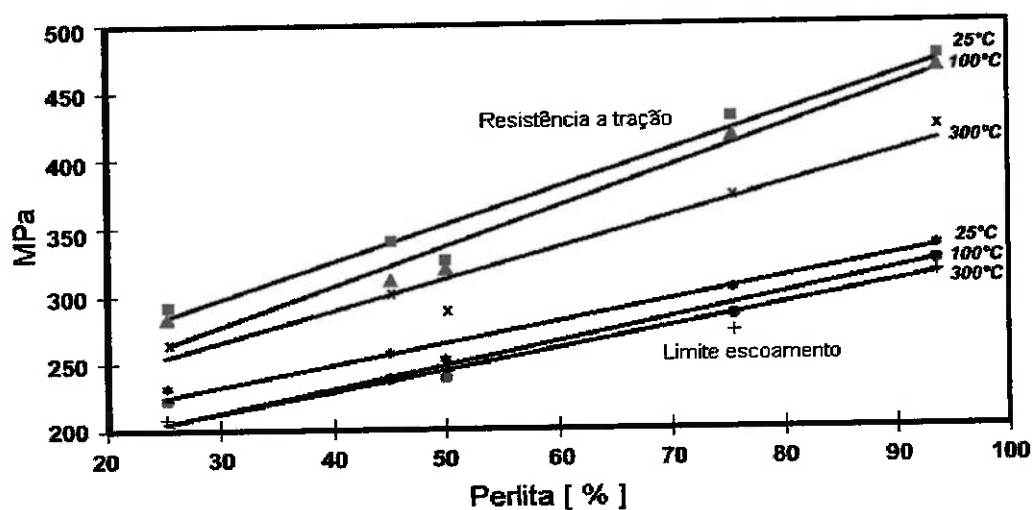


Figure 2-4. Resistência à tração e limite de escoamento de um ferro fundido vermicular com nodularidade entre 0 e 10%, em função do teor de perlita. Dawsom (1999).

Em condições de fadiga térmica, onde ocorrem mudanças frequentes de temperatura, as tensões térmicas produzidas provocam o aparecimento de deformações elásticas e plásticas que podem levar à formação de trincas. A resistência à fadiga térmica está diretamente relacionada com o nível de tensões induzidas mecânica ou termicamente, e a capacidade do material de resistir a essas tensões repetidamente.

Sabe-se que a capacidade do material de resistir tensões mecânicas depende principalmente da resistência a tração do material, enquanto que a capacidade de resistir tensões térmicas está influenciada por varias propriedades tais como: o

coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade, condutividade térmica e resistência ao “creep”.

Com o intuito de estudar o efeito dos elementos de liga, a microestrutura da matriz e a morfologia da grafita sobre a resistência à fadiga térmica de ferros fundidos, Park (1985) submeteu estes materiais a dois tipos de ensaios: um, no qual os corpos de prova tinham restrições de dilatação e eram submetidos a ciclos de aquecimento e resfriamento entre 100 e 540 °C; e outro, onde as amostras eram submetidas a choques térmicos quando eram rapidamente resfriadas desde 955 °C até 95 °C.

Park observou que, durante os ensaios onde há restrições para a dilatação, a resistência à fadiga térmica dos ferros fundidos vermiculares era um pouco maior que a dos ferros fundidos cinzentos sem elementos de liga. Entretanto, quando o ferro fundido cinzento era ligado com Ni, Cu e Mo, sua resistência à fadiga térmica ultrapassava a do ferro fundido vermicular sem adição de elementos de liga. O autor explica este comportamento devido ao fato de que, nos ferros fundidos, os elementos de liga influem diretamente na resistência a tração e na resistência ao creep. Dado que adições de Ni, Cu e Cr afetam muito pouco a resistência à fadiga térmica, ele afirma que, essa melhora observada nos ferros fundidos cinzentos seria provocada pela adição do Mo. Desta forma, o efeito benéfico do Mo sobre a fadiga térmica é atribuído a sua contribuição na melhora da resistência à tração e da resistência ao creep.

Nos ensaios de choque térmico (sem restrições de dilatação nos corpos de prova) onde a condutividade térmica é muito importante, ele observou que, a resistência à fadiga térmica dos ferros fundidos cinzentos é muito superior a dos ferros fundidos vermiculares. Verificou que com menos de 200 ciclos de ensaio, os ferros fundidos vermiculares desenvolviam grandes trincas, enquanto que os cinzentos (sem elementos de liga), apenas apresentavam trincas menores depois de 500 ciclos, e trincas maiores somente depois de 775 ciclos. Nestes mesmos ensaios, quando foram utilizados ferros fundidos cinzentos contendo elementos de liga, notou

que, por causa de sua maior resistência a altas temperaturas, não houve qualquer sinal de trincas, mesmo depois de 2000 ciclos.

Este autor verificou ainda que, o teor de ferrita nos ferros fundidos, tem muito pouca influência sobre a resistência à fadiga térmica, quando os ensaios foram realizados com restrição de dilatação. Entretanto, quando as amostras foram submetidas a choques térmicos, observou que, os ferros fundidos vermiculares com maiores teores de ferrita, em sua microestrutura, são mais resistentes à fadiga térmica que os que têm menos.

Shea (1978), assegura que a nucleação e crescimento de trincas, durante a fadiga térmica, dependem fortemente do tipo de ferro fundido utilizado. Nos ferros fundidos cinzentos e nos vermiculares, a trinca nucleia na grafita, propagando-se também através desta fase e não na interface grafita/matriz. A propagação de trincas é preferencial pela rede de grafita interconectada e as peças fraturadas apresentam pequeno número de trincas grandes. Já nos ferros fundidos nodulares, a trinca também se inicia na grafita, mas sua propagação é diferente. A trinca se propaga pela matriz até atingir outro nódulo, e quando a trinca passa da ferrita para a perlita, ela apresenta ramificações, e as peças fraturadas apresentam um grande número de pequenas trincas.

2.3. Elementos de liga

Segundo Angus (1976), Sousa Santos (1989), Kovacs (1991) e Shiokawa (1991), os elementos de liga podem atuar como grafitizantes, como é o caso do Si, Ni, Cu, Sb e Sn, ou podem promover a formação de carbonetos como é o caso do W, Mn, Mo, V, Cr e Ti. Entre os elementos grafitizantes o Cu e o Ni são bastante utilizados para elevar as propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos. As adições de Cu normalmente são efetuadas até 2% e do Ni entre 0,5 e 1,5%, notando-se com isto uma elevação da resistência à tração de 8 a 10 % e da dureza Brinell de

10 a 20 pontos por cada 1% de adição. A adição isolada de Ni não é muito comum, em decorrência de seu elevado custo.

Os elementos de liga formadores de carbonetos são adicionados em pequenas quantidades para se evitar o aparecimento desta fase. Quando um destes é utilizado individualmente, recomendam-se teores de até 0,3% de Cr, 0,5% de Mo, 0,2% de V e 0,5% de W. Se houver a necessidade de se utilizar teores maiores de algum destes elementos, convém adicionar junto com eles, elementos de liga grafitizantes, principalmente quando a peça é submetida a altas velocidades de solidificação. Eles aumentam a resistência à tração, dos ferros fundidos cinzentos, entre 3 a 4% por cada 0,1% de adição, aumentando também, a dureza devido à tendência a reduzir a formação de ferrita livre, refinar a perlita e a formar carbonetos livres.

2.4. Sistemas de freio

Os sistemas de freio têm uma importância muito grande em qualquer veículo de passageiros, especialmente no que se refere à segurança. O propósito dos freios é reduzir a velocidade ou mantê-la quando o veículo está descendo uma ladeira, portanto, sem o freio não seria possível controlar a velocidade do veículo.

Para Rinek (1995), os freios dos veículos de passageiros têm evoluído muito nos últimos 100 anos de indústria automobilística. Desde grosseiros dispositivos mecânicos colocados nos eixos, evoluíram para cabos atuando sobre rodas de freio através de tambores de freio (primeiro nas rodas traseiras e posteriormente nas quatro rodas), e o que se seguiu foi a introdução da atuação hidráulica, alguns com sistemas servo assistidos e ultimamente pinças e discos de freio controlados eletronicamente.

Atualmente, os sistemas de freio, estão constituídos por três partes principais:

1.- *O rotor (disco ou tambor de freio)*, que acoplado à roda gira solidário a ela. Os rotores são fabricados, comumente de ferro fundido cinzento.

2.- *Pastilha/Lona de freio*, que é a parte fixa do sistema. Durante a frenagem, as pastilhas são pressionadas contra o rotor através de um pistão hidráulico.

3.- *O sistema hidráulico*, que transfere e amplifica a força aplicada no pedal de freio para o pistão hidráulico que pressiona a pastilha contra o rotor.

Para Macnaughtan (1998) os princípios básicos inerentes aos modernos sistemas de freio, são os seguintes:

- Veículos em movimento possuem uma quantidade de energia cinética que é proporcional à sua massa e à sua velocidade. Para parar um veículo em movimento, esta energia cinética deve ser dissipada em outra forma de energia, como por exemplo, calor.
- O sistema de freio moderno é acionado hidráulicamente e opera segundo a Lei de Pascal, que estabelece que a pressão aplicada a um líquido num sistema fechado é transmitida total e uniformemente em todas as direções.

Apesar do avanço tecnológico dos sistemas de frenagem, dois tipos diferentes de sistemas continuam sendo comumente usados em carros de passeio e em caminhões, os quais baseiam-se no uso de tambores e discos de freio. Na figura 2-5 são mostrados esquematicamente estes dois sistemas de freio.

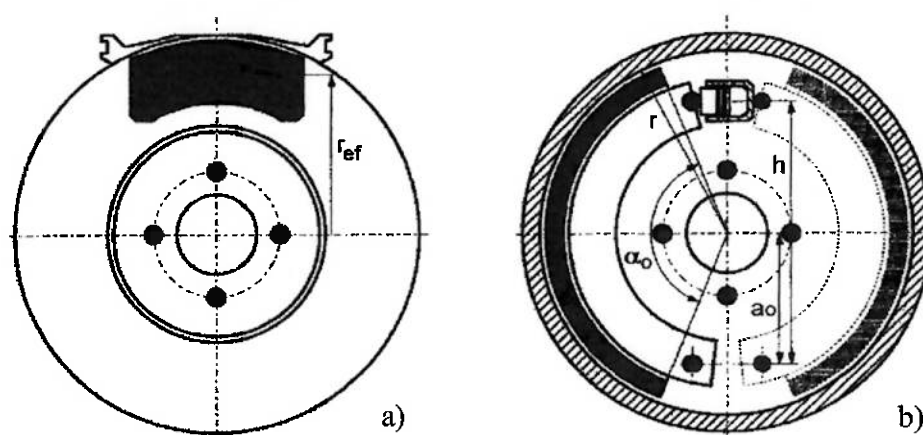


Figura 2-5. Tipos de freios freqüentemente usados: a) disco de freio e b) tambor de freio. Hohmann (1999)

A pesar de serem projetos com geometrias muito diferentes, ambos os tipos de freios usam o mesmo princípio para criar a força de frenagem: pastilhas ou lonas de freio são pressionadas contra o contra-corpo que está rodando (disco ou tambor). Devido a que a força de atrito atua contra o movimento do contra-corpo, a velocidade do veículo vai diminuindo. A força de atrito resultante é proporcional à força normal e ao coeficiente de atrito μ .

O freio típico usado nos carros consiste basicamente de um pedal, onde o motorista aplica uma certa carga e de uma unidade de transferência, que serve para amplificar e transferir a carga aplicada no pedal para o disco, como é mostrado na figura 2-6.

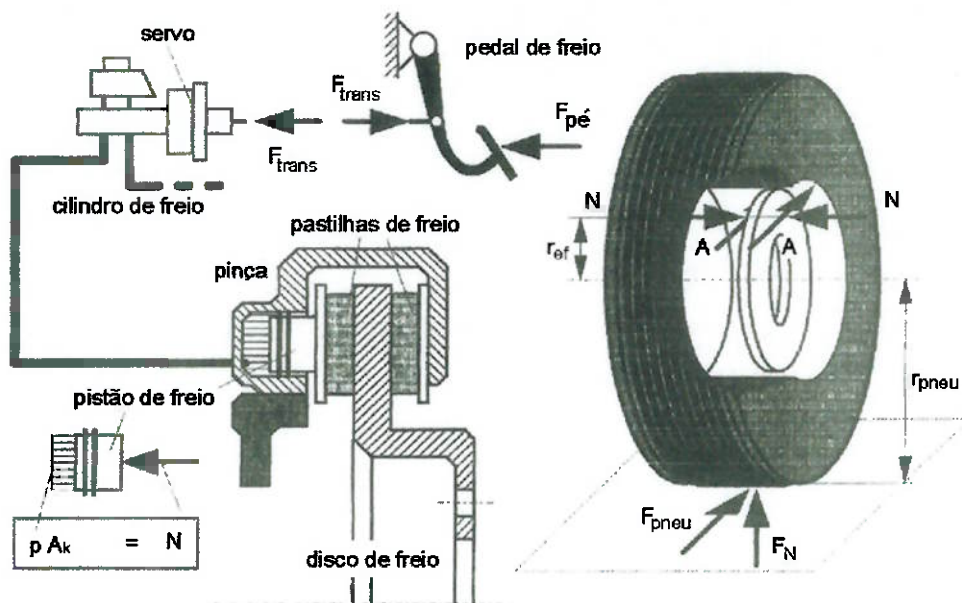


Figura 2-6. Representação esquemática da transmissão de forças num sistema de freio. Hohmann (1999)

Para discos e tambores de freio, a força normal N é aplicada através de unidades de transferência mecânicas, pneumáticas ou hidráulicas. A unidade de servo aumenta a força F_{Trans} aplicada pelo motorista. Portanto:

$$N = i_A F_{\text{Trans}}$$

i_A : relação total de transmissão do freio

F_{Trans} : força transmitida do pedal para a unidade de transferência

A força de atrito $A = \mu N$ atua sobre a superfície de atrito e a distância entre a força de atrito e o centro de revolução é o raio efetivo r_{ef} . A origem da força de atrito nos discos de freio está aproximadamente no meio da superfície de atrito, dependendo da forma da área de atrito. No caso dos tambores de freio, o raio efetivo é o próprio raio interno do tambor.

2.4.1. Tambor de freio

Antes do aparecimento dos discos de freio, todos os veículos eram equipados com sistemas de frenagem baseados em tambores de freio, fabricados normalmente, de ferro fundido cinzento.

Os problemas associados com este tipo de sistema de frenagem estavam relacionados ao próprio tambor, onde “fading” (perda de eficiência), distorções e travamentos, especialmente em altas temperaturas eram comumente relatados. Esses problemas fizeram com que projetistas, engenheiros e fabricantes de automóveis desenvolvessem melhores sistemas de frenagem, considerando que os carros se tornavam cada vez mais potentes.

A vantagem mais importante do tambor de freio quando comparado com o disco de freio é que a força necessária para operar um sistema de tambor é muito menor que aquela necessária para operar um sistema de disco. Entretanto, também apresenta algumas desvantagens, como por exemplo:

- Aumento do deslocamento do pedal e da força que necessita ser aplicada quando o tambor se expande devido ao aumento da temperatura. O aumento do deslocamento é devido a que o tambor se dilata aumentando desta maneira a folga entre as lonas e o próprio tambor. Já o aumento da força que deve ser aplicada é devido à diminuição do nível de atrito e o mau contacto entre as lonas e o tambor.
- As superfícies de atrito não são abertas à atmosfera e ao ar de refrigeração, portanto, toda a dissipação de calor ocorre através da superfície externa do tambor.
- Devido a que o próprio sistema é fechado, há mais facilidade de acúmulo de detritos de desgaste e poeiras da rua, provocando maior taxa de desgaste abrasivo.
- O freio é facilmente afetado pela água em um ambiente fechado.

- É necessário fazer ajustes periodicamente para manter a folga que deve existir entre as lonas e o tambor para não influenciar na expansão e na contração dele.

2.4.2. Disco de freio

Todas essas desvantagens apresentadas pelos tambores de freio e que foram citadas anteriormente são superadas ou reduzidas com a utilização de discos de freio, apesar de seu maior custo. Para Rinek (1995), o sistema de freio a disco oferece melhores desempenhos de frenagem, ou seja, menores distâncias de parada, e desenvolve maior torque apesar de ser um dispositivo mais compacto e mais leve. Além disso, possui maior resistência à perda de eficiência ocasionada por aumentos de temperatura “fading”, pois a dissipação de calor é muito maior devido à exposição do disco ao ar. Os detritos e a água são centrifugados e expulsos das superfícies dos discos devido à sua velocidade de rotação. O sistema de freio a disco é auto-ajustável devido a sua construção e à ausência de molas de retorno. Além disso, o disco de freio é fácil de montar e a troca das pastilhas se faz em poucos minutos. Entretanto, este sistema também apresenta algumas desvantagens, como por exemplo:

- Requerem maiores forças de operação.
- Sofrem deflexões da pinça durante a aplicação da carga de frenagem.
- Trabalham em temperaturas mais elevadas.
- Pode causar a vaporização do fluido de freio.
- Provoca altas taxas de desgaste das pastilhas.

Durante a frenagem, cada pastilha de freio é pressionada contra um lado do disco por um pistão que atua dentro de um cilindro hidráulico. O cilindro tem aproximadamente 50 mm de diâmetro. A pressão hidráulica segundo Esposito (1991), varia de 2 – 4 MPa dependendo da utilização.

Um sistema de freio a disco é mostrado na figura 2-7. As dimensões típicas para automóveis são: diâmetro do disco 290 mm e espessura de 10 mm. Ambos os lados do disco são usados para proporcionar uma maior superfície de fricção e de resfriamento. A espessura permite ao disco não só distribuir o calor mais uniformemente, mas também atuar como um efetivo depósito de calor. Essa combinação significa que um disco de freio deve ser projetado para ter alta resistência ao torque e boas características de dissipação de calor, sendo, portanto capaz de absorver grandes quantidades de energia cinética, requisito necessário para parar um automóvel em alta velocidade.

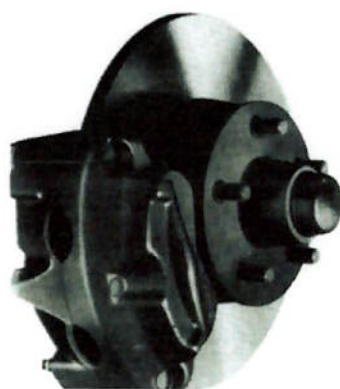


Figura 2-7. Disco de freio de automóvel.

Nos últimos 40 anos, uma das mais importantes melhoras relativas a segurança nos automóveis é decorrente da mudança de tecnologia dos sistemas de frenagem, através da introdução do sistema de freio a disco em substituição do sistema de freio a tambor. Mudança que permitiu aproveitar todas as vantagens oferecidas por este novo sistema, e que atualmente tem ficado mais seguro ainda, com a introdução das tecnologias como o ABS (antitravamento - que evita o bloqueio das rodas, dando ao motorista um melhor controle do veículo), ARS (controle de tração - que impede as rodas motrizes de perder a tração, reduzindo o

torque enviado às rodas e mesmo freando-as), BAS (assistência adicional de frenagem - que corrige a aplicação insuficiente de pressão no pedal do freio pelo motorista, em freadas de emergência, ou compensa o alívio dessa pressão quando o pedal pulsa, por causa da atuação do antitravamento ABS), EBD (distribuição eletrônica da força de frenagem - que distribui a força da frenagem entre os eixos dianteiro e traseiro em função da distribuição do peso do carro, melhorando o desempenho dos freios, principalmente em situações críticas) e ESP (programa eletrônico de estabilidade - que ao ser detectada a iminência de instabilidade, o programa reage acionando, seletivamente, os freios de rodas dianteiras ou traseiras, direitas ou esquerdas, de acordo com a situação. Se necessário, reduz o torque enviado às rodas de tração estabilizando o carro mesmo em situações extremas).

2.4.3. Tipos de discos de freio

Devido ao fato de que, a capacidade de dissipar o calor gerado durante a frenagem e a velocidade de resfriamento dos discos de freio é muito importante, atualmente. Existem, no mercado automobilístico, vários tipos de discos de freio, como mostrados na figura 2-8, cujas características geométricas visam melhorar a ventilação e a dissipação de calor gerado durante a frenagem.

Discos Ventilados: Nos discos ventilados existe um espaço entre as duas superfícies de atrito que permite a entrada de ar. Aletas ou furos de ventilação distribuídos sobre a superfície do disco permitem o controle da temperatura através do aumento da área de contato com o ar otimizando a refrigeração e tornando este sistema mais eficiente.

Discos Perfurados: Este tipo de discos permite uma melhor circulação do ar, e com isto, uma maior capacidade de resfriamento dos discos. Os gases e os *debris* formados durante o atrito entre as pastilhas e os discos de freio são expulsos do sistema mais rapidamente, mantendo as superfícies de contacto mais limpas e, por

consequente, melhorando a eficiência da frenagem; essa limpeza é muito importante em se tratando de carros de corrida. Estes discos são ligeiramente mais leves que os discos convencionais e sob condições de chuva, tem um comportamento muito melhor, pois permitem escoar a água mais rapidamente. Por outro lado, a presença dos furos diminui a área de contacto dos discos provocando uma diminuição da força de atrito e de absorção de energia.

Discos Ranhurados: Este tipo de discos tem ranhuras na superfície que ajudam a manter as superfícies mais limpas, permitindo que, os gases que se criam durante a frenagem sejam dissipados mais rapidamente. A área do disco não fica muito reduzida devido a esses "rasgos", portanto, não são observadas diminuições da força de atrito e da absorção de calor.

Discos Mistos: Existem, também, discos perfurados e com ranhuras, que apresentam vantagens e desvantagens de ambos os tipos de discos.

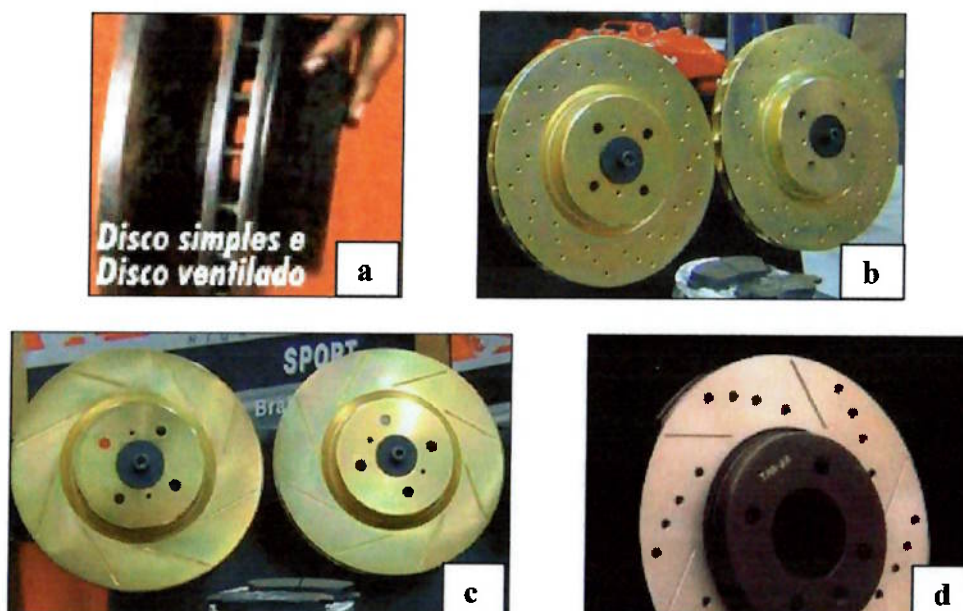


Figura 2-8. Tipos de disco de freio de automóvel. a) simples e ventilado, b) furado, c) ranhurado e d) misto.

2.4.4. Materiais dos discos de freio

A função do disco de freio é interagir com as pastilhas no sistema de freio sendo que a força de atrito resultante dessa interação transforma a energia cinética do veículo em calor. A quantidade de calor produzida depende da massa do veículo, da velocidade no momento em que os freios são aplicados, da pressão de contacto e do tempo de atuação.

Segundo Macnaughtan (1998), um veículo pesando 1.500 kg, converterá 240 kW de energia cinética em calor se for freado de 145 km/h até 0 km/h em cinco segundos. Essa grande quantidade de calor faz com que a superfície do disco possa atingir por curtos períodos, temperaturas de até 800 °C. Isto provoca um gradiente térmico entre a superfície de atrito do disco e seu núcleo, que às vezes excede 500 °C.

Portanto, para Blau (1996) o material dos discos de freio deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Deve operar com um coeficiente de atrito alto e uniforme durante o período da frenagem.
- As oscilações induzidas pelo atrito e que produzem ruído e trepidação devem ser minimizadas.
- Os materiais devem ser resistentes ao desgaste para assegurar vida longa.
- Os materiais devem ter suficiente difusividade térmica para prevenir que a interface disco – pastilha alcance temperaturas críticas, onde pode ocorrer fading, provocando perda de desempenho.
- Os materiais devem ser capazes de resistir às solicitações mecânicas e térmicas impostas durante a frenagem.

A otimização de um material para discos de freio é conseguida quando se obtém uma boa relação entre condutividade térmica e resistência mecânica. Veículos

com alta quantidade de movimento (velocidade - massa, tais como trens, caminhões de mineração e carros de corrida) requerem principalmente resistência mecânica enquanto que veículos leves (carros de passageiros) requerem, principalmente, condutividade térmica.

Desde a introdução dos discos de freio no início da década de 50, muitos materiais têm sido testados como, por exemplo: aço, ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido vermicular e materiais compósitos de alumínio e de carbono. Entretanto, até hoje, o ferro fundido cinzento, contendo grafita do tipo A e baixos teores de ferrita e carbonetos, tem sido o material mais apropriado e de melhor conjunto de propriedades mecânicas e térmicas, utilizado na fabricação de discos de freio.

Como já foi citado anteriormente, o ferro fundido cinzento é barato e fácil de produzir em grandes volumes mantendo controladas suas propriedades, é, relativamente leve, resistente e fácil de usinar, e o mais importante possui boa condutividade térmica. Outra vantagem é que seu calor específico aumenta com o aumento da temperatura, fazendo com que melhore a capacidade do disco de freio de absorver energia adicional criada durante a frenagem. E finalmente o ferro fundido cinzento, devido a sua estrutura tem excelente capacidade de amortecimento de vibrações. Os ferros fundidos nodulares e vermiculares têm maiores níveis de resistência à tração e ductilidade, mas esses aspectos não são tão importantes quanto a condutividade térmica em discos de freio de automóveis.

Macnaughtan (1998) também assegura que a resistência à tração não é o parâmetro mais importante quando se trata de materiais para aplicações de frenagem. Os primeiros discos de freio foram fabricados em ferro fundido cinzento da classe 250 (limite de resistência: 250 MPa – Norma Européia EN 1561/1997) e funcionaram perfeitamente. Porém, como a eficiência dos sistemas de frenagem melhoraram, os carros se tornaram mais rápidos e as temperaturas de operação dos discos também aumentaram. Isto provocou uma série de problemas tais como distorção, aparecimento de trincas térmicas, etc.

Para melhorar o desempenho dos sistemas de frenagem foi considerado que, o calor gerado durante a frenagem deveria ser removido o mais rápido e de forma mais eficiente possível. Isto fez com que os esforços se concentrassem em aumentar a condutividade térmica dos materiais, levando assim ao aparecimento de vários tipos de ferros fundidos cinzentos com condutividades térmicas mais elevadas, como os mostrados na tabela 2-2. As classes de ferro fundido cinzento e as propriedades apresentadas nesta tabela dependem, principalmente, dos teores de carbono. Notando-se que, quanto maior a quantidade de carbono, maior será a condutividade térmica e menor sua resistência à tração, e vice-versa.

Os ferros fundidos cinzentos da classe 150 têm teores de carbono de aproximadamente de 3,6 a 3,8 %C e para os da classe 350, aproximadamente de 2,7 a 2,95 %C.

Tabela 2-2. Condutividade térmica dos ferros fundidos cinzentos em função da classe e da temperatura.

	Classe				
	150	200	250	300	350
Matriz	Ferrítico perlítica	Perlítica			
Limite Resistência - [MPa]	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Condutividade térmica - [W/(m.K)]					
a 100°C	52,5	50,0	48,5	47,5	45,5
a 200°C	51,0	49,0	47,5	46,0	44,5
a 300°C	50,0	48,0	46,5	45,0	43,5
a 400°C	49,0	47,0	45,0	44,0	42,0
a 500°C	48,5	46,0	44,5	43,0	41,5

Norma EN 1561/1997

Experiências práticas obtidas em competições automotivas têm mostrado que aumentar a condutividade térmica dos discos de freio de ferro fundido cinzento é mais benéfico em termos de desempenho do que aumentar a resistência à tração.

Em outro tipo de aplicações, como, por exemplo, em trens, é conhecido o caso de que no início dos anos 80, a British Rail especificou o ferro cinzento da classe 250 para os discos de freio de seus trens de alta velocidade que rodavam a velocidades próximas a 200 km/h, mas teve problemas com trincas superficiais provocadas pelo calor (fadiga térmica). Na tentativa de solucionar este problema foram experimentados ferro fundido nodular e aço. A baixa condutividade térmica destes materiais provocou empenamento e conseqüentemente problemas de ruído. Elliott (1988) relata que estudos posteriores, visando resolver esse problema, concluíram que, o ferro fundido vermicular, com matriz perlítica, era o mais adequado devido a sua melhor relação entre condutividade térmica e resistência mecânica.

A previsão de um melhor desempenho do ferro fundido vermicular quando usado em discos de freio se baseia na possível otimização das propriedades de condutividade térmica, muito próxima da dos ferros fundidos cinzentos, e resistência mecânica semelhante com as dos ferros fundidos nodulares. Além disso, esses materiais oferecem melhor relação resistência/peso.

Para Park (1985), a resistência de um material à fadiga térmica, é uma combinação da resistência à fadiga mecânica causada pelos ciclos de tensões térmicas e a resistência ao creep que ocorre em altas temperaturas. Como a capacidade para resistir à fadiga mecânica depende da resistência à tração, e a resistência ao creep depende principalmente do conteúdo de elementos de liga presentes (especialmente o Mo), este autor, correlacionou através de uma equação empírica, o número de ciclos térmicos que resiste até a falha com a resistência à tração e o teor de molibdênio.

$$\text{Log } N (\text{n}^\circ \text{ de ciclos}) = 0.934 + 0.026 \text{ LR (limite de resistência em ksi)} + 0.861 * \% \text{Mo}$$

O efeito benéfico do Mo na resistência a fadiga térmica é atribuído a sua contribuição no melhoramento da resistência à tração e ao creep em ferros fundidos cinzentos.

Segundo Macnaughtan (1998), na indústria automobilística, atualmente são usados basicamente três tipos de ferros fundidos cinzentos na produção de discos de freio.

Ferros fundidos de baixo/médio carbono e alta resistência mecânica: Os ferros fundidos de baixo carbono possuem boa resistência ao trincamento, e podem conter ou não elementos de liga. Os discos sem elementos de liga normalmente são usados para equipar a maioria dos carros de passeio. Já os discos de médio carbono são quase sempre pequenos em tamanho e são usados onde limitações de espaço são importantes, por razões de condutividade térmica.

Ferros fundidos de alto carbono e baixa resistência mecânica: Que possuem maior condutividade térmica e como consequência, podem prevenir o aparecimento de trincas térmicas. São usados normalmente em sistemas de freio de carros de corrida, onde as solicitações térmicas dos materiais são mais severas, devido às altas velocidades e torques desenvolvidos por este tipo de veículos.

Ferros fundidos ligados: Elementos de liga tais como Mo, Cr, Ni e Cu adicionados ao ferro fundido melhoram a sua resistência à tração e a resistência a problemas de trincamento devido a variações térmicas.

2.4.5. Materiais alternativos

Visando reduzir o peso dos veículos e melhorar a eficiência de frenagem, nos últimos anos, outros materiais têm sido introduzidos, apesar de ainda terem

pouca importância comercial, como por exemplo: alumínio reforçado com SiC, compósitos carbono-SiC e carbono sinterizado.

Compósito de alumínio - matriz metálica (Al-MMC): Considerando a força de atrito, Grieve (1996) encontrou que o desempenho dos compósitos Al-MMC é muito semelhante àquele apresentado pelos ferros fundidos cinzentos, entretanto, a condutividade térmica pode ser duas ou três vezes maior. Os discos de Al-MMC podem ser até 60% mais leves que discos equivalentes de ferro fundido e têm difusividade térmica quatro vezes maior. O uso deste tipo de discos de freio é limitado devido à diminuição de desempenho quando em operação em temperaturas acima de 250 °C.

No entanto, Feest (1996) relata que, atualmente, existem inúmeras formulações novas de compósitos Al-MMC que oferecem um significativo incremento na temperatura máxima de operação, tornando viável sua utilização em veículos de transporte terrestre.

Neste sentido, Grieve (1998) afirma que a Lotus já fez o lançamento de um de seus carros, o modelo Elise, equipado com discos de freio dianteiros e traseiros de Al-MMC reforçado com 30% em volume de partículas de SiC. Estes discos trabalham a temperaturas bem abaixo de sua temperatura de diminuição de desempenho, diminuindo ainda em 40% o peso do conjunto, comparado com os discos de ferro fundido convencionais.

Compósito carbono – carbono: Discos de freio de compósito carbono-carbono têm sido amplamente usados em carros de corrida de alto desempenho, principalmente na Formula Um. Esses discos são extremamente caros, mas em compensação são muito leves e podem operar eficientemente em temperaturas próximas de 1000 °C. O uso deste material em veículos de passeio comuns é pouco provável devido a seu alto custo e a seu pobre desempenho em baixas temperaturas.

2.4.6. Material das pastilhas de freio

Segundo Rinek (1995), nos primeiros sistemas de frenagem, os materiais usados como materiais de atrito, não eram considerados muito importantes do ponto de vista da engenharia. Couro, madeira e materiais emborrachados ou tecidos eram amplamente usados. Mas com o aumento da velocidade dos carros e o melhoramento das estradas, foi necessário melhorar também a vida útil e o desempenho destes materiais.

Materiais mais resistentes ao calor foram inventados, como por exemplo, materiais reforçados com fibras de asbesto aglutinados com resinas orgânicas. Esses materiais eram moldados, curados a uma certa temperatura e depois fixados no suporte metálico, formando componentes, hoje conhecidas como lonas ou pastilhas de freio.

Durante alguns anos pastilhas de freio com fibras de asbesto foram amplamente utilizadas na indústria automobilística, tornando-se sua fabricação uma espécie de receita de bolo particular de cada fabricante, pois cada um deles colocava pequenas quantidades de certos modificadores de atrito, para garantir um melhor desempenho. Porém, devido às propriedades cancerígenas dos asbestos, o uso destes materiais em sistemas de frenagem foi mundialmente banido a partir de 1993. Desde então, a indústria tem utilizado materiais alternativos, tais como, fibras de vidro, metais, carbono, Kevlar, cerâmicas e outros materiais.

Segundo Erickson (1999), as modernas pastilhas de freio são fabricadas a partir de diferentes tipos de materiais, os quais podem ser categorizados da seguinte maneira:

1. Materiais estruturais: fornecem a resistência mecânica às pastilhas. Comumente são usadas fibras de metal, carbono, vidro e/ou kevlar, e muito raramente, fibras minerais e cerâmicas.

2. Aditivos de atrito: são adicionados para manter estáveis as propriedades de atrito e para controlar as taxas de desgaste das pastilhas e dos discos. São usados lubrificantes sólidos como a grafita e vários sulfeto metálicos para estabilizar o coeficiente de atrito, especialmente, em altas temperaturas. Partículas abrasivas, como alumina e sílica também, são usadas para aumentar o coeficiente de atrito entre o disco e a pastilha. O propósito do uso destes materiais abrasivos é limpar as superfícies dos discos, removendo óxidos de ferro e outros filmes indesejados, que se formam e desta maneira, oferecer uma superfície de contacto melhor definida.
3. Enchimento: são usados principalmente para diminuir o preço da pastilha de freio e/ou para facilitar sua fabricação. Os mais usados são a mica e sulfeto de bário.
4. Aglutinantes: servem para manter os materiais estruturais, aditivos e enchimento aglomerados formando uma matriz termicamente estável. Normalmente é usado algum tipo de resina fenólica com adições de borracha para melhorar o amortecimento de vibrações.

Para Anderson (1992) e Rinek (1995), os materiais de atrito que, atualmente, são usados em lonas e pastilhas de freio podem ser divididos em três grupos: orgânicos, metálicos e a base de carbono.

Materiais de atrito orgânicos: O mais conhecido é aquele constituído por uma ou mais resinas aglomerantes, fibras de asbesto e aditivos que modificam as propriedades de atrito, melhoram a resistência ao desgaste, diminuem o custo, facilitam sua fabricação, mudam de cor, etc. As resinas utilizadas nos materiais orgânicos são geralmente polímeros termofixos, freqüentemente do tipo fenólica de duas etapas. Existem também outros materiais de atrito que são orgânicos,

conhecidos como orgânicos sem asbesto e os orgânicos semi-metálicos.

Os orgânicos sem asbesto utilizam outras fibras orgânicas como, por exemplo: fibra de vidro, lã mineral e outras.

Os orgânicos semi-metálicos se diferenciam dos orgânicos sem asbesto porque eles têm uma faixa restrita de composição, com propriedades únicas de atrito e desgaste. Estes materiais contêm aproximadamente 65% em peso de ferro, 10 a 20% de lã de aço, 15% de grafita sintética e 10% de uma resina aglomerante fenólica resistente ao calor. Estes materiais têm melhor desempenho em altas temperaturas do que materiais com matriz orgânica. Inicialmente foram testados em carros de corrida e depois colocados na maioria dos carros de passeio. Entretanto, este material tem menor coeficiente de atrito, necessitando maiores forças de frenagem, além de ser severo com os discos de freio, provocando maior desgaste.

Materiais de atrito metálicos: Os materiais de atrito metálicos (quase não são mais usados) são constituídos por uma matriz metálica. São compostos basicamente de Cu e Fe, a maioria são sinterizados no estado sólido e freqüentemente são usados aditivos inorgânicos para melhorar seu desempenho. Estes materiais têm sido utilizados em aplicações onde altas potências estão envolvidas, como por exemplo, carros de corrida ou trens de alta velocidade.

Outro material de atrito metálico usado em alguns discos e tambores de freio de veículos pesados é ferro sinterizado com grafita. O ferro fundido, também é um material de atrito metálico que é usado em velhos sistemas de frenagem de trens, mas hoje em dia não são conhecidas aplicações deste material na indústria automobilística.

Materiais de atrito com base de carbono: Compósitos carbono-carbono foram desenvolvidos para discos de freio de aviões militares e comerciais. Alguns são usados em carros de corrida onde o peso é crítico, o desempenho é preponderante e o custo é secundário, mas sua utilização em carros de passeio comuns é um sonho

ainda distante devido a seus custos altamente proibitivos.

Materiais de atrito carbono-carbono são feitos de fibras de carbono, também chamadas fibras de grafita que são aglomeradas com carbono amorfo. Aglomerantes amorfos são fabricados através do cozimento em alta temperatura de resinas orgânicas ou por processos de deposição química. Depois destes processos, o material resultante é essencialmente carbono puro com baixa porosidade.

2.4.7. Mecanismos de desgaste presentes nos sistemas de frenagem de veículos automotores

Resenha Histórica

Um dos mais importantes e interessantes fenômenos físicos relacionados com sistemas de freio é o atrito. O atrito se produz pela interação entre o disco e a pastilha de freio, durante a frenagem.

O atrito é conhecido desde os tempos mais remotos. Leonardo Da Vinci [1452-1519] foi um dos primeiros cientistas a estudar sistematicamente o atrito. Ele percebeu a importância do atrito no funcionamento das máquinas e analisou todos os tipos de atrito. Ele chegou a fazer uma distinção entre atrito por deslizamento e atrito por rolamento. Ele estabeleceu duas leis básicas do atrito, duzentos anos antes de Issac Newton ter definido o que era a força, afirmando que:

Primeira Lei: o atrito independe da área aparente de contacto.

Segunda Lei: o atrito é diretamente proporcional a carga normal aplicada.

Além disso, Da Vinci observou também que, devido à rugosidade, diferentes materiais se movem com diferentes facilidades, concluindo então que, materiais mais polidos apresentarão menores atritos.

Guillaume Amontons [1663-1705] confirmou as duas leis básicas de atrito de Leonardo Da Vinci, e ele também propôs suas teorias. Amontons afirmou que o atrito era predominantemente o resultado do trabalho necessário para: 1) arrastar uma superfície rugosa sobre outra; 2) deformar plasticamente as asperezas e 3) remover asperezas durante o contacto. Esta teoria sugere que o atrito é causado pela interferência entre as asperezas, como é mostrado esquematicamente na figura 2-9.

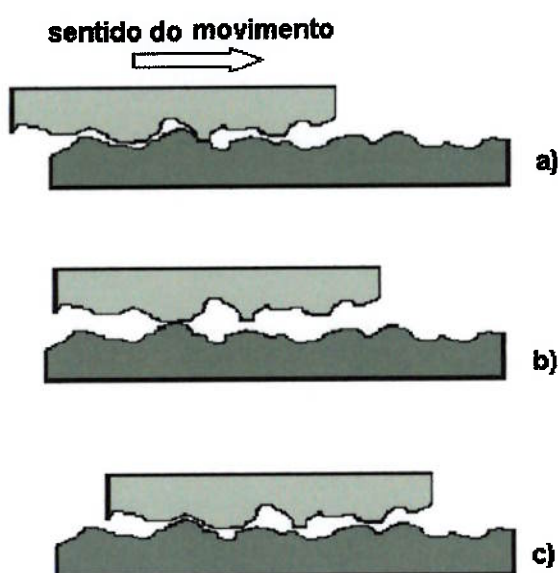


Figura 2-9. Durante o deslizamento relativo entre duas superfícies rugosas, a força de atrito representa o trabalho necessário para que uma superfície escorregue por cima da outra, passando pelas posições: a), b) e c).

Charles August Coulomb [1736-1806] fez algumas complementações à segunda lei do atrito, sugerindo que o atrito possui também, uma componente de adesão e outra de deformação. Além disso, ele afirmou que, a força de atrito é causada pelo intertravamento das asperezas, e que, o atrito é proporcional à carga normal. Coulomb publicou seu trabalho referenciando a Amontons, passando, a

segunda lei do atrito, a ser conhecida como a lei de Amontons-Coulomb, homenageando o trabalho feito pelos dois cientistas em 1699 e 1785 respectivamente.

F. Philip Bowden and David Tabor [1950] deram uma explicação física às leis de atrito. Eles determinaram que a área de contacto é uma porcentagem muito pequena da área aparente de contacto. Afirmaram que, a área real de contacto está formada pelas asperezas. Sendo que, quando a força normal aumenta, a área média de contacto de cada aspereza aumenta, e mais asperezas entram em contacto; como é mostrado esquematicamente na figura 2-10. Estes autores mostraram também, que a força de atrito é dependente da área real de contacto e que é nas asperezas que acontece toda a dinâmica do atrito.

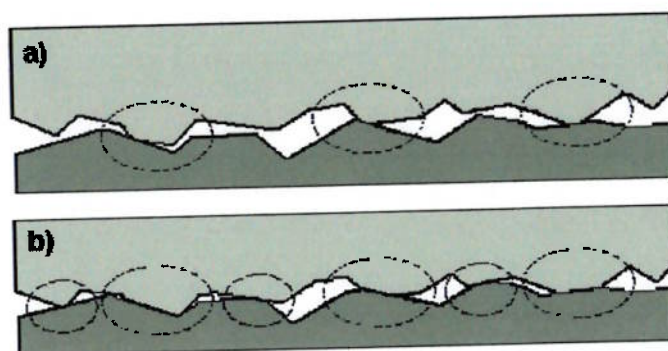


Figura 2-10. Contacto entre duas superfícies rugosas. Somente pequenas partes das superfícies estão realmente em contacto. A área real de contacto aumenta com o aumento da carga. a) carga baixa, e b) carga alta.

Eriksson (2000) cita que a área real de contacto é tão pequena, que se um cubo de aço de 100x100x100 mm, com uma dureza de 3 GPa, é apoiado sobre uma superfície plana, a área aparente de contacto seria 10.000 mm². Mas a área real de contacto é somente 0.03 mm², ou seja, 300.000 vezes menor. Portanto se a força de

atrito considera a área real de contacto entre duas superfícies, pode ser facilmente entendido que a área nominal de contacto não afeta a força de atrito. Pode-se entender também, que se a área real de contacto é duplicada através da duplicação da carga normal, ocorrerá duplicação da força de atrito.

Estudos mais recentes sob atrito analisam o contacto entre as asperezas em escala microscópica, considerando também, variáveis como a deformação e adesão. A invenção do microscópio de força atômica (AMF – atomic force microscope) em 1986 está possibilitando aos cientistas realizar estes estudos, pois este equipamento permite visualizar a topografia das superfícies em contacto.

Todos os trabalhos que, historicamente vem sendo realizados sobre o atrito, têm como objetivo principal explicar o desgaste dos materiais e entender melhor os mecanismos que estão envolvidos neste fenômeno.

Segundo a norma DIN 50320, nos processos de desgaste estão envolvidos basicamente quatro mecanismos de desgaste ou uma combinação deles. Estes mecanismos são:

Adesão – que é formação e posterior rompimento de ligações adesivas interfaciais. p.e. juntas soldadas a frio.

Abrasão – que é remoção de material por sulcamento.

Fadiga Superficial – que é a fadiga mecânica e a posterior formação de trincas em regiões da superfície devido a tensões cíclicas tribológicas que resultam na separação de material.

Reação triboquímica – que é formação de produtos de reação química resultantes da interação química entre os elementos de um tribosistema, iniciada por ação tribológica.

Desgaste Oxidativo

O atrito provocado pelo contato entre duas superfícies deslizando uma sobre outra, produz picos de temperatura em alguns pontos isolados. A magnitude dessas temperaturas depende muito da velocidade relativa das superfícies, e pode facilmente alcançar algumas centenas de graus Celsius.

Hutchings (1992) afirma que, para a maioria dos metais, são necessárias apenas velocidades de deslizamento moderadas para que essas regiões de alta temperatura sejam grandes o suficiente para formar ilhas ou platôs de óxido, as quais crescem até uma espessura crítica formando camadas protetoras das superfícies que reduzem o contato metal-metal.

As elevadas pressões de contato entre as asperezas, ou a microfadiga, provocam o trincamento destas ilhas levando a formação de partículas de desgaste não metálicas. Na presença de uma atmosfera de oxigênio, as partículas de desgaste são constituídas fundamentalmente de vários tipos de óxidos, que dependem diretamente da temperatura. É sabido que em baixas temperaturas a oxidação ocorre somente no contato entre as asperezas, e está associada com os picos de temperatura. Em altas temperaturas, ocorre oxidação generalizada das superfícies, inclusive, a oxidação fora de zona de contato pode ser a mais dominante.

No desgaste oxidativo de aços, o óxido predominante nos *debris* muda com a velocidade de deslizamento e a temperatura de contato: em baixas velocidades e temperaturas, predomina o α -Fe₂O₃; em altas velocidades e temperaturas o FeO; e sob condições intermediárias o Fe₃O₄.

A oxidação durante o deslizamento é muito mais rápida que em condições estáticas, especialmente em baixas temperaturas; por esta razão, uma certa espessura do óxido que demora anos para se formar em condições estáticas, pode se desenvolver em algumas horas ou minutos durante o deslizamento.

Uma das teorias que explica o mecanismo pelo qual as partículas de óxido se tornam *debris* de desgaste sugere que o óxido formado na ponta de uma aspereza é

removido quando acontece o contacto com a outra superfície de desgaste, e essa aspereza sem óxido será oxidada novamente, e o novo óxido formado será removido outra vez durante o contacto com o contra-corpo. Este processo de desgaste continua mediante a remoção e o ressurgimento das camadas protetoras das superfícies de contacto, e é conhecido como oxidação-raspagem-reoxidação. As finas partículas de óxido removidas desta forma se aglomeram e podem chegar a formar grandes partículas antes de serem finalmente removidas como *debris*, as quais podem provocar abrasão das superfícies em contacto, como é mostrado na figura 2-11.

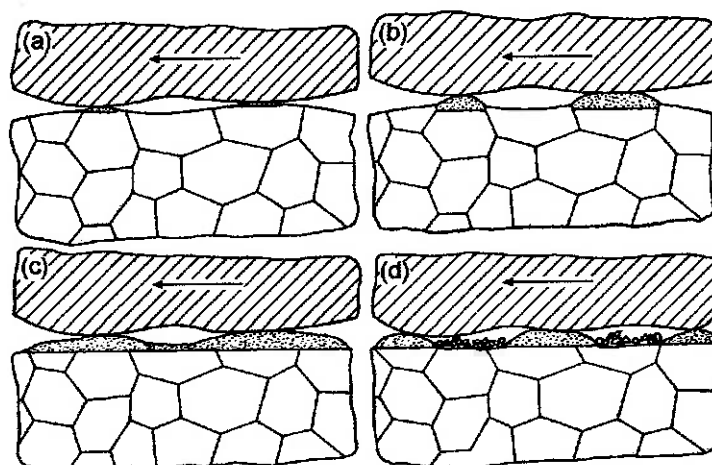


Figura 2-11. Processo de desgaste oxidativo: a) formação ilhas de oxido, b) e c) crescimento dessas ilhas, e d) destruição das camadas oxidadas e formação novas ilhas de oxido. *Debris* entre as duas superfícies. Zum Gahr (1987)

Desgaste Abrasivo

Este tipo de desgaste ocorre pelo deslocamento de material provocado pela ação de partículas duras entre duas superfícies que estão em movimento relativo, ou ação de partículas duras embebidas em uma ou nas duas superfícies em contacto.

A presença de partículas duras pode ser devido a: resíduos de produtos usados no processo de fabricação do material (argila, sílica), fragmentos de desgaste encruados ou partículas estranhas que entram no tribossistema (poeiras). Protuberâncias duras podem atuar também como partículas duras se a superfície do contra-corpo é mais mole que elas.

Quando uma superfície dura ou uma superfície contendo protuberâncias duras desliza sobre uma superfície mais mole provoca a formação de ranhuras na superfície desta última. A formação de *debris* (partículas de desgaste) ocorre quando o material das ranhuras é removido.

Segundo Hutchings (1992), a desgaste abrasivo pode ser classificado como: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos. Na figura 2-12, é mostrada esquematicamente a forma como atuam estes dois tipos de desgaste abrasivo.

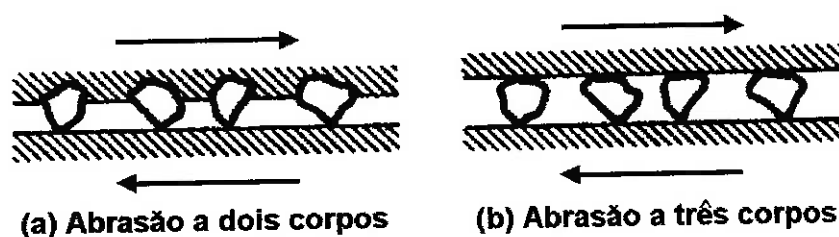


Figura 2-12. Representação esquemática do desgaste abrasivo: a) a dois corpos, e b) a três corpos. Hutchings (1992)

No desgaste a dois corpos, a remoção de material é provocada pelas protuberâncias duras do contra-corpo que não se fraturam durante o processo. Quando o desgaste ocorre sob baixas tensões caracteriza-se pelo baixo riscamento da superfície, enquanto que no desgaste sob altas tensões, as protuberâncias duras são fraturadas e a superfície apresenta um riscamento mais intenso.

No desgaste a três corpos, as partículas duras estão livres e rolam entre as duas superfícies, e apenas, uma pequena porção delas provoca efetivamente desgaste (devido ao ângulo de ataque). A maioria das partículas rola livremente ou desliza

sobre as superfícies causando somente, pequenas perdas de massa.

Em relação ao mecanismo de desgaste, pode-se classificar o desgaste abrasivo em: sulcamento, corte, fadiga e trincamento. Cada um destes mecanismos é mostrado esquematicamente na figura 2-13.

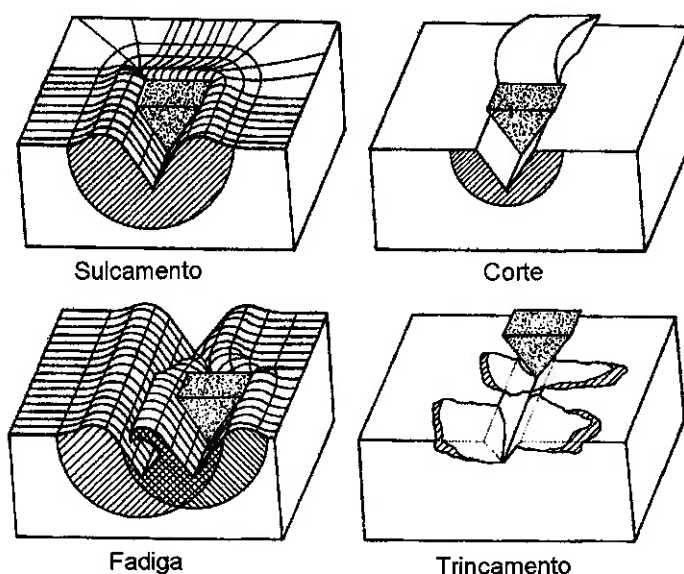


Figura 2-13. Interações físicas entre as partículas abrasivas e as superfícies dos materiais. Zum Gahr (1987)

Durante o sulcamento, a simples passagem de uma partícula abrasiva não provoca a remoção de material da superfície que está sendo desgastada. Uma proa é formada na frente da partícula abrasiva e o material é continuamente deslocado para os lados, formando um sulco. Não ocorre perda de massa neste caso. Embora o sulcamento de uma única partícula abrasiva não cause perda de massa, a ação conjunta de várias partículas abrasivas atuando simultânea e sucessivamente sobre a mesma superfície, pode deslocar o material das bordas de um lado para outro, repetidas vezes, provocando o destacamento de uma lasca por fadiga de baixo ciclo.

No mecanismo de corte puro, a perda de massa provocada pela ação de uma partícula dura é igual ao volume do sulco deixado como marca de desgaste.

O trincamento ocorre quando as partículas duras concentram tensões maiores que o limite de resistência nas superfícies dos materiais, geralmente, frágeis. Nestes casos, grandes *debris* são destacados das superfícies devido a formação e a propagação de trincas.

O sulcamento e o corte são os mecanismos dominantes quando se trata de desgaste abrasivo de materiais dúcteis. A proporção de material que é deslocado para os lados pelo sulcamento ou removida diretamente pelo corte, depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva, como é mostrado na figura 2-14.

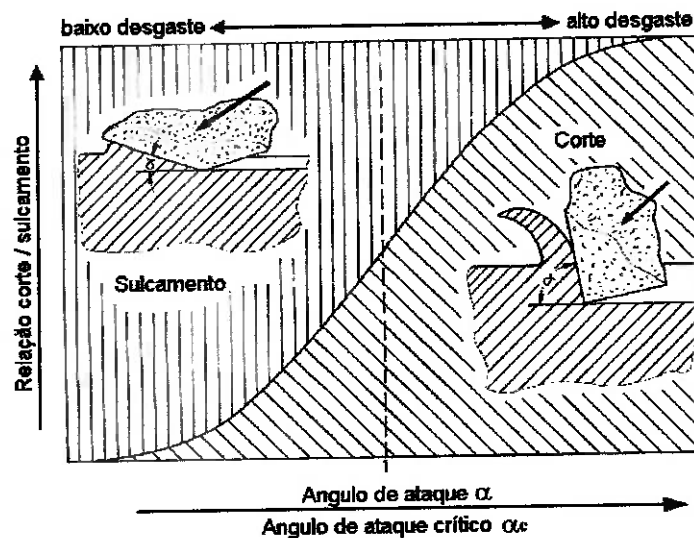


Figura 2-14. Mudança de tipo de mecanismo de desgaste e da taxa de desgaste em função do ângulo de ataque. Zum Gahr (1987)

Desgaste por Fadiga Superficial

O desgaste devido à fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e o posterior lascamento do material provocado pelo carregamento cíclico e repetitivo de superfícies sólidas. A falha por fadiga superficial segue a seguinte seqüência: deformação elástica, plástica, encruamento, e formação e propagação de trincas.

O rolamento, deslizamento e o impacto de sólidos (ou líquidos) podem criar tensões cíclicas superficiais, que produzem fadiga superficial. Este mecanismo pode ocorrer em escala microscópica, devido ao contacto repetitivo das asperezas sobre superfícies sólidas que estão em movimento relativo.

Durante o contacto por deslizamento, o carregamento e o descarregamento cíclicos, pode induzir a formação de trincas na superfície e/ou abaixo desta, ocorrendo o trincamento e posterior destacamento de grandes fragmentos de material. Segundo a teoria de delaminação de Suh, trincas sub-superficiais se propagam paralelas à superfície, como mostrado esquematicamente na figura 2-15.

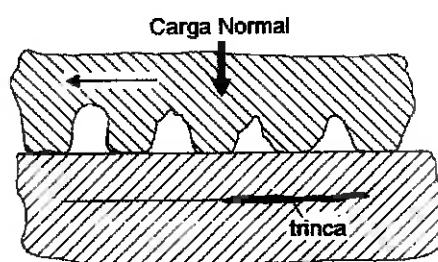


Figura 2-15. Formação de trinca sub-superficial propagando-se paralela a superfície do material. Zum Gahr (1987)

As partículas de desgaste são geradas quando uma trinca superficial alcança a superfície. Em geral, a degradação por delaminação da superfície se deve à ação simultânea da adesão, abrasão e fadiga superficial. O carregamento cíclico da

superfície é provocado pela força de atrito e pela força normal atuantes na área de contacto, sendo que a força de atrito tem uma componente adesiva.

Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo pode ocorrer quando uma superfície desliza sobre outra, e está relacionado com o contacto e interação entre as asperezas das duas superfícies. Nesta interação, geram-se forças atrativas nos pontos de contacto das asperezas, que podem ser de caráter covalente, iônico, metálico ou de Van der Waals.

Como a área de contacto nas asperezas é muito pequena, desenvolvem-se localmente altas pressões de contacto que provocam deformação plástica, adesão e conseqüentemente a formação de junções localizadas.

O deslizamento relativo, das duas superfícies em contacto, provoca a ruptura dessas junções acompanhada, freqüentemente, da transferência de material de uma superfície para a outra. A formação e ruptura dessas junções serão favorecidas por fatores como limpeza das superfícies (presença de óxidos ou outros filmes), meio ambiente (ar ou vácuo) e as propriedades físicas e químicas dos materiais deslizantes. Posteriormente, os fragmentos aderidos à uma superfície, podem se destacar e em seguida voltar a superfície inicial, ou podem ser convertidos diretamente em resíduos de desgaste.

Muitas teorias têm sido propostas para tentar explicar os mecanismos de desgaste adesivo que ocorre durante o contacto por deslizamento entre duas superfícies. Todos os mecanismos propostos envolvem deformação plástica da superfície e da sub-superfície de contacto, entretanto, diferem nos detalhes dos processos através dos quais se formam os *debris* de desgaste.

Alguns dos mecanismos, propostos na literatura são mostrados esquematicamente nas figuras 2-16, 17 e 18. Estas e outras teorias foram amplamente detalhas por Moré (1999) em seu trabalho de mestrado apresentada na EPUSP.

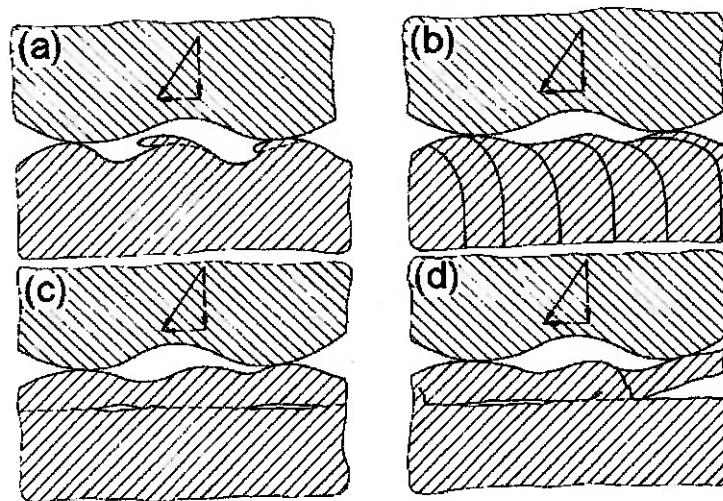


Figura 2-16. Delaminação – Suh (1973): a) alisamento da superfície do material de menor dureza, b) acumulação de deformação abaixo da superfície, c) formação de trincas sub-superficiais e d) formação de uma partícula de desgaste com a forma de uma lamina. Zum Gahr (1987)

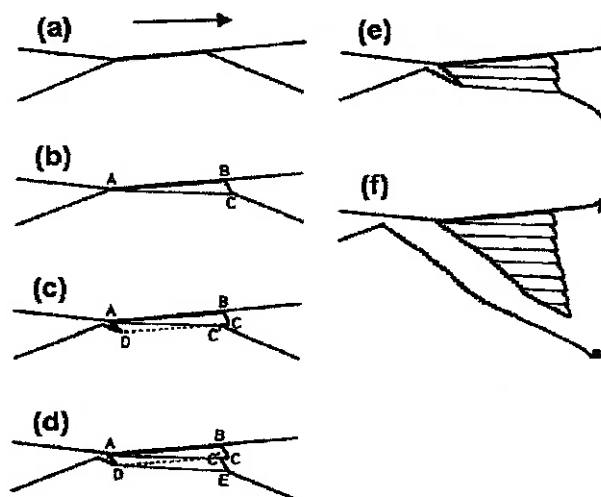


Figura 2-17. Transferência adesiva – Kabaya (1979): a) contacto entre asperezas, b) junção, c) propagação de uma trinca e pequeno deslocamento d) formação de uma segunda junção, e) propagação de uma nova trinca e outro pequeno deslocamento, e f) separação da cunha do volume do material por ruptura.

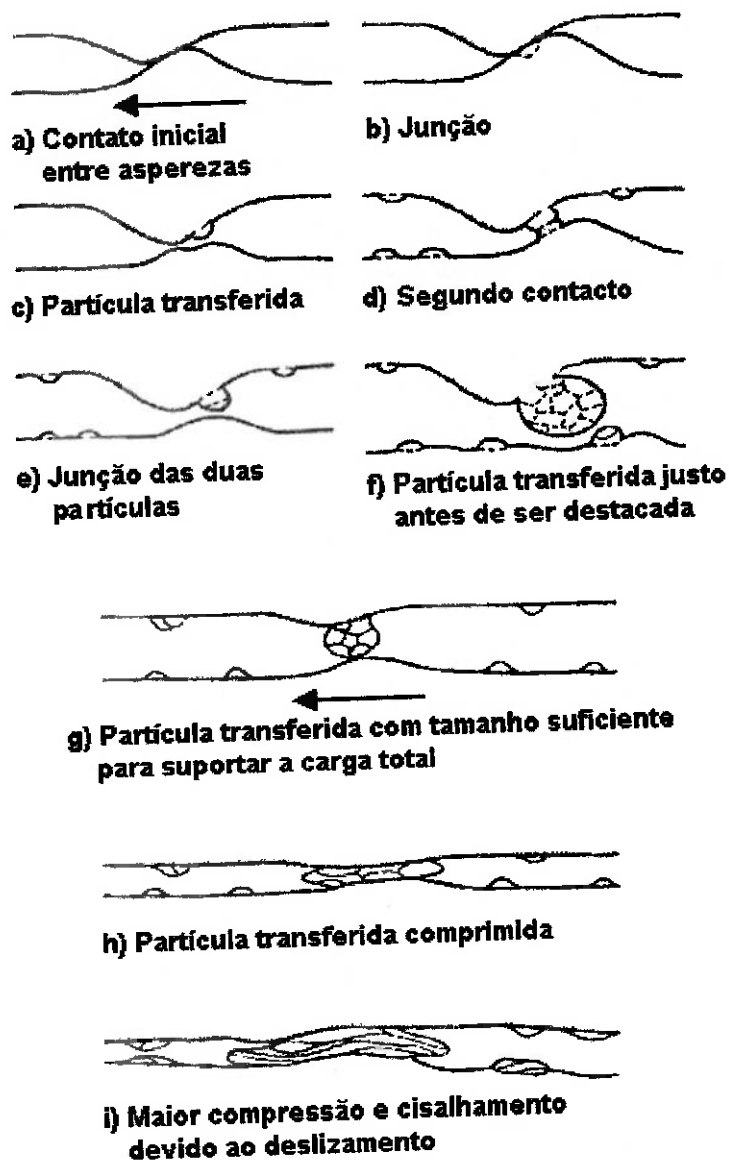


Figura 2-18. Elementos transferidos – Sasada (1979): As partículas de desgaste não são produzidas diretamente a partir dos fragmentos de material desprendidos das superfícies em deslizamento. Pequenas partículas se aderem as superfícies e se juntam com outras ficando cada vez maiores at' serem removidas do contacto como *debris*.

Transições no desgaste por deslizamento

A complexidade do desgaste por deslizamento está relacionada com a grande quantidade de variáveis que influenciam o processo e que provocam grandes mudanças nas taxas de desgaste.

Hirst e Lancaster (1956) realizando ensaios pino sobre anel (pino: latão 60/40 e anel: Stellite -61%Co, 30%Cr-), encontraram transições na taxa de desgaste quando se variava a carga aplicada, como é mostrado na figura 2-19. Eles observaram que, existia uma carga crítica, aproximadamente 0.8 kg, abaixo da qual as taxas de desgaste apresentaram valores baixos, considerados como desgaste moderado; e que acima de 0.8 kg, as taxas de desgaste eram muito altas, sugerindo um regime de desgaste severo. Este valor de carga de 0.8 kg que separa os dois regimes de desgaste foi chamado de carga de transição.

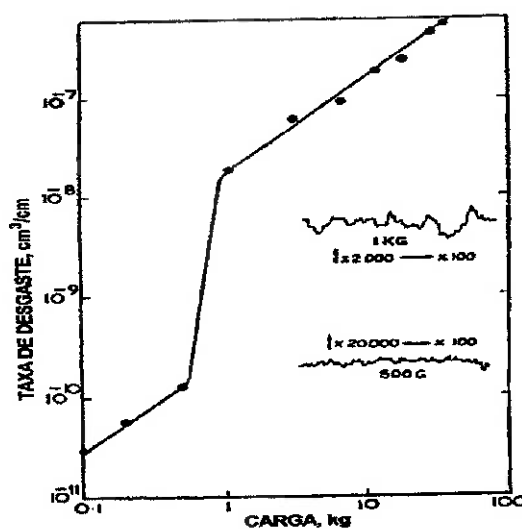


Figura 2-19. Variação da taxa de desgaste em função da carga aplicada (par Latão 60/40 e Stellite - 61% Co, 30% Cr -). A rugosidade da superfície desgastada com cargas acima de 0,8 kg é aproximadamente 100 vezes maior que a correspondente a condições de carga abaixo da transição. Hutchings (1992)

Welsh (1965), afirma que todas as características do processo de desgaste podem mudar abruptamente quando as condições de contacto sofrem pequenas alterações. Este autor cita em seu trabalho, trabalhos realizados por outros autores (Kehl & Siebel -1939-, Kragelskii & Shvetsova -1955-, Mailander & Dies -1943-) nos quais mostra que, a velocidade de deslizamento e a dureza do material provocam grandes variações na taxa de desgaste. Na figura 2-20, Welsh apresenta resultados obtidos por Kehl & Siebel, onde é observado que, quando a velocidade de deslizamento excede um valor crítico (que varia para cada material), a taxa de desgaste pode diminuir até 600 vezes, sendo que esta transição é mais evidente, no aço com menor dureza. As baixas taxas de desgaste observadas estariam associadas à oxidação superficial e a finos *debris* oxidados, enquanto que as altas taxas de desgaste seriam causadas pela presença de fragmentos metálicos relativamente grandes.

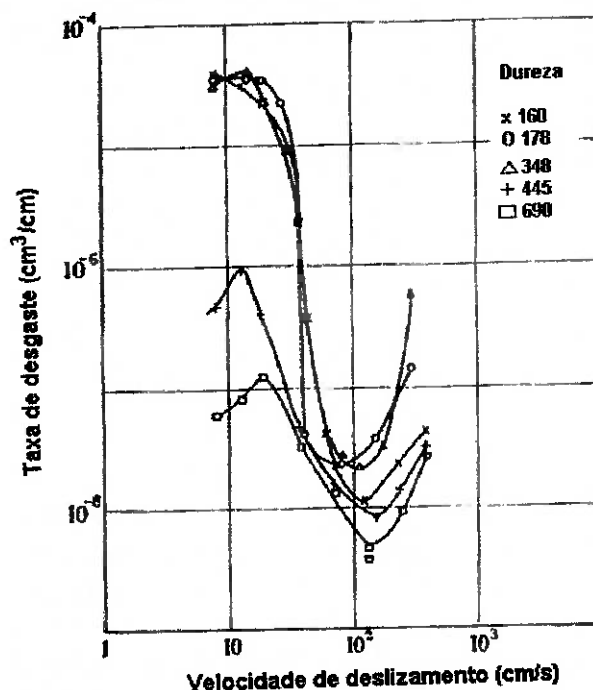


Figura 2-20. Influência da velocidade sobre a taxa de desgaste de um aço 0,64% C.

Carga: 30 kg. Welsh (1965)

Com relação à influência da velocidade na taxa de desgaste, Kragelskii & Shvetsova (1955), postularam um critério que afirma que, a velocidade crítica representa um valor no qual a temperatura originada pelo atrito é grande o suficiente para amolecer certos pontos de contacto, e seria nestes pontos, de menor dureza, que o dano se localizaria diminuindo assim a taxa de desgaste.

Welsh (1965) cita também, que a variação da carga provoca transições de desgaste denominadas por ele como: T1 e T2. Essas transições separam os regimes de desgaste severo e moderado observados ao realizar ensaios de desgaste tipo pino sobre anel (pino e anel de aço com 0,52% C), cujos resultados são mostrados na figura 2-21.

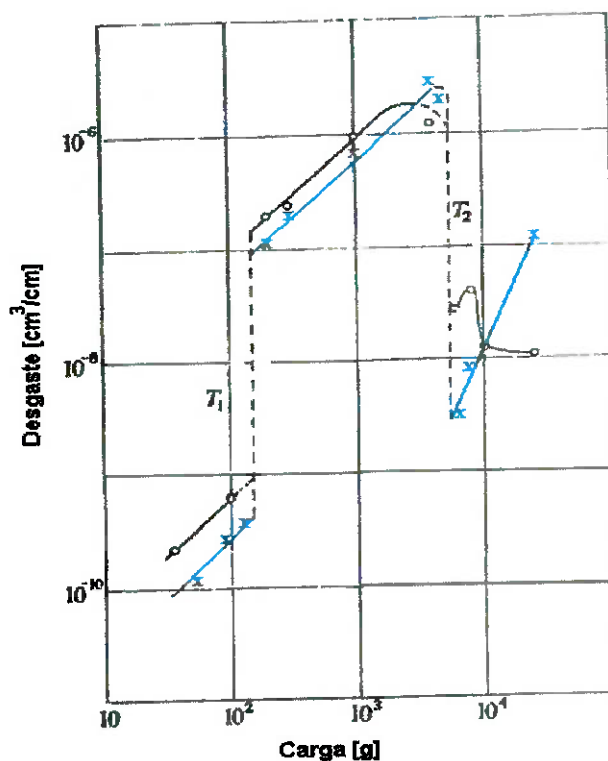


Figura 2-21. Influência da carga sobre a taxa de desgaste de um par pino-anel de aço 0,52% C. (x pino - o anel). Velocidade de deslizamento: 100 cm/s. Welsh (1965).

Este autor encontrou que, com o aumento da carga, ocorre a primeira transição - T1- e o desgaste muda de moderado para severo. Esta transição se deve à ruptura da camada de óxido formada durante o desgaste moderado, pois o aquecimento originado pelo atrito entre as superfícies, eleva a temperatura superficial provocando o aumento da espessura do filme de óxido, que protege a superfície do desgaste severo e quando esta camada é quebrada, a superfície fica totalmente exposta e se desgasta mais rapidamente. Esta é a razão pela qual, a taxa de desgaste abaixo de T1 é mais baixa do que acima dela.

A segunda transição -T2- acontece para valores de carga mais altos e provoca a mudança do desgaste de severo para moderado. Inicialmente, o autor acreditava que este comportamento se devia ao aumento da dureza da superfície originado pela transformação martensítica. No entanto, análises mais detalhadas, lhe permitiram afirmar que esta segunda transição se devia outra vez a oxidação superficial. Só que, o novo filme de óxido formado era diferente daquele visto na transição T1, pois ele se forma em altas temperaturas e possuía também, outras características.

O autor observou também, que podia existir uma terceira transição, quando o valor da carga é aumentado. Esta nova transição seria ocasionada pela transformação martensítica do aço estudado. A presença da martensita diminuiria a taxa de desgaste devido ao aumento da dureza superficial que passaria a ter um substrato mais duro para apoiar a camada de óxido.

2.4.8. Desgaste em discos de freio

No desgaste dos ferros fundidos utilizados em discos de freio intervêm diferentes mecanismos: abrasivos, adesivos e oxidativos.

Segundo Liu (1995), quando duas superfícies entram em contacto num ambiente oxidante, se produzem reações nas superfícies que geram filmes de óxido, que são removidos e recriados permanentemente, promovendo o desgaste oxidativo. Inicialmente, o desgaste é produzido por mecanismos de adesão, mas com o tempo,

os óxidos removidos se transformam em detritos que podem causar desgaste abrasivo. Este autor observou também, que se o ferro fundido tem alta resistência à tração e alta dureza, de modo que dificulte a adesão e o microcorte, o filme de óxido que se forma terá tempo suficiente para crescer até alcançar uma espessura crítica. Depois, devido às tensões normais e tangenciais, se destacará da superfície metálica de contacto, quebrando-se em forma de lascas ou de *debris* que podem atuar como partículas abrasivas. Neste caso, a oxidação elevará a taxa de desgaste do ferro fundido sob condições atmosféricas normais.

Por outro lado, se o ferro fundido tem baixa resistência à tração e baixa dureza, o desgaste ocorre por mecanismos de adesão e microcorte, em vários graus. Neste caso, a adesão é a principal causa do desgaste. Os filmes de óxido seriam benéficos nesta situação, reduziriam a tendência à adesão.

Liu verificou, também, que a resistência ao desgaste oxidativo dos ferros fundidos vermiculares é superior a dos ferros fundidos cinzentos, devido ao fato de que, os ferros fundidos vermiculares, em geral, apresentam maior resistência à tração e maior dureza. Desta maneira, o desgaste adesivo, que é mais severo que o oxidativo, não seria o mecanismo predominante no desgaste deste material.

Anderson (1990), afirma que o desgaste abrasivo observado nas superfícies de discos de freio pode ser provocado também, por elementos contidos no material das pastilhas de freio, contaminantes externos ou pela ação de partículas abrasivas formadas entre as superfícies em atrito devido à vitrificação de argilas nas superfícies quentes.

A ação abrasiva dessas partículas, em alguns casos, pode ser desejável para remover óxidos ou ferrugem que se formam nas superfícies de frenagem depois de longos períodos de desuso e para controlar camadas de detritos transferidos das pastilhas para os discos. Estas partículas, entretanto, só conseguirão desgastar o ferro fundido se forem grandes o suficiente e se tiverem maior dureza que o ferro fundido.

Contaminantes externos como poeira, água, óleo, etc, podem modificar severamente as taxas de desgaste dos ferros fundidos. Por este motivo alguns

sistemas de frenagem são protegidos contra estes elementos. Às vezes uma proteção excessiva pode comprometer a taxa de resfriamento dos componentes ou pode reter detritos de desgaste produzidos durante a própria frenagem, provocando maior desgaste.

Anderson (1990) também relata que durante a frenagem, utilizando-se pastilhas de freio semi-metálicas, são formadas camadas de detritos nas superfícies de frenagem dos discos de freio, provenientes das pastilhas. Essas camadas podem ter espessuras que variam de alguns micrometros até 40 μm ou mais. Uma vez formadas, elas protegem totalmente do desgaste as superfícies dos ferros fundidos, exceto nos lugares onde mecanismos de desgaste abrasivo estão atuando. Estas camadas, entretanto, não são estáticas: depois de longos períodos de operação em baixas temperaturas e especialmente a velocidade abaixo de 2 m/s, são removidas e reintegradas outra vez à pastilha de freio. Este mecanismo foi verificado, observando as baixíssimas taxas de desgaste medidas nas pastilhas de freio durante o período no qual as camadas estavam sendo removidas.

Chapman (1982) mostrou que o desgaste dos ferros fundidos cinzentos, usados em discos de freio, não é afetado significativamente pela morfologia da grafita, pois verificou que ferros fundidos contendo longas lamelas de grafita ou finas partículas de grafita super resfriada, ou uma mistura delas, geram taxas de desgaste muito semelhantes. Este autor verificou também, que a estrutura da matriz metálica não afeta significativamente o desgaste dos ferros fundidos. Ele observou que discos de freio com estruturas totalmente perlíticas que geram alto atrito e desgaste foram tratados termicamente para aumentar o conteúdo de ferrita e verificou que não houve redução do atrito nem do desgaste.

Chapman (1982) e Pye (1992), mostraram que variações muito pequenas no conteúdo de Ti provocam severas mudanças no atrito e no desgaste dos ferros fundidos e das pastilhas de freio, como é mostrado na figura 2-22.

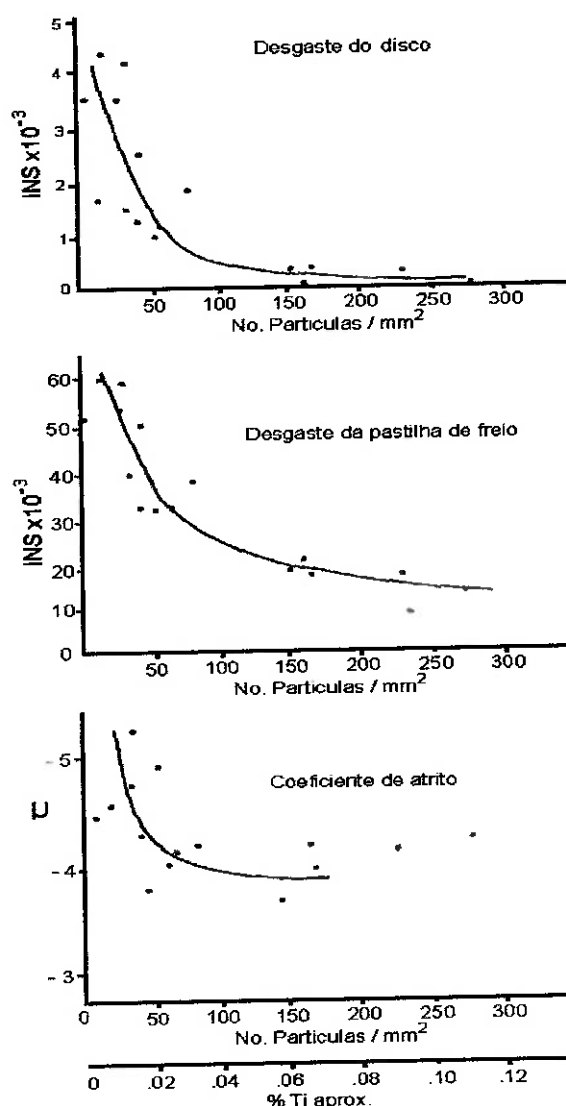


Figura 2-22 Correlação entre desempenho de frenagem e conteúdo de partículas de carbonitreto de titânio nas superfícies dos discos de freio. Chapman (1982)

Estes autores observaram que ferros fundidos cinzentos ligados com titânio apresentam carbonetos e carbonitreto de titânio na sua microestrutura, que melhoram suas propriedades de resistência ao desgaste. Estas partículas, muito duras, com tamanhos entre 2 a 6 μm de diâmetro, encontram-se dispersas na matriz

metálica (relativamente mole). Os autores afirmam também, que teores de Ti menores que 0,015 % formam no material menos de 40 partículas duras por mm^2 , provocando altos valores de atrito e de desgaste, enquanto que, teores maiores que 0,025%, formam mais de 60 partículas duras por mm^2 promovendo baixos valores de atrito e de desgaste

As diferenças observadas dos valores de atrito e de desgaste são muito grandes em ferros fundidos contendo 0,015% e 0,025% de Ti. Por isto considera-se como valor de referência um teor de 0,02% de Ti em ferros fundidos usados em discos ou tambores de freio. Efeitos semelhantes aos promovidos pelo Ti são também provocados pelo vanádio e o nióbio, os quais têm efeitos diferentes na microestrutura, mas são igualmente formadores de partículas muito duras.

Por outro lado, a deterioração das superfícies dos discos de freio depende diretamente também, do gradiente térmico existente entre as superfícies de atrito e o interior do corpo do disco. Ciclos contínuos de aquecimento e resfriamento levam à formação e propagação de trincas, as quais crescem uni-direcionalmente para o centro do disco e podem levar à falha mecânica total do mesmo.

O mecanismo de formação de trincas pode ser explicado com a ajuda da figura 2-23. O calor gerado por atrito durante a frenagem provoca uma expansão (dilatação) da superfície do disco, porém como a temperatura no interior do disco é menor que na superfície, a deformação do interior do disco é restringida. O interior permanece abaixo do limite de escoamento do material, e durante o resfriamento, o interior volta a seu tamanho inicial. Entretanto, depois que a superfície sofreu deformação plástica compressiva, experimenta contração térmica, e o núcleo provoca tensões de tração na superfície com formação de trincas. Sob condições reais de funcionamento, este processo é repetido inúmeras vezes e as trincas continuam a crescer como resultado disso. Segundo Jimbo (1990), uma forma efetiva de prevenir a ocorrência de trincas superficiais é reduzir a diferença de temperaturas entre a superfície do disco e seu interior nos instantes iniciais da frenagem.

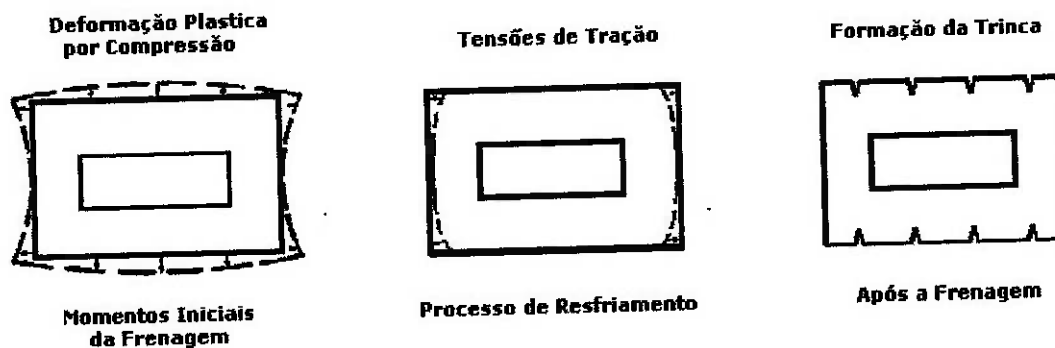


Figura 2-23. Representação esquemática da formação de trincas por fadiga térmica em discos de freio.

2.4.9. Desgaste das pastilhas de freio

Normalmente as pastilhas de freio são compostas de materiais com propriedades físicas muito diferentes, que faz com que, a situação do contacto seja muito complexa e o desgaste muito heterogêneo.

Um dos poucos trabalhos que existem na literatura relacionado ao desgaste de pastilhas de freio foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores suecos comandados por Staffan Jacobson (Erickson (1999), Bergman (1999), Erickson (2000), Erickson (2001)) que analisando os problemas do ruído produzido durante as frenagens, conseguiram desvendar várias características associadas com o desgaste das pastilhas de freio.

Esses estudos foram realizados utilizando uma pastilha de freio do tipo orgânica que equipa os automóveis da marca Volvo, modelo 850. Eles observaram que, as partículas de desgaste produzidas durante as frenagens são compactadas, nas superfícies das pastilhas, formando pequenas áreas planas que sobressaem do resto da superfície e as chamaram de platôs.

O tamanho destes platôs varia com a pressão de frenagem. Sabe-se que durante a aplicação de cargas moderadas, os platôs têm um diâmetro de 50 a 500 μm

e representam de 10 a 20 % da área nominal da pastilha de freio. Em outros casos, com cargas maiores, os platôs podem alcançar tamanhos da ordem de vários milímetros e cobrir a maior parte das pastilhas de freio.

As superfícies dos platôs apresentam marcas que indicam o tipo de contacto ocorrido. Frequentemente, esses sinais são áreas relativamente planas com pequenos sulcos na direção do deslizamento. Devido ao fato de que em todas as situações de desgaste por deslizamento, as forças de atrito são concentradas na área real de contacto, no caso das pastilhas de freio, a área real de contacto são os platôs. A situação de contacto, entretanto, é dinâmica, e grandes mudanças acontecem quando os platôs se formam ou colapsam.

Foram identificados dois tipos de platôs nas superfícies desgastadas das pastilhas de freio orgânicas, que chamaram de platôs primários e platôs secundários, como é mostrado esquematicamente na figura 2-24.

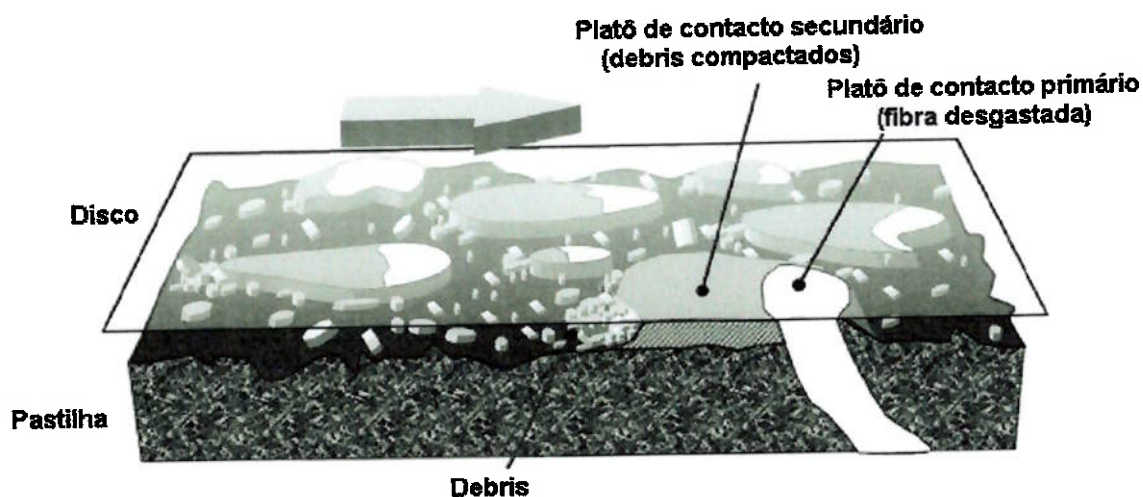


Figura. 2-24. Situação de contacto entre a pastilha de freio e o disco de freio, mostrando platôs de contacto primários e secundários, e o fluxo de *debris* parcialmente empilhados nos platôs. Erickson (2000)

Os platôs primários são formados pelos ingredientes mecanicamente mais estáveis e mais resistentes ao desgaste da pastilha, como por exemplo, fibras metálicas. Estes platôs são protuberâncias duras que formam sítios de nucleação para o crescimento de platôs secundários.

Os platôs secundários se formam quando os *debris* produzidos durante a frenagem, se acumulam ao redor dos platôs primários (figura 2-25), e devido a calor presente no contacto e as pressões de frenagem, estes empilhamentos de *debris* acabam sendo sinterizados e compactados formando os platôs secundários.

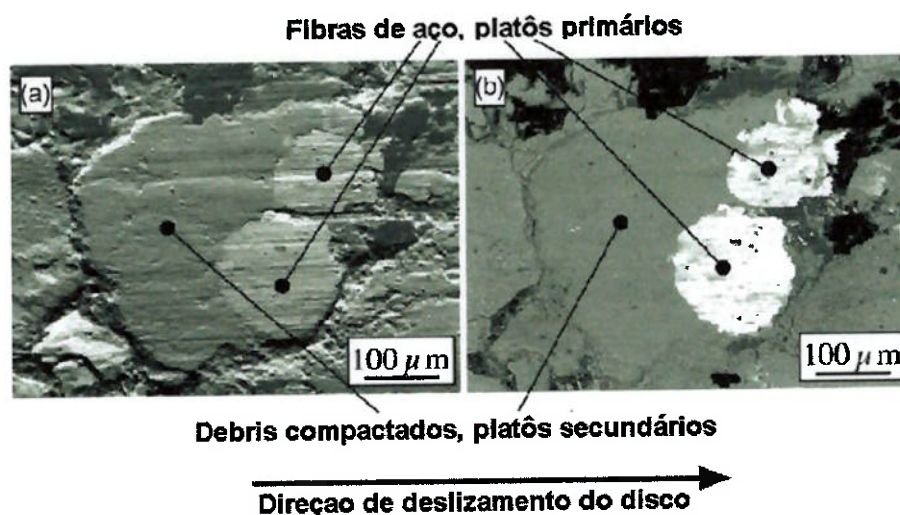


Figura 2-25. Platôs de contacto numa pastilha de freio orgânica. Os platôs primários são fibras de aço que suportam os platôs secundários formados por *debris* compactados. Fotos de MEV: a) elétrons secundários, b) elétrons retro-espalhados. Erickson (2000)

Entre os platôs se forma uma espécie de labirinto de canais rasos constituído por elementos mecanicamente mais fracos e menos resistentes ao desgaste das pastilhas, especialmente quando se trata de desgaste a três corpos (p.e. resinas poliméricas e modificadores de atrito). Estas áreas se desgastam mais rapidamente devido ao fato de que, os *debris* gerados no contacto, rolam entre o disco e a pastilha

e destroem os ingredientes menos resistentes, provocando uma contínua degradação. Este fato explica porque os platôs permanecem mais altos que o resto da superfície da pastilha.

Através de análises EDS, encontraram que, os platôs primários eram constituídos basicamente por ferro, enquanto que, os platôs secundários por óxido de ferro do tipo FeO e/ou Fe_3O_4 . O carbono e o cobre foram encontrados em áreas bem definidas, provavelmente fragmentos originados a partir da grafita, partículas de latão ou bronze da pastilha. O enxofre esteve muito espalhado sobre toda a superfície e principalmente nos canais em baixo relevo que rodeiam aos platôs.

Os platôs secundários não podem existir sem o suporte dos platôs primários, considerados como elementos estruturais. Entretanto, a criação e aniquilação de platôs são processos dinâmicos, pois os platôs podem ser degradados instantaneamente quando chocam contra uma irregularidade dos discos ou pela ação abrasiva de contaminantes externos, como poeiras, etc. E com a mesma velocidade, os *debris* podem ser compactados de novo para formar outro platô secundário. Os platôs secundários requerem condições relativamente estáveis para existir e uma carga normal mínima. Cada vez que a carga de frenagem é diminuída, grandes partes de áreas compactadas são removidas na forma de lascas, devido a mecanismo de adesão, como mostrado na figura 2-26.

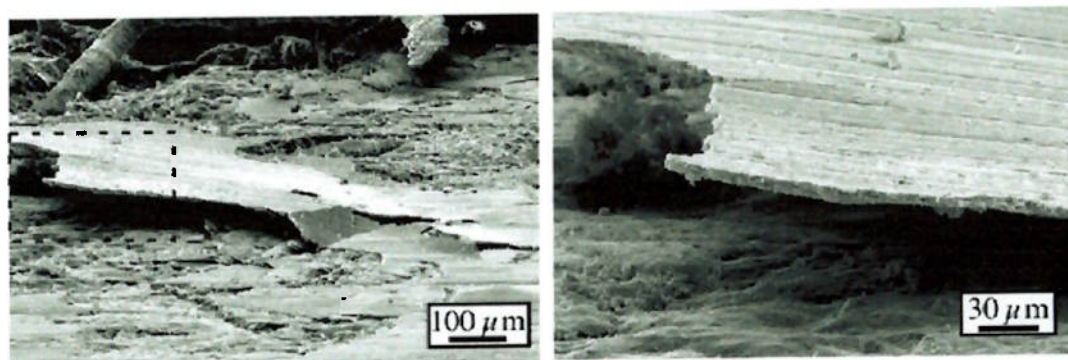


Figure 2-26. Uma lasca de platô secundário sendo removida da superfície da pastilha de freio por mecanismos adesivos. Erickson (2000)

2.5. OBJETIVOS

Este trabalho visa o estudo do comportamento em desgaste de ferros fundidos com grafita lamelar e vermicular para utilização em discos de freio. Serão determinadas as influências da forma da grafita e da microestrutura da matriz metálica nos mecanismos de desgaste em diferentes condições, através do monitoramento da temperatura de contacto, força normal, força tangencial, coeficiente de atrito e perda de massa durante os ensaios. Ensaios semelhantes serão feitos em ferros fundidos cinzentos, normalmente utilizados em discos de freio, para poder analisar as diferenças de comportamento e explicar os resultados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram doados pela Empresa de Fundição Tupy e pela COBREQ. A Tupy é a maior empresa especializada na produção de ferros fundidos do Brasil, e a COBREQ é uma das maiores fabricantes de lonas e pastilhas de freio do país.

Os ferros fundidos utilizados neste trabalho foram fornecidos em seu estado bruto de fundição, consistindo basicamente de três tipos de ferros fundidos cinzento e um tipo vermicular. Os ferros fundidos cinzentos tinham a forma de discos, de 300 mm de diâmetro por 30 mm de espessura, enquanto que os ferros fundidos vermiculares eram discos de 150 mm de diâmetro por 20 mm de espessura.

Os três tipos de ferros fundidos cinzentos utilizados são normalmente usados na fabricação de tambores e discos de freio, sendo um da classe 250 (nomeado como Fe250), um com alto teor de carbono (nomeado como FeAC) e outro ligado com titânio (nomeado como FeTi). O ferro fundido vermicular utilizado nesta pesquisa é um tipo de ferro fundido usado na fabricação de blocos de motores. Os quatro materiais apresentaram, no estado bruto de fusão, durezas na faixa de 180 – 220 HV50. As composições químicas básicas destes ferros fundidos são apresentadas na tabela 3-1.

As pastilhas de freio usadas neste trabalho são aquelas que equipam os caminhões Sprinter da Mercedes Benz e que são facilmente encontradas no mercado de autopeças do país. A intenção de usar especificamente estas pastilhas foi o fato de querer estudar o desgaste dos ferros fundidos vermiculares, visando sua utilização em discos de freio de veículos pesados de grande porte.

Tabela 3-1. Composição química (% em peso) dos ferros fundidos estudados

	Fe250	FeAC	FeTi	Vermicular
C	3,54	3,73	3,49	3,63
Si	2,15	2,07	2,27	2,06
Mn	0,51	0,78	0,53	0,51
P	0,054	0,058	0,052	0,04
S	0,1	0,085	0,09	0,015
Ti	0,012	0,014	0,028	< 0,1
Cr	0,034	0,27	0,06	
Cu	0,69	0,56	0,71	0,47
Sn	0,061	0,039	0,064	0,01
C.E.	4,27	4,44	4,26	4,33

3.2. Caracterização dos ferros fundidos no estado bruto de fundição

a) Metalografia

Análises metalográficas realizadas nos ferros fundidos estudados permitiram determinar a forma, tamanho e distribuição dos veios de grafita e quantificar as frações volumétricas presentes de ferrita, perlita, grafita e carbonetos.

As amostras foram preparadas, para observações metalográficas, seguindo o procedimento padrão da ASM (1985) de preparação de amostras de ferro fundido, isto é, lixamento a seco (lixas 180, 220, 320, 400, 600), seguido de polimento em pasta de diamante, com granulometrias de 6, 3 e 1 μm , utilizando-se álcool etílico como lubrificante. Após polimento, as amostras foram fotografadas e depois analisadas num analisador de imagens (KS 300), onde possível determinar o tamanho, forma, distribuição e fração volumétrica de grafita, pelo menos 30 campos por amostra foram contabilizados visando minimizar o erro experimental. As observações realizadas foram comparadas com os padrões mostrados na norma ASTM 247-67 (1990) que determina a forma, tamanho e distribuição da grafita.

O fator de forma da grafita, L/D, (L = comprimento do veio de grafita, D = largura do veio de grafita, figura 3-1), foi determinado através do software SCION

IMAGE, o qual a partir de fotografias tiradas das amostras com 100X de aumento, seleciona os veios de grafita e depois automaticamente calcula este fator.



Figura 3-1. Fator de forma da grafita. L = comprimento do veio de grafita, D = largura do veio de grafita.

A seguir, as amostras foram atacadas com Nital 2% para revelar seus microconstituintes: ferrita e perlita. As frações volumétricas destes microconstituintes foram medidas através de métodos de metalografia quantitativa manual, pois as frações de ferrita eram tão pequenas que não foram possíveis usar métodos automáticos de medição. Para isto foi usado um microscópio óptico marca OLYMPUS modelo BX60M e uma grade de 25 pontos. Em cada amostra foram contabilizados pelo menos trinta campos escolhidos ao acaso, usando-se um aumento de 200X.

b) Propriedades Mecânicas

Ensaio de tração: Foram realizados segundo a norma DIN 50125 (1991), à temperatura ambiente em corpos-de-prova padrão de 8 mm de diâmetro de seção reduzida. A máquina usada foi uma da marca INSTRON, modelo TTD, com uma capacidade de carga máxima de 10.000 kg e velocidade constante de deslocamento do travessão de 5 mm/min. Pelo menos três corpos-de-prova foram ensaiados para cada ferro fundido estudado. Os valores de limite de resistência e alongamento total foram determinados através de leituras diretas realizadas na máquina e/ou por cálculos como mostrado por Souza (1982).

Ensaio de impacto Charpy: Realizados também a temperatura ambiente em corpos-de-prova de 10x10x55 mm não entalhados, de acordo com a norma ASTM E-8 (1991), usando-se uma máquina universal de ensaios mecânicos marca

HECKEERT Modelo PSd 50/15, com uma escala de carga de 50 J. Pelo menos quatro corpos-de-prova foram ensaiados para cada tipo de ferro fundido estudado. Os resultados de energia de impacto absorvida foram obtidos de leituras diretas na máquina.

Dureza Vickers: Foi utilizada uma carga de 50 kgf, e pelo menos 30 medidas foram tomadas para cada ferro fundido, visando diminuir o erro experimental.

c) Dilatometria

Como nos processos de frenagem de automóveis as superfícies dos discos de freio atingem temperaturas muito elevadas, em alguns casos próximas de 800 °C, e resfriam-se rapidamente pela convecção forçada do ar, é importante saber que tipo de transformações microestruturais podem acontecer nos ferros fundidos estudados, quando submetidos a estas variações de temperatura.

Visando reproduzir essas temperaturas de aquecimento e resfriamento, foi usada a dilatometria como ferramenta para fazer os tratamentos térmicos. Para isto foi utilizado um dilatômetro ADAMEL-LOMARGI DT 1000, com aquecimento por radiação de lâmpadas de xenônio concentrada por meio de espelhos parabólicos sobre a amostra cilíndrica de 13 mm de comprimento e 2 mm de diâmetro. O forno é controlado por um computador e pode ser programado para executar os mais variados ciclos térmicos. O resfriamento foi realizado por gás nitrogênio atuando diretamente sob as amostras. O software do equipamento dispõe de recursos que possibilitam a determinação dos pontos críticos onde podem ocorrer as transformações de fase.

As variações nas dimensões dos corpos-de-prova, durante os ensaios, são detectadas por um transdutor diferencial de variação linear (LVDT), através de uma haste de sílica. O sistema de bombeamento a vácuo permite que o ar seja evacuado, a fim de minimizar problemas de oxidação e/ou decarbonetação do corpo-de-prova durante o aquecimento.

Os tratamentos térmicos realizados permitiram determinar, através de curvas de aquecimento e resfriamento contínuo, as temperaturas de austenitização, de início de transformação perlítica e martensítica.

Cinco ciclos de tratamento térmico foram realizados, variando especialmente as velocidades de aquecimento e de resfriamento, como é mostrado na tabela 3-2. Após os tratamentos térmicos as amostras foram preparadas metalograficamente e atacadas quimicamente com Nital 2%.

Tabela 3-2. Ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento em todos os ferros fundidos estudados usando dilatometria.

Ciclo	Va	T _y	t _y	Vr
1	40 °C/s	1000 °C	10 min	70 °C/s
2	40 °C/s	1000 °C	10 min	30 °C/s
3	40 °C/s	1000 °C	10 min	20 °C/s
4	40 °C/s	1000 °C	10 min	10 °C/s
5	40 °C/s	1000 °C	10 min	5 °C/s
6	40 °C/s	1000 °C	10 min	1 °C/s

Va: Velocidade aquecimento

T_y: Temperatura austenitização

t_y: Tempo de austenitização

Vr: Velocidade de resfriamento

Os métodos utilizados na determinação das temperaturas, Ac₁, T_p e M_s, são mostrados nas figuras 3-2 (a, b e c). Para a determinação destas temperaturas foi usado o método da tangente, que consiste em traçar uma linha que seja tangente à curva de dilatação e o ponto no qual as duas linhas se separam, corresponde à temperatura do ponto crítico analisado.

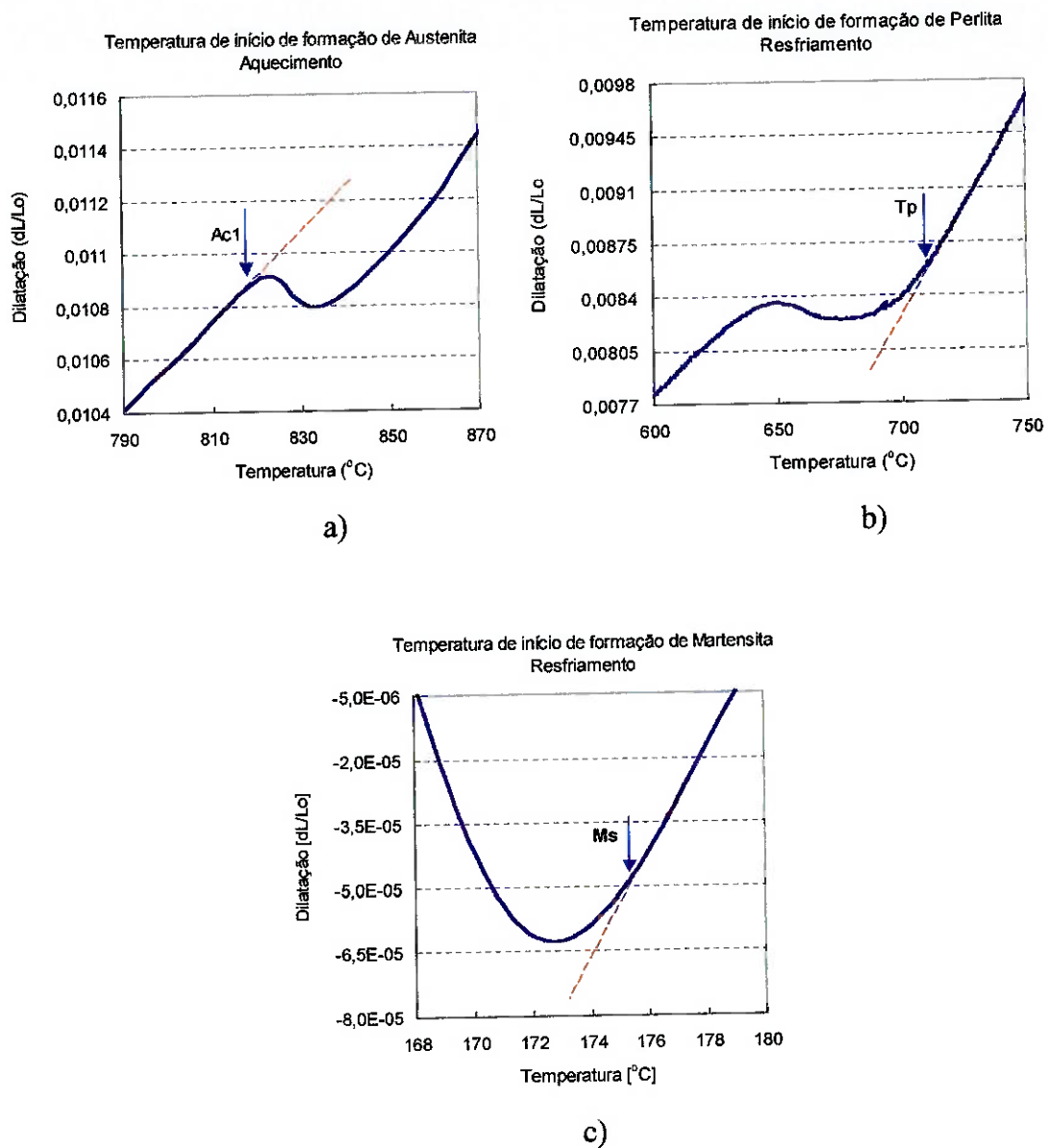


Figura 3-2. Métodos utilizados na determinação das temperaturas: a) austenitização – Ac_1 , b) formação de perlita - T_p e c) transformação martensítica - M_s .

3.3. Caracterização da pastilha de freio.

a) Fluorescência de Raios X

A determinação da composição química da pastilha de freio foi realizada no laboratório de análises químicas inorgânicas do Departamento de Química do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), usando-se espectrometria de fluorescência de raios X num equipamento da marca Philips, modelo PW2404.

b) Difração de Raios X

Através de difração de raios X foram determinados diferentes ingredientes que formam a pastilha de freio. As análises foram realizadas num difratômetro marca PHILIPS de goniômetro vertical e controlador PW 1710 com radiação monocromática de Cu K α de 40 kV e 40 mA. O campo angular (2θ) examinado foi de 2,5 a 100°. Os difratogramas obtidos foram, posteriormente analisados com um software chamado APD, que permitiu identificar com precisão seus componentes.

c) Metalografia

Análises metalográficas realizadas nas pastilhas de freio permitiram determinar a forma, tamanho e distribuição de seus constituintes. A preparação das amostras para a realização das observações metalográficas foram feitas seguindo os mesmos métodos utilizados para os ferros fundidos estudados, ou seja, lixamento inicial e polimento final até 1 μm . Após polimento foram realizadas análises quantitativas manuais, através de um microscópio óptico e uma grade de 25 pontos.

Foi utilizada também, microscopia eletrônica de varredura (MEV) para comprovar os resultados obtidos nas análises realizadas por microscopia óptica. Junto com o MEV foram utilizadas também, técnicas de análises de espectrometria por dispersão de energia (EDS - energy dispersive spectrometry), para determinar com maior clareza os componentes das pastilhas de freio.

d) Propriedades Mecânicas

Ensaio de compressão: Foram utilizados corpos-de-prova semelhantes àqueles que seriam usados nos ensaios de desgaste, ou seja, barras de base quadrada de 12 x 12 x 15 mm. Para estes ensaios foi utilizada a mesma máquina INSTRON modelo TTD que foi usada nos ensaios de tração dos ferros fundidos estudados, com uma velocidade constante de deslocamento do travessão de 2 mm/min. Pelo menos três corpos-de-prova foram ensaiados para determinar o valor de limite de resistência a compressão.

Dureza Vickers: Foram realizadas pelo menos 10 indentações nas superfícies das pastilhas de freio, utilizando-se uma carga de 30 kgf.

3.4. Ensaio de desgaste: Pino contra Disco

Os ensaios de desgaste foram realizados numa máquina de ensaios de desgaste tipo pino contra disco, Marca Plint, acoplada a um computador, com sistema pneumático de aplicação de carga e capacidade máxima de 1000 N. Na figura 3-3 são mostrados esquematicamente a máquina de ensaios utilizada e o arranjo experimental concebido.

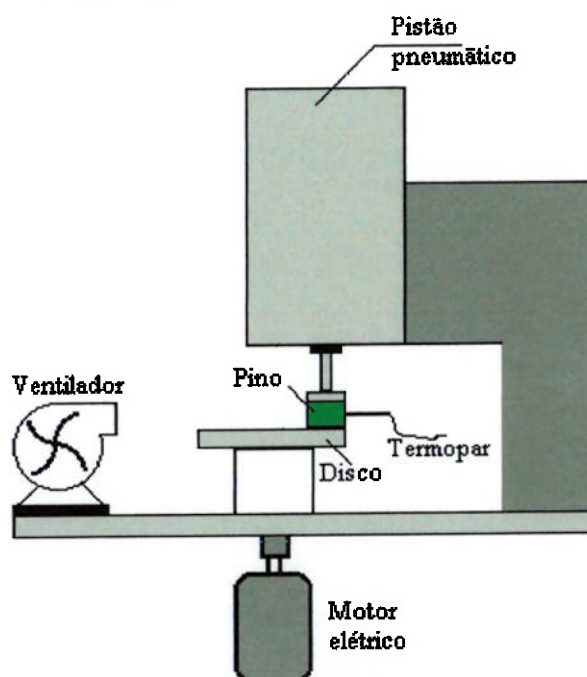


Figura 3-3. Esquema da máquina de ensaios pino no disco.

a) Corpos-de-prova

Para os ensaios pino no disco foram extraídos das pastilhas de freio corpos-de-prova na forma de pinos quadrados de 12 x 12 mm e visando garantir condições iniciais de ensaio semelhantes para todos os testes, os pinos foram lixados até lixa 400. Para prender estes pinos na máquina de ensaios de desgaste foi necessária a fabricação de hastes cilíndricas de 8 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, como mostrado na figura 3-4.

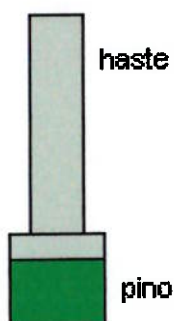


Figura 3-4. Pino (pastilha de freio) com haste usado nos ensaios de desgaste.

Dos discos de ferro fundido cinzento e vermicular, em seu estado bruto de fundição, foram extraídos corpos-de-prova para os ensaios de desgaste na forma de discos de 75 mm de diâmetro e 7 mm espessura, como é mostrado na figura 3-5 e 3-6. Estes “disquinhos” foram depois polidos metalograficamente até 1 μm , visando também, padronizar as superfícies iniciais para todos os ensaios e para todas as amostras.

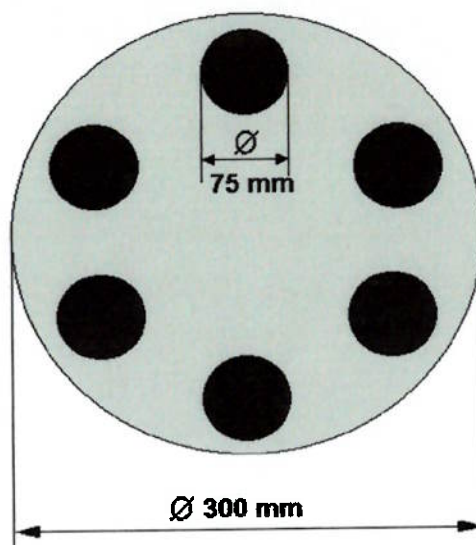


Figura 3-5. Corpos-de-prova para os ensaios de desgaste (discos de 75 mm de diâmetro) extraídos dos discos de ferro fundido cinzento de 300 mm de diâmetro.

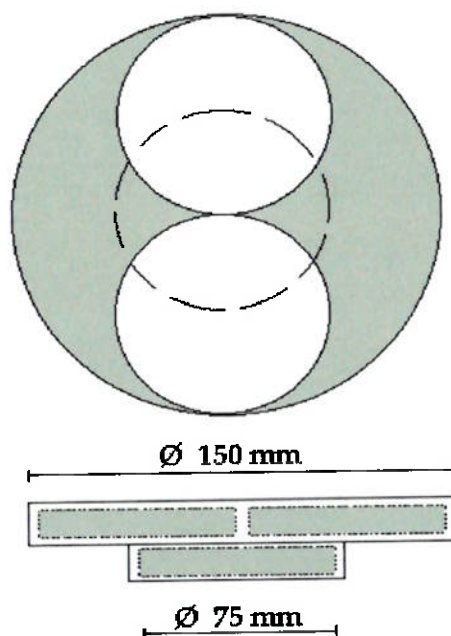


Figura 3-6. Corpos-de-prova para os ensaios de desgaste (discos de 75 mm de diâmetro) extraídos dos discos de ferro fundido vermicular de 150 mm de diâmetro.

b) Parâmetros de ensaio

Os ensaios de desgaste foram realizados utilizando-se três cargas de frenagem diferentes: 600 N (4 MPa), 300 N (2 MPa) e 100N (0,7 MPa). Estas cargas foram aplicadas sobre os discos enquanto eles giravam a 500 rpm (1,65 m/s).

O ciclo total de frenagem foi de 4 min sendo que durante 1 min foi aplicada a pressão de frenagem e nos 3 min restantes o disco girou descarregado. Durante os ciclos de frenagem o sistema pino - disco foi resfriado por convecção forçada através de um ventilador. O tempo total de ensaio foi de 20 horas, completando-se 300 ciclos de frenagem (carregamento - descarregamento). Pelo menos três discos de cada material e para cada condição de carga foram ensaiados para verificar a reprodutibilidade dos resultados.

Os ensaios foram interrompidos depois de 7, 14 e 21 horas para serem realizadas medidas de perda de massa dos discos e dos pinos, de rugosidade, para observar as superfícies desgastadas através de microscopia óptica e eletrônica de varredura, e analisar as partículas de desgaste (“debris”) recolhidas.

A balança usada para medir a perda de massa foi uma de marca Scientech de 0,0001g de precisão. A rugosidade foi medida com um rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SJ – 201. Durante os ciclos de frenagem foram determinadas, também, as temperaturas alcançadas pelos pinos e pelos discos através de termopares inseridos nos pinos, como é mostrado na figura 3-7. Foram registradas as forças normais e tangenciais e calculado o coeficiente de atrito no decorrer de cada ensaio.

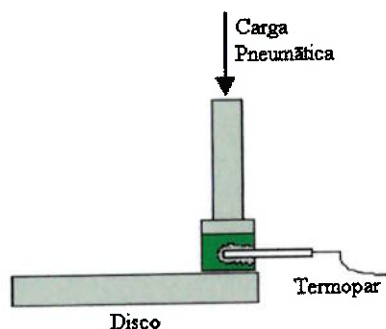


Figura 3-7. Representação esquemática da forma como foram medidas as temperaturas durante os ciclos de frenagem.

c) Ensaaios com força de atrito “igual”

Visando analisar o comportamento do ferro fundido vermicular quando submetido a forças de frenagem (forças de atrito) semelhantes às aquelas desenvolvidas pelos ferros fundidos cinzentos, foram realizados outros ensaios utilizando-se cargas de 500 N, 250 N, 200N e 60N.

3.5. Tratamentos térmicos no ferro fundido vermicular

Nos discos de ferro fundido vermicular, foram realizados vários tratamentos térmicos, visando modificar a microestrutura da matriz metálica, para estudar, posteriormente, a influência da microestrutura na resistência ao desgaste destes ferros fundidos. Foram realizados tratamentos térmicos de ferritização e têmpera.

Ferritização, os discos foram austenitizados a 900 °C por uma hora, depois resfriado até 700 °C, com uma velocidade de aproximadamente 40 °C/h, mantendo-se nesta temperatura por duas horas e finalmente resfriado dentro do forno até temperatura ambiente.

Têmpera, os discos foram austenitizados a 975 °C e mantidos nesta temperatura por 30 min, para depois serem resfriados rapidamente em óleo até a temperatura ambiente.

a) Caracterização das amostras tratadas termicamente

Metalografia: Análises metalográficas realizadas nos ferros fundidos vermiculares depois de tratados termicamente permitiram determinar as microestruturas formadas e comprovar experimentalmente aquilo que foi mostrado anteriormente nos ensaios de dilatométrica.

Difração de raios X: Este método foi utilizado para a determinação da fração volumétrica de austenita retida depois da têmpera. O estudo de difração de raios X foi realizado sobre um campo angular (2θ) de 40 a 110°, nos quais foram identificadas com muita precisão, as posições (2θ) e as intensidades (áreas embaixo dos picos) dos picos da ferrita CCC (110), (220), (211), (220) e da austenita CFC

(111), (200), (220), (311). A fração volumétrica de austenita retida ($\% \gamma_{ret}$) foi calculada de acordo com a equação (5.1) de Miller (1964).

$$\% \gamma_{ret} = \frac{1,4 I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1,4 I_{\gamma}} \quad (3.1)$$

onde:

$$I_{\gamma} = \frac{I_{\gamma 220} + I_{\gamma 311}}{2}$$

$$I_{\alpha} = I_{\alpha 211}$$

Ensaio mecânicos: Foram realizados ensaios de tração, de impacto Charpy e de dureza Vickers utilizado-se os mesmos métodos citados em itens anteriores.

b) Ensaios de desgaste

Os discos de ferro fundido vermicular, tratados termicamente, foram ensaiados utilizando-se somente a carga de 600 N (4 MPa) que forneceu uma condição mais severa de ensaio. Os parâmetros de ensaio foram mantidos inalterados, ou seja, velocidade de giro dos discos 500 rpm, ciclos de frenagem de 4 min, resfriamento por convecção forçada e 21 horas de tempo total de ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos ferros fundidos

4.1.1. Análises metalográficas

As análises metalográficas realizados nos ferros fundidos estudados permitiram determinar a forma, tamanho e distribuição da grafita e quantificar as frações volumétricas de ferrita, perlita, grafita, sulfetos e nitretos presentes.

Nas figuras 4-1, 4-2, 4-3 e 4-4 são mostradas micrografias das superfícies polidas dos ferros fundidos estudados. A morfologia da grafita nos três ferros fundidos cinzentos é constituída basicamente de longas lamelas homoganeamente distribuídas. Nas fotografias, verifica-se que embora as lamelas de grafita sejam do tipo I, existem algumas diferenças como, por exemplo, a espessura das lamelas, que no FeTi são um pouco mais finas e no FeAC são um pouco mais grossas e maciças.

A grafita do ferro fundido vermicular é muito diferente daquela observada nas amostras de ferro fundido cinzento, tendo uma morfologia típica dos ferros fundidos vermiculares, isto é, veios relativamente pequenos e grossos, e traços de grafita nodular, podendo ser classificada como sendo predominantemente do tipo III.

Foi observada também a presença de varias partículas, que análises posteriores mostraram ser de sulfetos de manganês e nitretos de titânio. Estas partículas, com formas e tamanhos variados estavam finamente distribuídas em toda a matriz. Nota-se que estas partículas nos ferros fundidos cinzentos estavam em maior quantidade e eram um pouco maiores que àquelas observadas nos ferros fundidos vermiculares. De qualquer maneira, a fração volumétrica delas não excede 2%.

As análises realizadas nas superfícies polidas e depois atacadas mostraram que as microestruturas dos ferros fundidos cinzentos foram muito semelhantes entre si, consistindo basicamente de perlita grossa, grafita lamelar e

alguns nitretos e sulfetos. Entretanto, o ferro fundido vermicular além de apresentar perlita fina, grafita e os pequeníssimos nitretos e sulfetos, apresentou também ferrita na sua microestrutura.

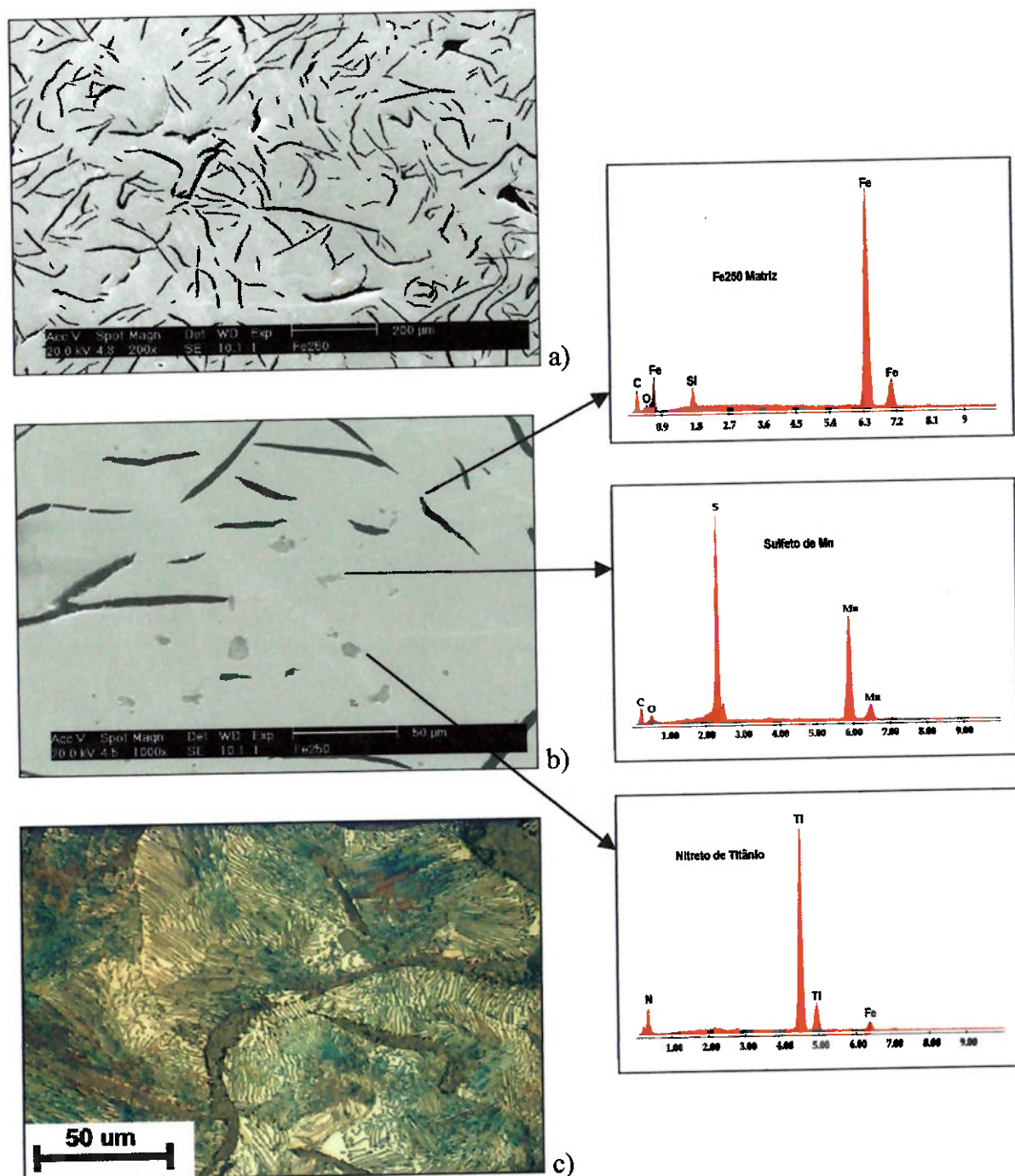


Figura 4.1 Ferro fundido cinzento Fe250. a) Morfologia e distribuição da grafita. b) Análises químicas da matriz metálica, sulfetos e nitretos. c) Microestrutura (perlita grossa e grafita) - Ataque Nital 2%.

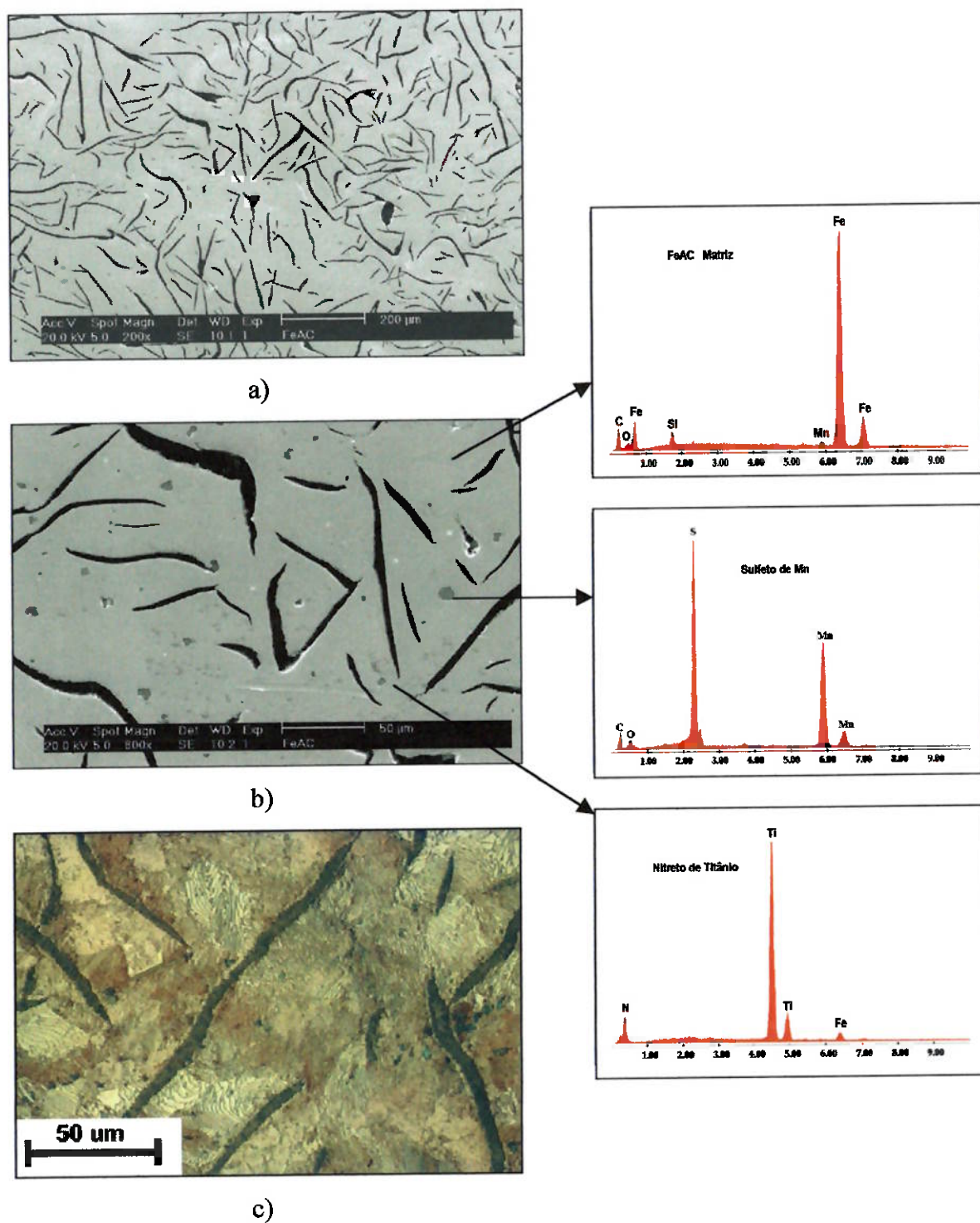


Figura 4.2 Ferro fundido cinzento FeAC. a) Morfologia e distribuição da grafita. b) Análises químicas da matriz metálica, sulfetos e nitretos. c) Microestrutura (perlita grossa e grafita) - Ataque Nital 2%.

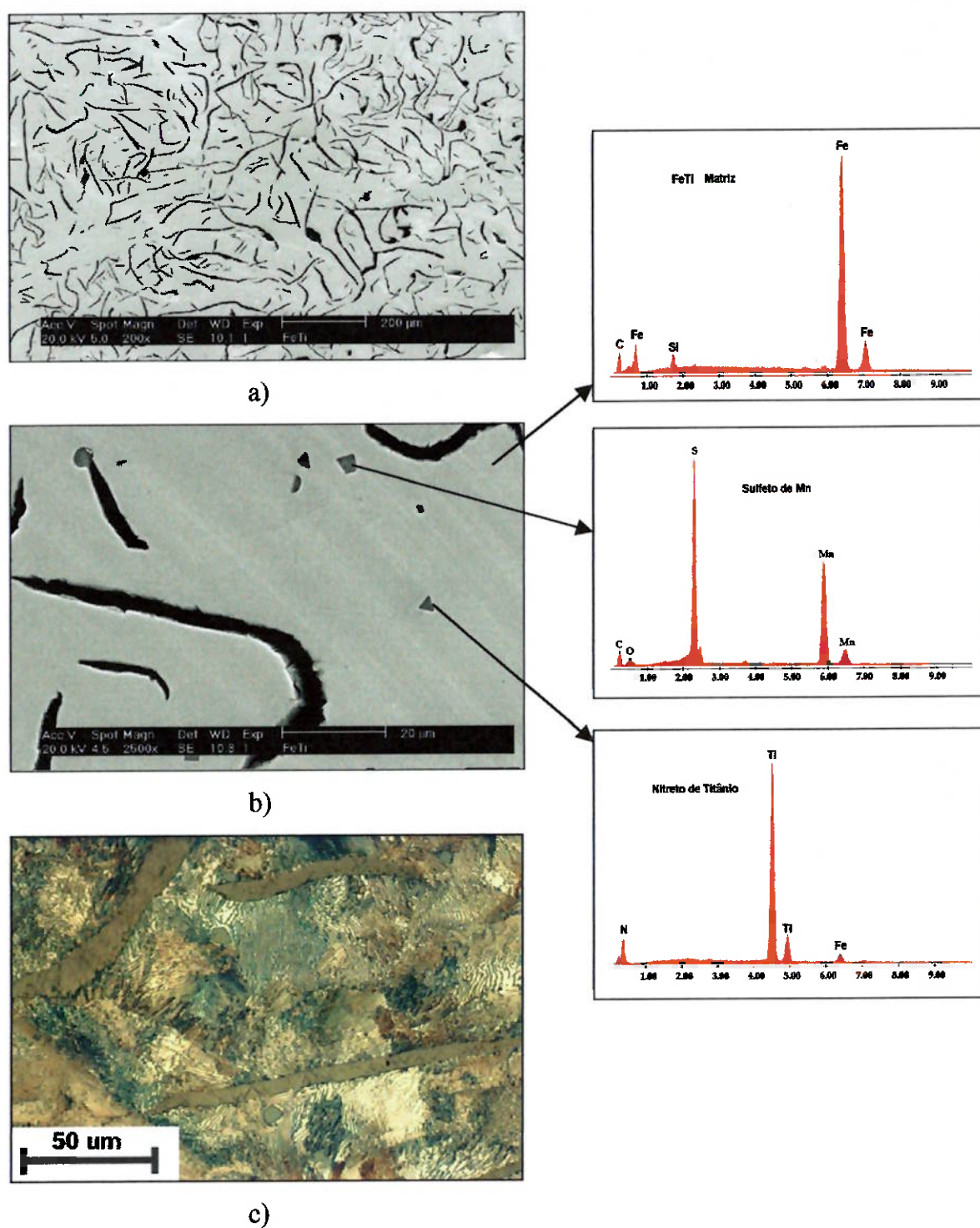
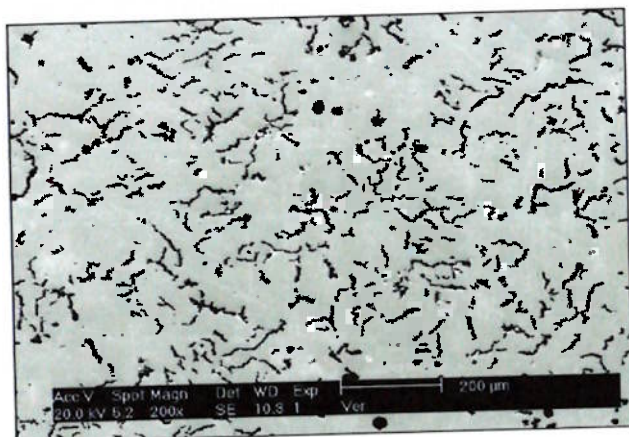
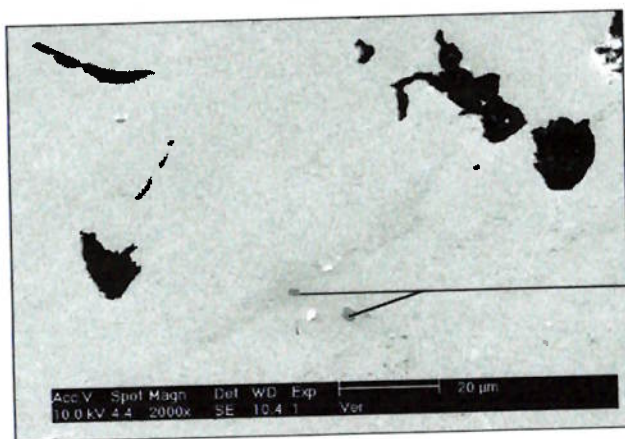


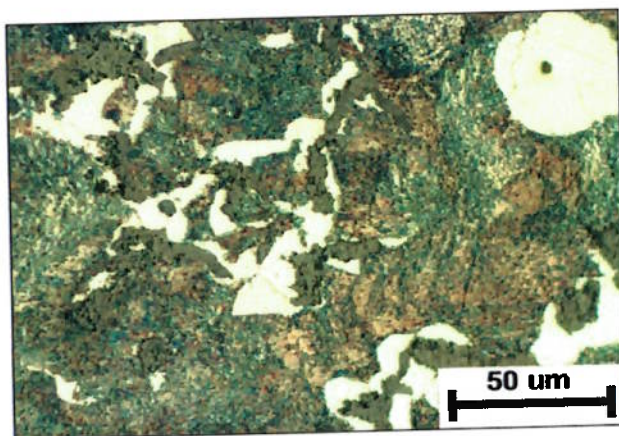
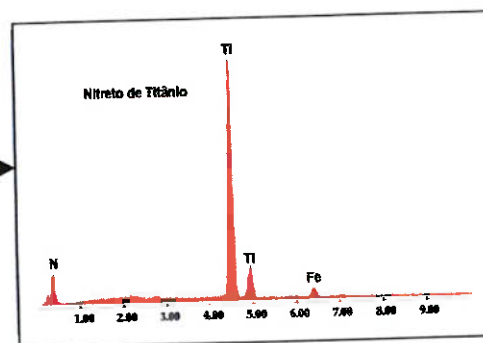
Figura 4.3 Ferro fundido cinzento FeTi. a) Morfologia e distribuição da grafita. b) Análises químicas da matriz metálica, sulfetos e nitretos. c) Microestrutura (perlita grossa e grafita) - Ataque Nital 2%.



a)



b)



c)

Figura 4.4 Ferro fundido vermicular. a) Morfologia e distribuição da grafita. b) Análises químicas de sulfetos e nitretos. c) Microestrutura (perlita fina e grafita) - Ataque Nital 2%.

As características morfológicas e as frações volumétricas de grafita e dos outros microconstituintes presentes nos ferros fundidos estudados são apresentadas na tabela 4-1

Tabela 4-1. Características microestruturais dos ferros fundidos estudados

	Fe250	FeAC	FeTi	Vermicular
% Grafita	12	12,5	10	12
(L/D) *	5	4,7	6,5	2,8
Tipo de grafita	IA3	IA3	IA3	90% IIIA5 e 10% VIA6
% Perlita	88	88	89	74
% Ferrita	< 1	< 1	< 1	14
% Nitretos e Sulfetos	< 2	< 2	< 2	< 2
Tamanho (μm)	5	5	5	3

* L/D: fator de forma da grafita

Nas microestruturas observadas não foi fácil diferenciar aquelas partículas que eram sulfetos daquelas que eram nitretos, pois o tamanho e a morfologia deles foi muito semelhante. Esta diferenciação foi possível de fazer somente através de análises químicas realizadas em cada uma das partículas selecionadas, que ao acaso foram eleitas para serem analisadas. Observou-se que tanto nitretos quanto sulfetos podem apresentar indistintamente formas arredondadas ou facetadas, como é mostrado na figura 4-5. Nessa figura são mostradas partículas de sulfeto de Mn encontradas no ferro fundido FeTi e de nitretos de titânio encontrados no ferro fundido Fe250.

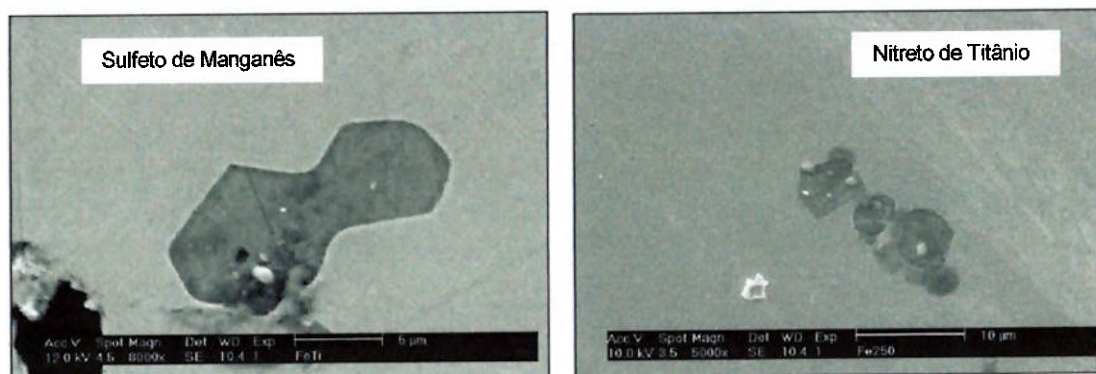


Figura 4.5 Morfologia dos sulfetos e nitretos encontrados nos ferros fundidos estudados. Partículas com faces arredondadas e/ou facetadas.

4.1.2. Propriedades mecânicas

Os valores das propriedades mecânicas dos ferros fundidos utilizados neste trabalho são apresentados na tabela 4-2. Esta tabela mostra que o limite de resistência e o alongamento do ferro fundido vermicular são mais de duas vezes maiores que os obtidos nos ferros fundidos cinzentos. Com relação aos resultados de energia de impacto, as diferenças são quase 4 vezes maiores. Entretanto, a dureza é apenas um pouco maior no vermicular do que nos cinzentos.

Estas diferenças, como citado durante a revisão bibliográfica, se devem basicamente à morfologia da grafita que, no caso dos ferros fundidos cinzentos é lamelar e está interconectada, o que provoca um enfraquecimento do material. Já nos ferros fundidos vermiculares, a grafita tem a forma de vermes e está parcialmente interconectada, apresentando melhores propriedades mecânicas.

Tabela 4-2 Propriedades mecânicas medidas nos ferros fundidos estudados

	Fe250	FeAC	FeTi	Vermicular
L. Resistência [MPa]	220 ± 10	185 ± 5	210 ± 5	460 ± 5
Alongamento [%]	1	0,85	0,85	2
Energia absorvida [J]	5 ± 0,5	4 ± 0,5	4 ± 0,5	16 ± 0,5
Dureza HV50 [kg/mm²]	200 ± 5	180 ± 5	195 ± 5	220 ± 5

4.1.3. Dilatometria

Testes de dilatometria foram usados como outro meio de caracterizar os ferros fundidos estudados. Com estes ensaios, foi possível determinar primeiramente, as temperaturas de austenitização, de formação de perlita e de início de transformação martensítica, e depois simular tratamentos térmicos no ferro fundido vermicular.

Determinação de temperaturas críticas

Várias taxas de resfriamento foram usadas visando detectar com precisão as temperaturas anteriormente citadas. Na figura 4-6 é mostrada uma curva típica de dilatometria feita para o ferro fundido cinzento Fe250. Esta curva foi construída com uma taxa de aquecimento de 40 °C/s (linha preta) e uma taxa de resfriamento de 10 °C/s (linha vermelha).

Alguns detalhes desta figura fornecem informações precisas do material, como por exemplo: durante o aquecimento, aproximadamente a 800 °C, a curva de dilatação apresenta uma inflexão devida à mudança microestrutural que sofre o material quando ele se austenitiza, sendo a temperatura neste ponto conhecida como temperatura de austenitização (A_{c1}).

Durante o resfriamento, é possível observar outras duas inflexões da curva de dilatação a aproximadamente 600 °C e 200 °C, sendo que estas inflexões correspondem às temperaturas de formação de perlita (T_p) e temperatura de início de transformação martensítica (M_s), respectivamente.

Portanto, as inflexões nas curvas de dilatometria são pontos críticos onde o aumento ou a diminuição da temperatura provoca mudanças microestruturais no material.

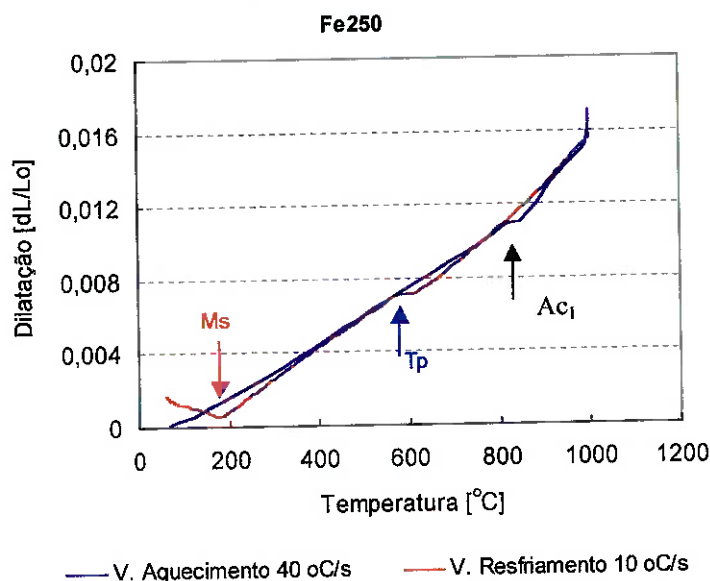


Figura 4-6. Ferro fundido Fe250. Curvas de dilatométrica mostrando as temperaturas de austenitização (Ac_1), formação de perlita (T_p) e martensita (Ms).

Vários ensaios foram realizados para determinar com precisão as temperaturas nas quais os ferros fundidos estudados sofrem mudanças microestruturais. No caso da temperatura de austenitização, foi mantida constante a velocidade de aquecimento em 40 °C/s, enquanto que, para determinar a temperatura T_p e Ms , foram usadas diferentes velocidades de resfriamento. Um exemplo disto é mostrado nas figuras 4-7 (a, b e c) onde são apresentadas as curvas de dilatação utilizadas na determinação das temperaturas Ac_1 , T_p e Ms do ferro fundido cinzento Fe250.

Ensaio de dilatométrica semelhantes àqueles realizados nos ferros fundidos cinzentos Fe250 foram feitos nos outros ferros fundidos estudados, e os resultados obtidos são apresentados na tabela 4-3.

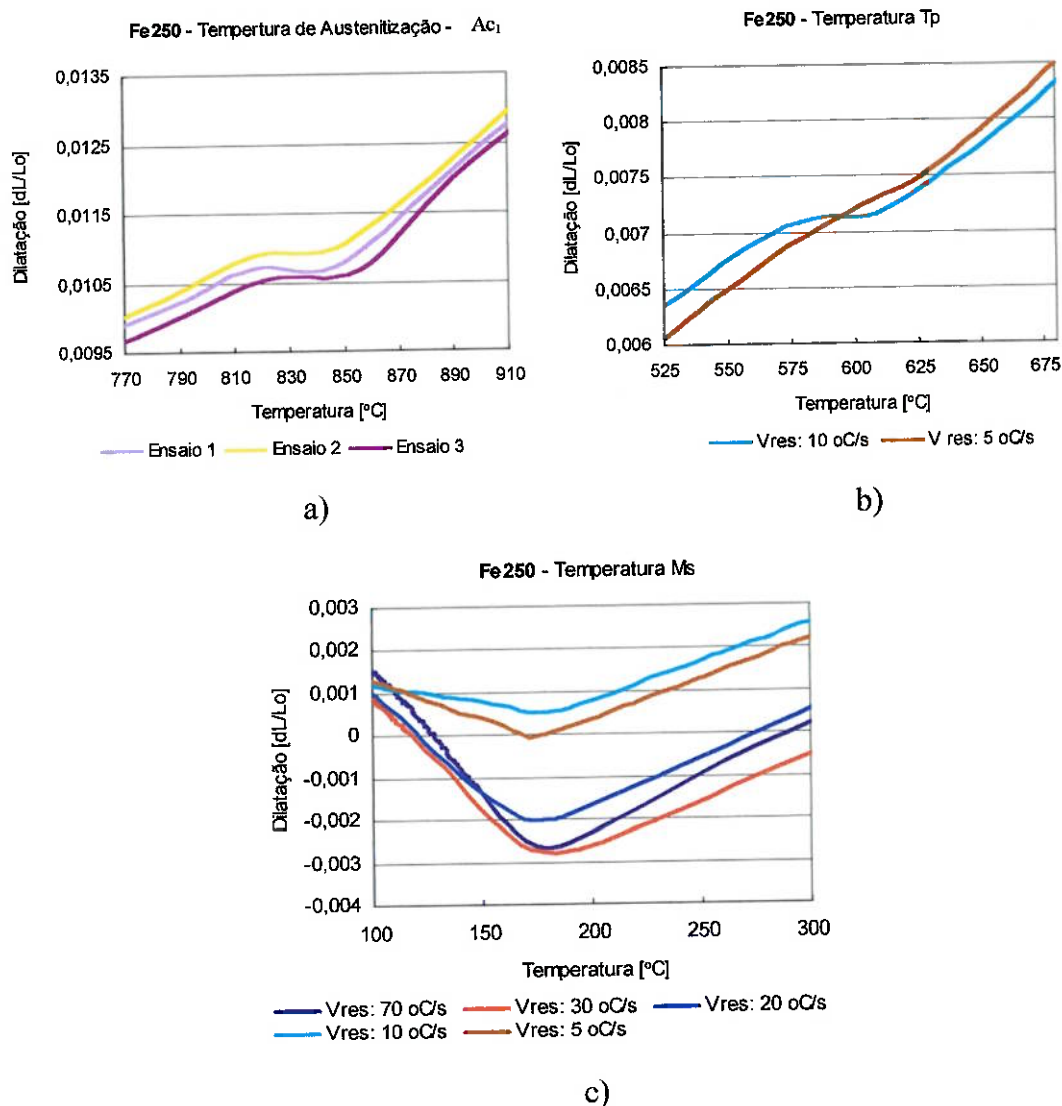


Figura 4-7. Curvas de dilatométrica do ferro fundido cinzento Fe250. Determinação das temperaturas de: a) austenitização – Ac_1 , b) formação de perlita - T_p e c) transformação martensítica - M_s .

Tabela 4-3. Temperaturas de transformação obtidas por dilatométrica.

	Fe250	FeAC	FeTi	Vermicular
Ac_1 [°C]	800 ± 10	825 ± 10	815 ± 10	810 ± 10
T_p [°C]	675 ± 10	665 ± 10	685 ± 15	705 ± 10
M_s [°C]	175 ± 10	155 ± 15	170 ± 10	170 ± 10

Dependendo da velocidade de resfriamento utilizada, o material, pode ou não apresentar transformação martensítica. Um exemplo disto foi observado no ensaio de dilatométrica feito no ferro fundido vermicular ensaiado a uma velocidade de resfriamento de $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ e cuja curva dilatométrica é mostrada na figura 4-8. Verificou-se que depois de acontecer a inflexão correspondente à formação de perlita, a curva de resfriamento não apresenta a inflexão típica que definiria a formação de martensita, esperando-se portanto, que o material não contenha martensita em sua microestrutura final à temperatura ambiente.

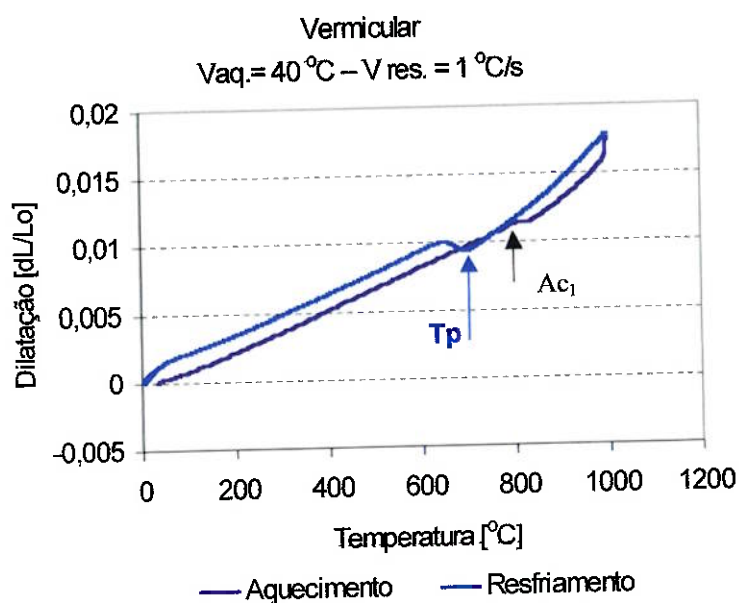


Figura 4-8. Curvas de dilatométrica do ferro fundido vermicular mostrando somente as inflexões correspondentes à austenitização durante o aquecimento e a formação de perlita durante o resfriamento.

Para verificar se os resultados obtidos por dilatométrica eram confiáveis, foram feitas análises metalográficas dos corpos-de-prova ensaiados, que são mostrados na figura 4-9. Estas análises comprovaram que as microestruturas decorrentes dos ciclos de aquecimento e resfriamento correspondiam àquilo que era esperado da dilatométrica, ou seja, a microestrutura era constituída somente por ferrita e perlita.

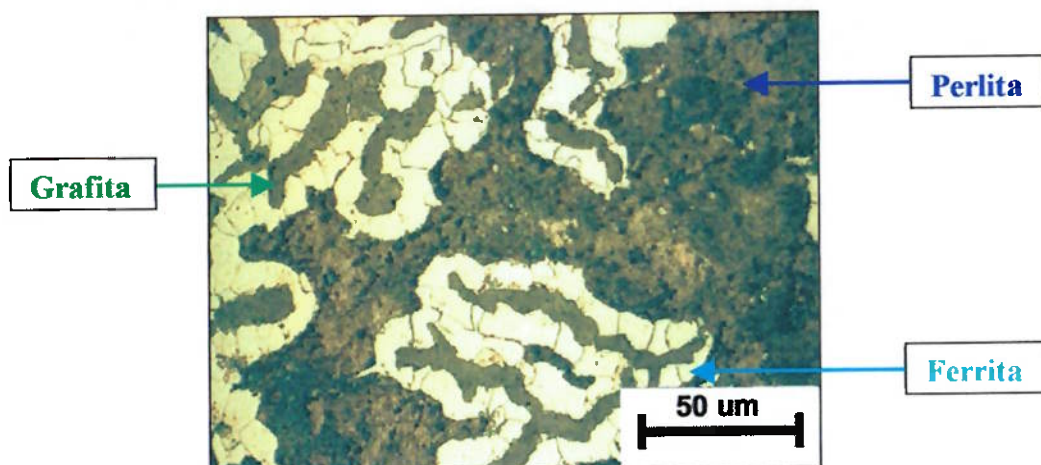


Figura 4-9. Microestrutura do ferro fundido vermicular resultante do ciclo de dilatométrica, aquecimento: 40 °C/s e resfriamento: 1 °C/s.

Outro exemplo da confiabilidade dos resultados obtidos por dilatométrica é mostrado nas figuras 4-10 e 4-11. A figura 4-10 corresponde a um ciclo de resfriamento de 5 °C/s do ferro fundido vermicular, cuja curva dilatométrica mostrou inflexões que previam a formação de perlita e martensita. A micrografia da figura 4-11 verifica a presença destas microestruturas.

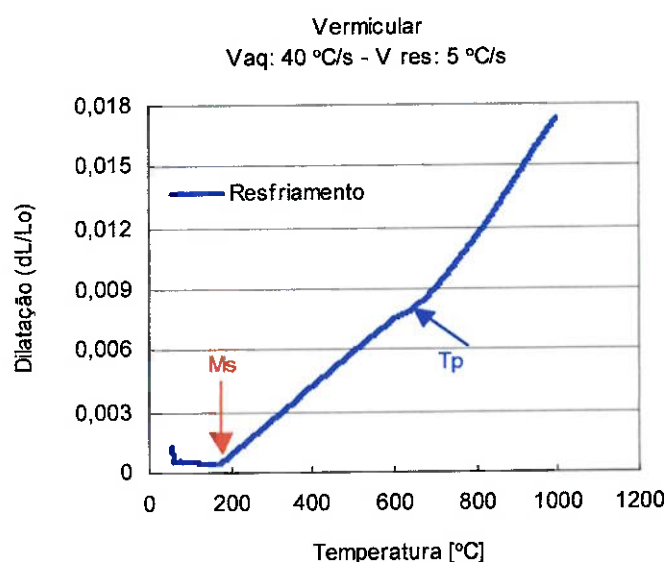


Figura 4-10. Curva de dilatométrica do ferro fundido vermicular mostrando as inflexões da formação de perlita e de martensita durante o resfriamento.

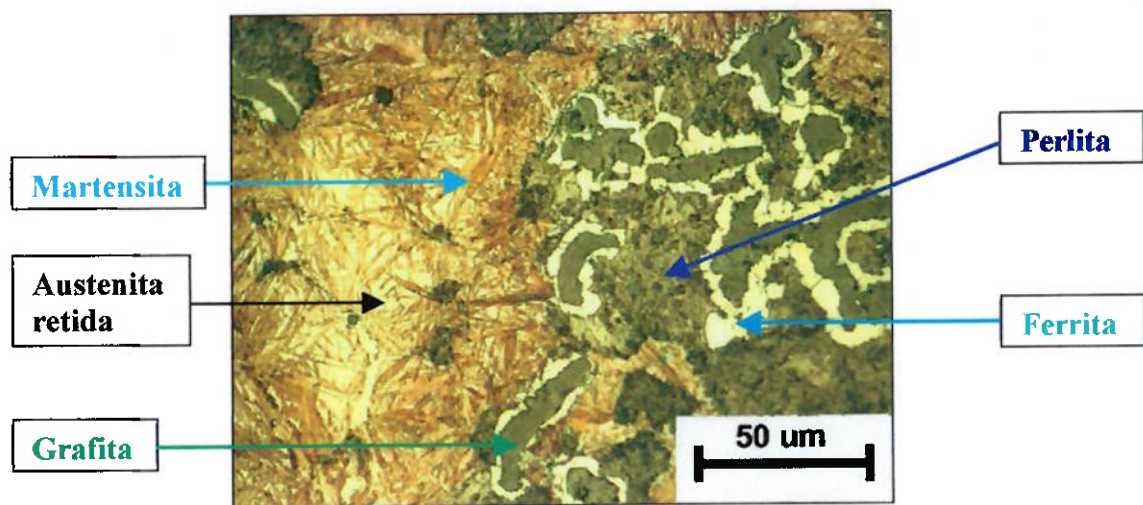


Figura 4-11. Microestrutura do ferro fundido vermicular resultante do ciclo de dilatométrica, aquecimento: 40 °C/s e resfriamento: 5 °C/s.

4.2. Caracterização da pastilha de freio

4.2.1. Fluorescência de raios X

A composição química básica do material da pastilha de freio foi revelada através de análises qualitativas e semiquantitativas de fluorescência de raios X.

A análise qualitativa mostrou que a pastilha era constituída, preponderantemente de ferro, bário, alumínio e silício; pequenas proporções de enxofre, cálcio, manganês, magnésio e cobre; e traços de zinco, fósforo, estrôncio, potássio, níquel e chumbo.

A análise semiquantitativa revelou que a pastilha continha principalmente Fe_2O_3 - 41,6%, CaO - 13,3%, SO_3 - 12,5%, BaO - 11,4%, SiO_2 - 6,8% e Al_2O_3 - 6,33%; e pequenas proporções de MgO , Na_2O , P_2O_5 , Cl , K_2O , MnO , NiO , CuO , ZnO , SrO , PbO .

Segundo Cullity (1978), esta técnica de análises é usada para identificar os elementos químicos de uma ampla variedade materiais, detectando aproximadamente 90% dos elementos químicos citados na tabela periódica e que

estejam presentes em concentrações maiores que 10 ppm. Entretanto, ela tem suas limitações, pois fornece somente informações dos elementos químicos presentes nas amostras, sem considerar seu estado de combinação química ou as fases nas quais eles existem. Além disso, não consegue identificar elementos leves, tais como os primeiros onze elementos químicos da tabela periódica.

4.2.2. Difração de raios X

A difração de raios X é uma técnica de análise complementar a fluorescência de raios X, pois uma vez identificados os elementos químicos na pastilha de freio, com esta técnica foi possível determinar os vários componentes e fases presentes.

A figura 4-12 mostra o difratograma obtido da pastilha de freio. As análises dos picos mostraram que a pastilha era constituída basicamente de grafita, barita (sulfeto de bário) e óxido de silício. Além disso, como parte do ruído do difratograma, foram identificados também, picos de óxidos de ferro, de manganês e de alumínio, sendo que estes compostos não foram colocados no difratograma para não poluir visualmente a figura e porque as quantidades detectadas foram muito pequenas.

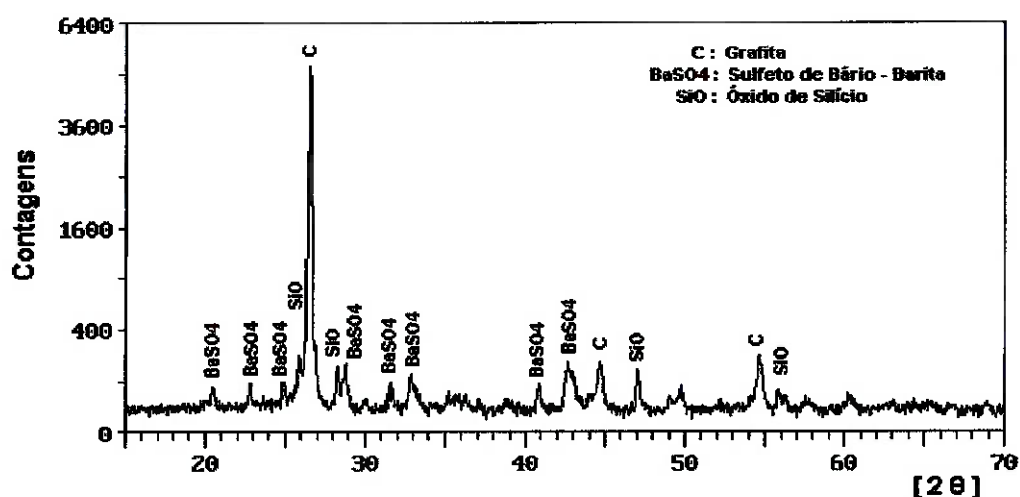


Figura 4-12. Difratograma da pastilha de freio. Radiação: $\text{Cu } \alpha$

4.2.3. Metalografia

Microscopia Óptica: Observações metalográficas utilizando microscopia óptica, mostraram que a pastilha de freio era constituída de regiões claras e de partículas brilhantes, como mostrado na figura 4-13. Análises posteriores revelaram que as regiões claras eram grafita e que as partículas brilhantes eram, em sua grande maioria, fibras de ferro e algumas partículas de latão.

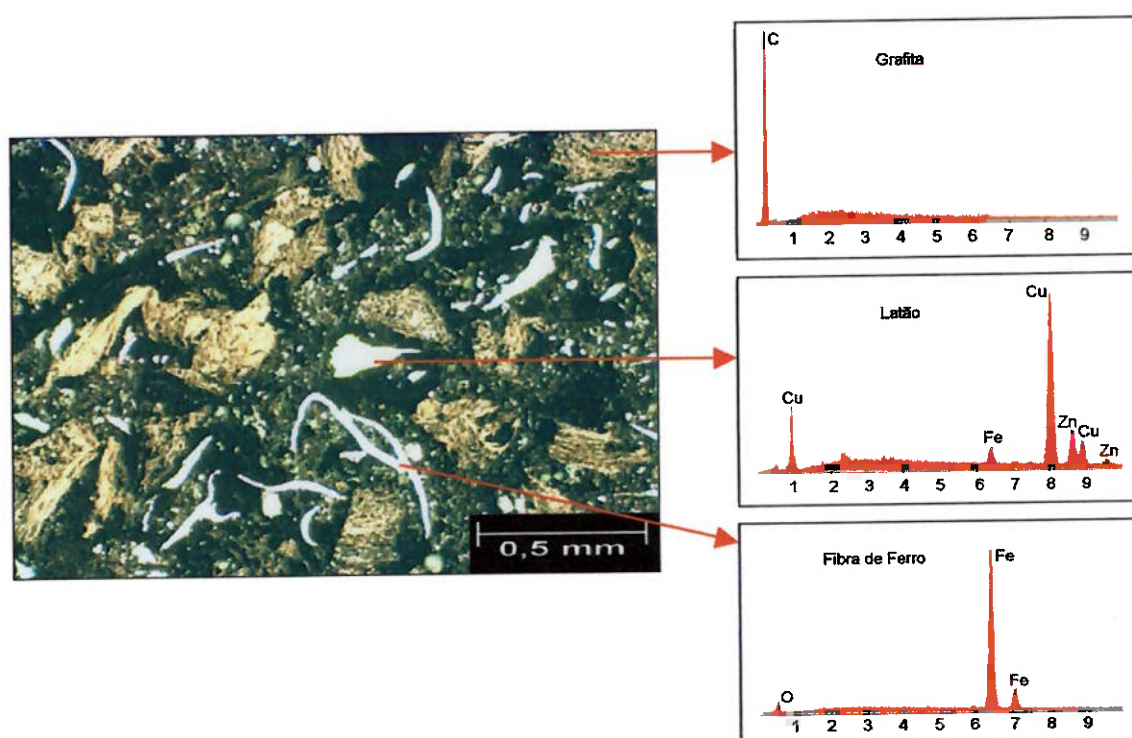


Figura 4-13. As regiões claras são grafita, e as brilhantes são fibras de ferro e partículas de latão. As análises EDS indicam a composição química destes componentes. Microscopia óptica

As fibras de ferro, que aparecem nesta figura têm uma tonalidade esbranquiçada, estão homoganeamente distribuídas em toda matriz e possuem um tamanho médio que não excede 1 mm de comprimento. Já as partículas de latão, que na fotografia aparecem com uma tonalidade amarelada, são mais grossas e menos compridas que as fibras de ferro, e sua distribuição na matriz da pastilha é bem heterogênea. As regiões mais escuras que aparecem na fotografia são

formadas por componentes de menor tamanho que estão presentes na pastilha de freio como materiais de enchimento, aglomerantes e modificadores de atrito.

Junto à fotografia da superfície da pastilha de freio, obtida por microscopia óptica, são mostrados difratogramas obtidos usando espectrometria de energia dispersiva (EDS – energy disperse spectrometry) que verificam a composição química dos componentes observados.

Medidas das frações volumétricas dos componentes da pastilha de freio, observados por microscopia óptica, são mostradas na tabela 4-4. Nota-se que as fibras de ferro, que garantem resistência mecânica à pastilha de freio, estão presentes em aproximadamente 15% do volume total, enquanto que mais de 25% do volume, é formada por grafita. Segundo Eriksson 2000 VIII, a grafita é utilizada em pastilhas de freio como lubrificante sólido e serve para estabilizar o coeficiente de atrito, principalmente em altas temperaturas. Este autor relata também, que as partículas de Latão, de maneira análoga, atuam como modificadores do atrito. Portanto, pode-se concluir que entre 30 e 40 % do volume total da pastilha de freio usada neste trabalho, é constituída por elementos modificadores do atrito, e que somado com as fibras de ferro, representam aproximadamente 50% do volume total da pastilha.

Tabela 4-4. Componentes da pastilha de freio identificados por microscopia óptica

Componente	% volume
Grafita	25 ± 10
Fibra de ferro	12 ± 6
Latão	5 ± 2

Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV: Observações realizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e detecção de elétrons retro-espalhados (BSE – back scattering spectrometry), permitiram identificar de maneira mais clara os constituintes observados por microscopia óptica.

Na figura 4-14 é mostrada uma fotografia da superfície da pastilha de freio, obtida usando-se esta técnica. Pode-se observar que a grafita se apresenta como regiões escuras, enquanto que as fibras de ferro continuam aparecendo como lamelas brancas. As partículas de latão, também brancas, se diferenciam facilmente das fibras de ferro devido a sua morfologia arredondada e a sua distribuição aleatória na matriz. As regiões cinza claras, neste caso, são formadas por substâncias não metálicas.

Análises por EDS, realizados na superfície da amostra, comprovaram a presença de todos os elementos químicos determinados anteriormente pelas outras técnicas de análise (fluorescência e difração de raios X).

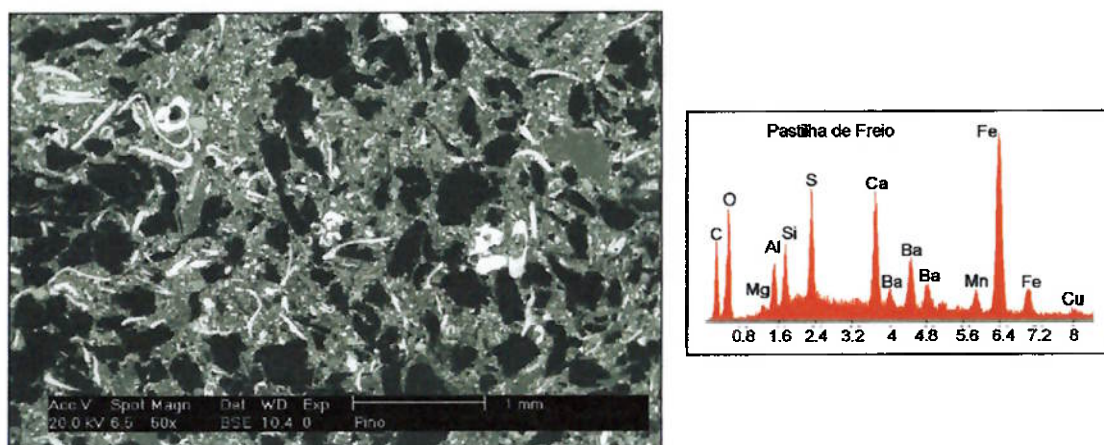


Figura 4-14. Pastilha de freio (MEV – BSE) com o espectro de difração de raios x ao lado. As regiões escuras são grafita, as brancas são as fibras de ferro e as partículas de latão. As regiões cinzas são partículas não metálicas de menor tamanho.

Na figura 4-15 é mostrada uma foto ampliada da superfície da pastilha de freio obtida por MEV utilizando-se elétrons secundários (SE). Através de análise química (via EDS) verificou-se que a composição química da grafita e das fibras de ferro.

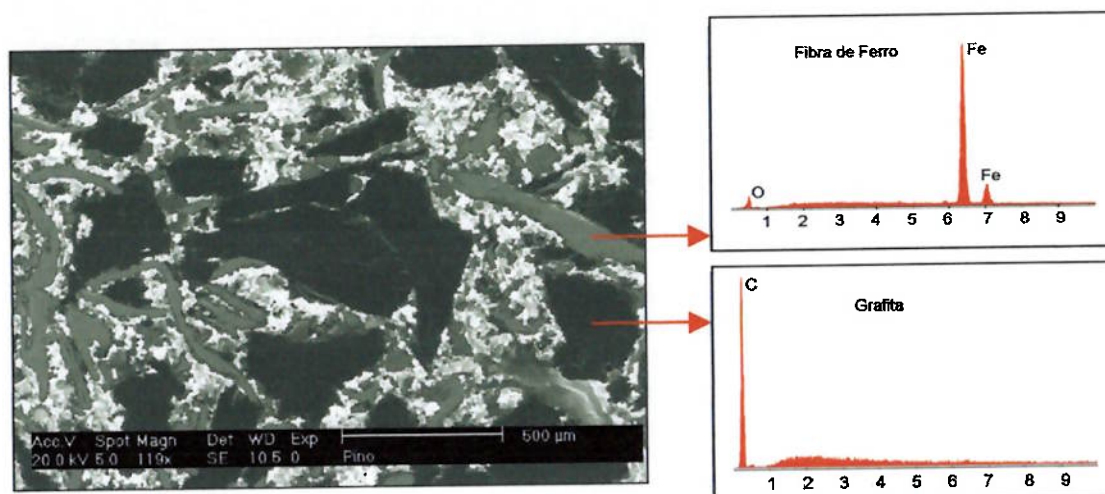


Figura 4-15. As regiões escuras são grafita, as cinzas escuras são as fibras de ferro e as regiões claras são as partículas de menor tamanho.

Na figura 4-16 mostra-se uma foto ampliada de uma região da pastilha de freio onde podem ser vistos os componentes de menor tamanho que se encontram finamente dispersos em toda a matriz. Verificou-se que estes componentes eram formados principalmente por: silicato de cálcio, sulfetos de bário, de ferro e de manganês, e óxidos de alumínio, de ferro e de silício, entre outros. O tamanho destes componentes é significativamente menor quando comparado com uma fibra de ferro: a fibra de ferro tem aproximadamente 500 μm de comprimento e estes componentes têm 20 μm .

Cada um destes materiais tem seu papel específico na conformação da pastilha de freio. Alguns deles são utilizados como estabilizadores do atrito (sulfetos metálicos), outros como partículas abrasivas (sílica e alumina) que servem para limpar as superfícies dos discos de freio, e outros como material de enchimento (sulfeto de bário).

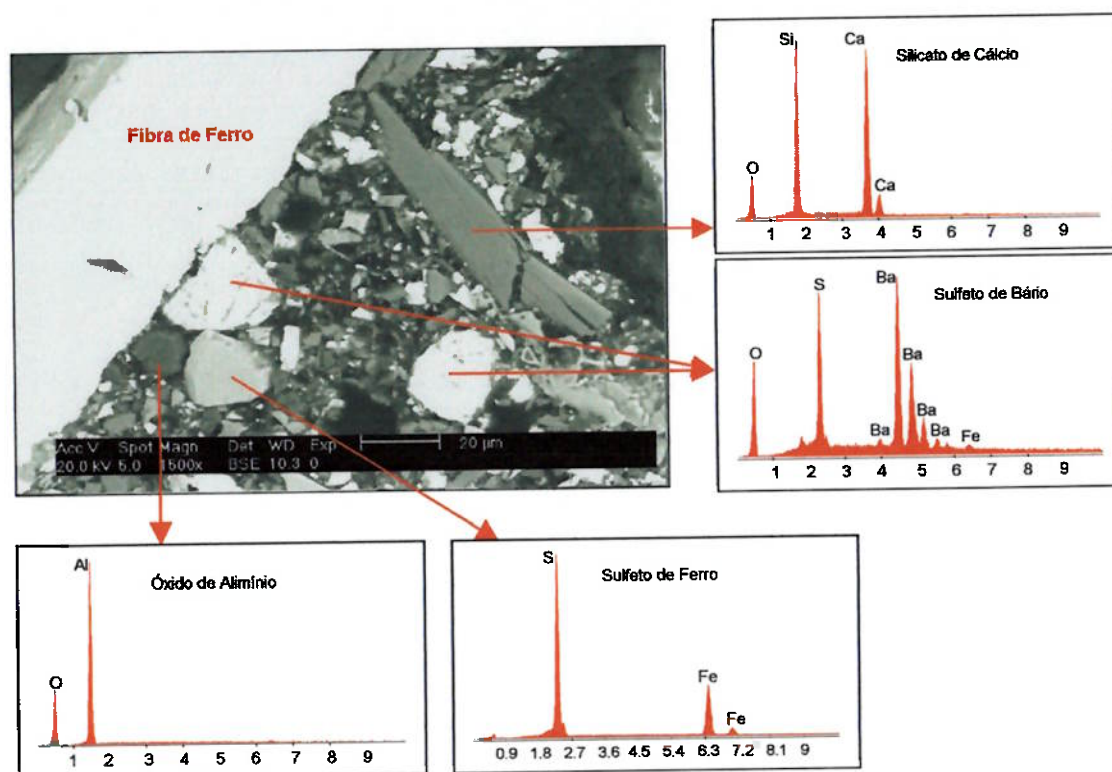


Figura 4-16. Partículas menores que constituem a matriz da pastilha de freio, com suas respectivas análises químicas. MEV – BSE

4.2.4. Propriedades mecânicas

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados na pastilha de freio são mostrados na tabela 4-5, onde se observa que, em geral, a pastilha de freio é um material pouco resistente.

Com o intuito de fazer uma comparação entre as propriedades de resistência a compressão da pastilha de freio com a dos ferros fundidos cinzentos aqui estudados, é preciso considerar que, como citado por Souza (1982), a resistência a compressão de materiais frágeis como o ferros fundidos, pode ser até 8 vezes maior que a resistência a tração. Portanto, segundo os resultados expostos na tabela 4.4, a resistência a compressão dos ferros fundidos estudados seria de aproximadamente 1600 MPa, significando que a pastilha de freio é mais de 20 vezes menos resistente que qualquer ferro fundido utilizado neste trabalho.

Quando se compara os resultados de dureza, nota-se que a pastilha de freio pode ser mais de 8 vezes menos dura que os ferros fundidos.

Entretanto, considerando que as máximas pressões de frenagens alcançadas nos veículos são de aproximadamente 4 MPa, pode se esperar que seu desempenho não seja prejudicado pelas baixas propriedades mecânicas apresentadas.

Tabela 4-5. Propriedades mecânicas da pastilha de freio.

	Pastilha de freio
L. R. Compressão [MPa]	70 ± 5
Dureza HV50 [kg/mm^2]	25 ± 5

4.3. Tratamentos térmicos dos ferros fundidos vermiculares

4.3.1 Metalografia

No ferro fundido vermicular foram realizados tratamentos térmicos, visando modificar a microestrutura da matriz metálica. Os tratamentos térmicos realizados foram: ferritização e têmpera. As microestruturas obtidas após estes tratamentos são muito diferentes entre si, como são mostradas na figura 4-17.

Ferritização: Nas amostras ferritizadas foram observadas a presença majoritária de ferrita (fundo branco da fotografia) e algumas ilhas de perlita esferoidizada (regiões escuras) espalhadas aleatoriamente pela superfície.

Têmpera: Nas amostras temperadas, as agulhas de martensita estão espalhadas sobre toda a superfície, porém, observa-se também que entre as agulhas de martensita existem regiões mais claras identificadas como austenita retida. Através de difração de raios X foram medidas as frações volumétricas destes microconstituintes, cujos resultados são apresentados na tabela 4-6.

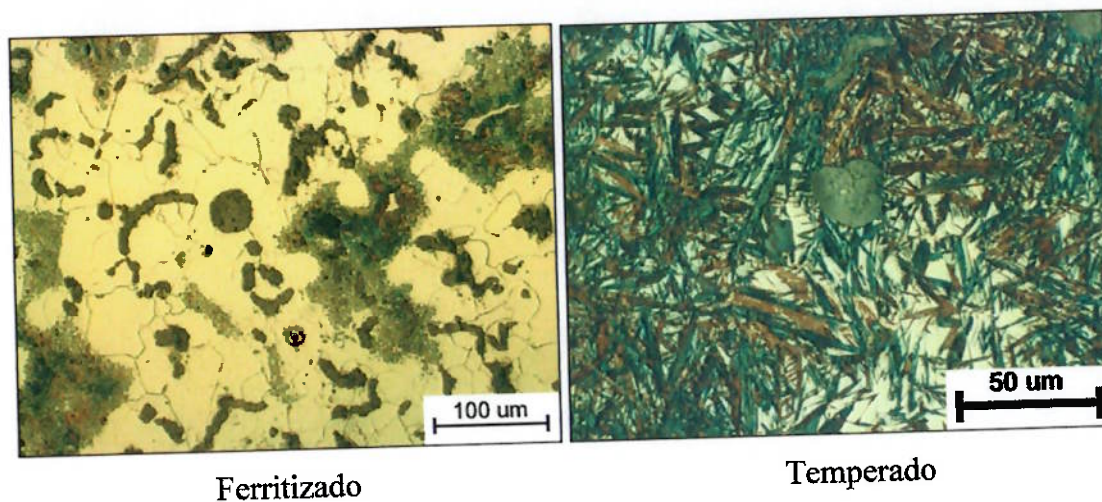


Figura 4-17. Microestruturas obtidas no ferro fundido vermicular depois dos tratamentos térmicos.

4.3.2. Difração de raios X

As frações de austenita retida após os tratamentos térmicos de têmpera foram calculadas usando difração de raios X, sendo os resultados mostrados na tabela 4-6. Não foi considerada a fração volumétrica da grafita, portanto, a soma dos teores das frações volumétricas dos microconstituintes apresentados é 100 %.

Tabela 4-6. Frações volumétricas dos microconstituintes obtidas no ferro fundido vermicular após os tratamentos térmicos.

	Ferrita	Perlita	Martensita	Austenita Retida
Ferritização	80	20	-	-
Têmpera	-	-	76	24

O difratograma obtido da amostra temperada em óleo é mostrado na figura 4-18. Esta figura mostra claramente a presença dos picos A(220), F(211) e A(311), utilizados para calcular a fração de austenita retida.

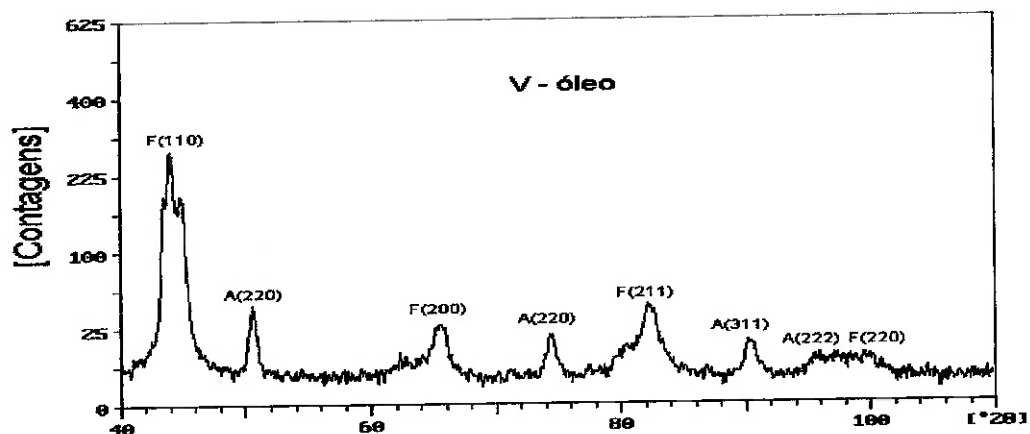


Figura 4-18. Difratograma da amostra temperadas em óleo.

4.3.3. Propriedades mecânicas

Na tabela 4-7 são mostradas as propriedades mecânicas obtidas no ferro fundido vermicular depois dos tratamentos térmicos realizados.

Tabela 4-7. Propriedades do ferro fundido vermicular tratado termicamente.

	Bruto de fundição	Ferritização	Tempera
L. R. [MPa]	460 ± 5	320 ± 5	240 ± 5
Alongamento [%]	2	2	< 1
E. Absorvida [J]	$16 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	$2 \pm 0,15$
Dureza HV50	220 ± 5	150 ± 5	395 ± 10

4.4. ENSAIOS DE DESGASTE - PINO SOBRE DISCO

4.4.1. Carga cíclica aplicada: 600 N (Pressão: 4 MPa)

4.4.1.1. Perda de massa

O desgaste acumulado nos discos, no decorrer dos ensaios, foi determinado através das medidas de perda de massa, cujos valores médios e desvios padrão são apresentados na tabela 4-8, e na figura 4-19.

Tabela 4-8. Perda de massa acumulada dos discos. Carga: 600N.

Tempo de ensaio [h]	Disco - Perda de massa [g] – 600 N			
	3.5	7	14	21
Fe250	0,11	0,19 ± 0,02	0,46 ± 0,03	0,73 ± 0,01
FeAC	0,06	0,12 ± 0,02	0,30 ± 0,01	0,47 ± 0,01
FeTi	0,07	0,13 ± 0,01	0,28 ± 0,04	0,45 ± 0,09
Vermic	0,10	0,20 ± 0,04	0,43 ± 0,07	0,65 ± 0,10

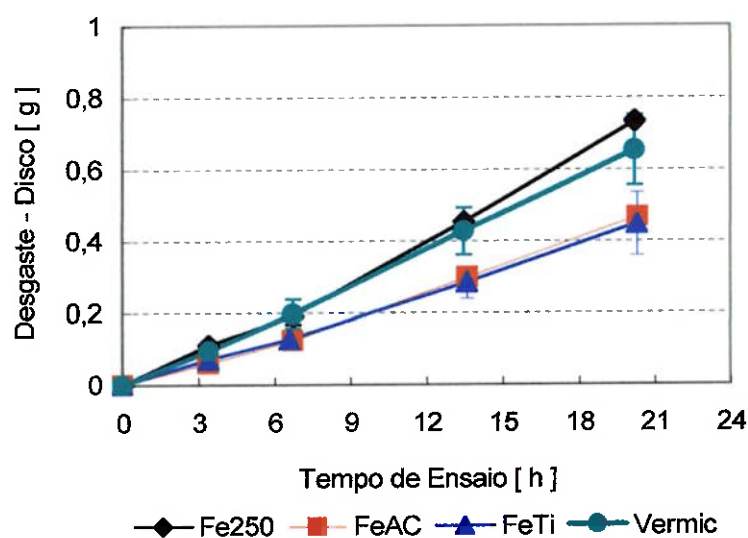


Figura 4-19. Desgaste medido nos discos. Carga: 600N.

Na tabela 4-8 e na figura 4-19, foram incluídos também, valores de perda de massa correspondentes a 3,5 h de ensaio. Estes valores ajudaram a entender melhor o comportamento do desgaste, nos ferros fundidos estudados, pois eles mostram que as diferenças de desgaste observadas a partir da sétima hora de ensaio, já vinham acontecendo desde as primeiras horas.

A figura 4-19 mostra também, que independentemente do material ensaiado, o desgaste aumentou quase linearmente com o aumento do tempo de ensaio, especialmente a partir das primeiras 7 horas, indicando que a perda de massa entre cada intervalo de medida é praticamente igual, com valores de 0,26, 0,17, 0,16 e 0,22 g, para os Fe250, FeAC, FeTi e vermicular respectivamente.

A perda de massa no período até 7 horas de ensaio, quando o contacto entre as superfícies ainda tem a influência do “running-in”, a perda de massa é menor, obtendo-se valores de 0,19, 0,12, 0,13 e 0,20 g, nos ferros fundidos estudados; este fato justifica a menor inclinação da curva de desgaste, no começo.

Os resultados finais obtidos depois das 21 horas de ensaio mostraram que, a maior resistência ao desgaste foi alcançada pelos ferros fundidos FeTi e FeAC, seguido do vermicular e do Fe250.

A figura 4-19 mostra também dois níveis de desgaste bem definidos: o primeiro, que corresponde àqueles ferros fundidos que menos se desgastaram, constituído pelos ferros fundidos cinzentos contendo maiores teores de C (FeAC) e Ti (FeTi) e o segundo nível, onde aparecem os ferros fundidos que mais se desgastaram, formado pelos Fe250 e os vermiculares.

Entretanto, considerando o desvio padrão dos resultados, nota-se que não há diferenças muito evidentes entre o desgaste dos ferros fundidos cinzentos e do vermicular. O desvio padrão dos resultados está dentro dos valores aceitáveis, pois segundo Guicciardi (2002), em ensaios de desgaste tipo pino sobre disco, a dispersão dos resultados pode ser de 25 a 55%. Isto leva a pensar que nestas condições de ensaio, a perda de massa independe do material utilizado e que a perda de massa média geral, depois de 21 horas de ensaio, foi de aproximadamente 0,6 g.

Os resultados de desgaste obtidos contrariam as expectativas criadas com relação ao ferro fundido vermicular, pois devido ao fato de que este material possui os maiores valores de dureza e resistência mecânica, era de se esperar que fosse ele, o que alcançasse a maior resistência ao desgaste, porém, isto não ocorreu.

Os valores de desgaste medidos contrariam também, outros apresentados na literatura que, como no caso de Dunks (1981) que analisando o comportamento em desgaste de discos de freio de trens, de ferro fundido vermicular e cinzento, observou que nos discos de ferro fundido vermicular o desgaste era apenas perceptível enquanto que nos discos de ferro fundido cinzento, o desgaste foi de 1 a 2 mm.

Da mesma forma, Zhang (1993) estudando a influência da morfologia da grafita na resistência ao desgaste de pastilhas de freio de ferro fundido, ligadas com fósforo, notou que os ferro fundidos vermiculares são mais resistentes a desgaste que os cinzentos, independentemente da carga de frenagem aplicada ou da velocidade de rotação do disco. Entretanto, comparando os valores de resistência ao desgaste dos ferros fundidos quando o fator de forma da grafita (L/D) varia entre 6,5 (cinzentos) e 2,8 (vermicular), valores semelhantes aos medidos nos ferros fundidos estudados nesta Tese, Zhang verificou que, o desgaste dos ferros fundidos cinzentos é igual ao dos ferros fundidos vermiculares.

Por outro lado, a presença de 14% de ferrita na microestrutura do ferro fundido vermicular, deve influenciar negativamente a resistência ao desgaste deste material.

Segundo Zum Gahr (1987) a ferrita provoca uma diminuição da resistência ao desgaste nos ferros fundidos cinzentos e nodulares, pois trata-se de uma fase relativamente mole, pouco resistente ao desgaste adesivo e que pode facilmente ser deformada plasticamente repetidas vezes, provocando a aparecimento de trincas e remoção *debris*, por mecanismos de fadiga.

Apesar de que os ferro fundidos cinzentos, em geral, apresentam menor resistência à fadiga que o vermicular, esta propriedade não é tão prejudicial na

resistência ao desgaste quanto ter ferrita na matriz. A ferrita presente nos ferros fundidos vermiculares seria rapidamente arrancada, da superfície dos discos, devido às altas forças de atrito atuantes, as elevadas temperaturas alcançadas e a lenta dissipação de calor.

No caso do FeTi, que possui um teor de grafita um pouco menor que os outros ferros fundidos estudados (10% contra 12% dos outros ferros), e que apresentou uma resistência ao desgaste mais elevada, pensa-se que a remoção de material é atenuada por alguma outra característica do material e não somente pela ação lubrificante da grafita.

Segundo Chapman e Mannion (1982) e Pye (1992), os ferros fundidos cinzentos ligados com titânio apresentam carbonetos e carbonitretos de titânio na sua microestrutura, que melhoram suas propriedades de resistência ao desgaste. Estes autores confirmam que teores de Ti maiores que 0,025%, formam mais de 60 partículas duras por mm^2 promovendo baixos valores de atrito e de desgaste. E já que o FeTi utilizado no presente trabalho teve um teor de Ti de 0,028%, isto explicaria o baixo desgaste observado neste material, pois durante o processo de frenagem, os carbonetos e carbonitretos de Ti, protegeriam a superfície dos discos evitando a excessiva remoção de material.

Para os Fe250 e os FeAC, a ação lubrificante da grafita que, segundo Sugishita e Fujiyoshi (1981) protege as superfícies do desgaste, seria a explicação para que os discos de FeAC, que contêm mais grafita que os discos de Fe250, apresentem menor perda de massa, sob a mesmas condições de atrito e temperatura.

Na tabela 4-9 e na figura 4-20, são mostrados os valores de perda de massa acumulados pelos pinos, em função do tempo de ensaio e do tipo de ferro fundido.

Tabela 4-9. Perda de massa acumulada dos pinos – Carga: 600 N.

Pino - Perda de massa [g] – 600 N				
Tempo de ensaio [h]	3.5	7	14	21
Fe250	0,13	0,18 ± 0,02	0,40 ± 0,04	0,63 ± 0,03
FeAC	0,07	0,15 ± 0,03	0,33 ± 0,03	0,53 ± 0,05
FeTi	0,08	0,19 ± 0,01	0,43 ± 0,03	0,63 ± 0,02
Vermic	0,12	0,23 ± 0,05	0,48 ± 0,10	0,70 ± 0,15

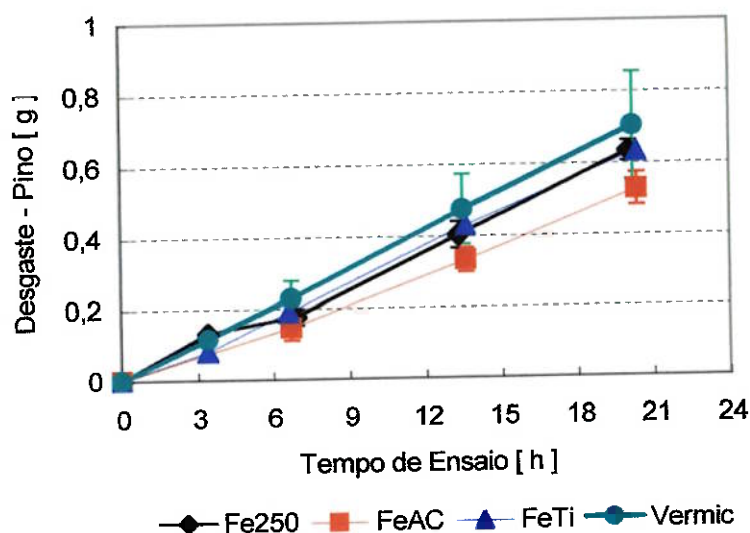


Figura 4-20. Desgaste medido nos pinos. Carga: 600 N

Os resultados apresentados na tabela 4-9 e figura 4-20 mostram também, que o desgaste acumulado dos pinos aumenta quase linearmente com o aumento do tempo de ensaio. Semelhantemente ao observado no desgaste dos discos, os pinos também tiveram uma taxa de desgaste um pouco menor no início do ensaio (até a sétima hora), que faz com que a inclinação da curva de perda de massa seja menor no início e depois se mantenha constante até o final do ensaio.

Contrariamente ao observado na figura 4-19, onde o desgaste dos discos, aparentemente, depende do material utilizado, na figura 4-20 observa-se que o desgaste dos pinos é praticamente igual para todos os casos, alcançando um valor

médio de aproximadamente 0,6 g, independentemente do tipo de ferro fundido usado como disco. Evidência que se reforça ainda mais considerando o desvio padrão dos resultados.

As pequenas diferenças de desgaste observadas na figura 4-20, têm sua origem nas primeiras 7 horas de ensaio quando acontece a acomodação das superfícies de contacto, já que depois desse período de ensaio, as perdas de massa medidas foram de aproximadamente 0,22 g em todos os casos.

Comparando os valores médios de perda de massa dos discos e dos pinos, depreende-se que para esta condição de ensaio, o desgaste de ambas as partes são praticamente iguais, independentemente do tipo de ferro fundido utilizado.

Embora os resultados de desgaste fossem muito parecidos entre todos os ferros fundidos estudados, o mesmo não ocorreu em relação a outros parâmetros relacionados com o ensaio, como por exemplo, a temperatura, a força de atrito e coeficiente de atrito.

4.4.1.2. Temperatura, Força de atrito e Coeficiente de atrito.

Durante os ensaios de desgaste pino sobre disco, utilizando-se uma carga cíclica 600 N, foram determinados para os quatro tipos de ferros fundidos estudados (Fe250, FeAC, FeTi e Vermicular), os valores de temperatura, medida através termopares inseridos nos pinos; de força de atrito, medido por meio de uma célula de carga acoplada à máquina ensaios de desgaste; e do coeficiente de atrito, calculado pelo software que controla a máquina de ensaios.

Os resultados coletados correspondem aos valores médios máximos alcançados pela temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, durante os ciclos de carregamento. De cada ciclo foi pego o valor máximo, que corresponde ao valor alcançado no instante final antes que se produza o descarregamento, como é mostrado na figura 4-21.

Esta figura mostra isoladamente dois ciclos de carregamento e descarregamento do ensaio realizado no ferro fundido Fe250. Observa-se que

durante o primeiro minuto de ensaio, quando a carga aplicada se mantém constante em 600 N, a temperatura vai aumentando progressivamente até alcançar seu valor máximo de 208 °C. Depois disso, quando a carga aplicada é retirada, observa-se também, uma diminuição paulatina da temperatura, a mesma que continua diminuindo até o final do quarto minuto de ensaio, momento no qual recomeça o carregamento e inicia-se um novo ciclo.

No caso da força de atrito e do coeficiente de atrito, observa-se um aumento quase instantâneo dos seus valores até alcançar os máximos de 320 N e 0,54, respectivamente. Logo depois que a carga é retirada, ocorre a queda instantânea chegando a zero e mantendo-se nesse nível até o recomeço de um novo ciclo de carga.

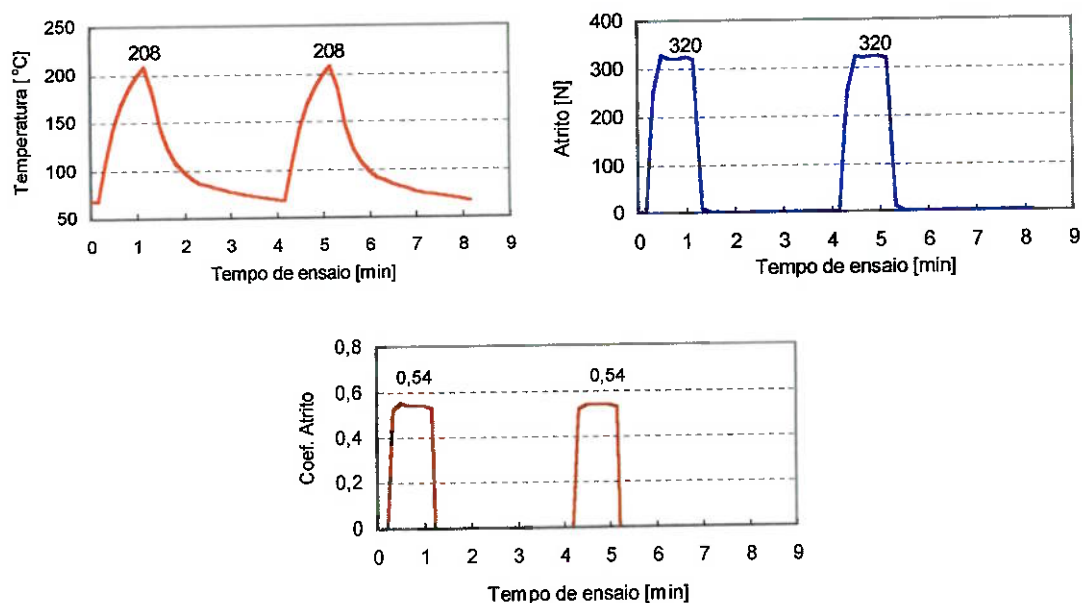


Figura 4-21. Ciclos de carregamento mostrando os máximos valores alcançados pela temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito no ferro fundido cinzento Fe250.

Nas figuras 4-22 a 4-24 são apresentados trechos de curvas de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, obtidas no decorrer dos ensaios de desgaste, em função do ferro fundido utilizado, correspondentes a um intervalo

de medição de 7 horas. Cada ponto destas curvas corresponde ao valor máximo alcançado ao final de cada ciclo.

Na figura 4-22 observa-se que, em todos os casos, a temperatura aumenta rapidamente no começo dos ensaios até um certo momento a partir do qual se estabiliza até o final dos ensaios.

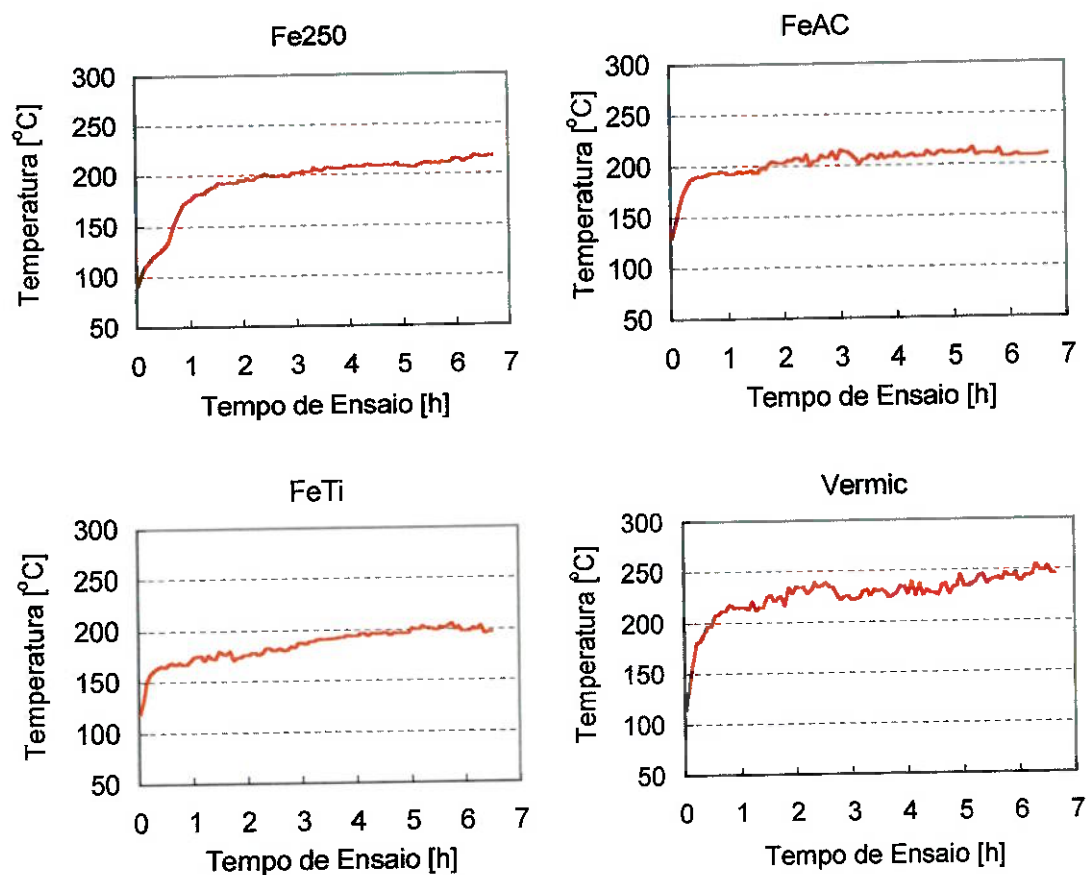


Figura 4-22. Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N

Estas diferenças de comportamento se devem principalmente ao fato de que, no começo, as superfícies estão frias e polidas, e até alcançar um estado estacionário de funcionamento (rugosidade, inércia térmica, taxa de desgaste, etc), estes valores aumentam rapidamente. Depois disso, a temperatura praticamente se estabiliza e o pequeno aumento observado, se deve a que o pino,

no decorrer dos ensaios, vai se desgastando e com isso, o termopar que mede a temperatura vai ficando cada vez mais perto das superfícies de desgaste, diminuindo desta maneira o gradiente de temperatura dentro do pino. O que significaria, em teoria, que cada vez que os pinos se desgastam, mais próximo estaria o termopar de medir o valor da “temperatura no contacto” (Obviamente, por este método não seria possível de medi-lo).

Os resultados de temperatura considerados como representativos dos ensaios realizados, foram aqueles obtidos no trecho final de cada ensaio, por considerar que o termopar estaria mais próximo da superfície de desgaste e que os valores medidos seriam mais próximos da temperatura real.

A figura 4-22 mostra também que, as curvas de temperatura nos ferros fundidos cinzentos foram muito parecidas entre si, com uma tendência a se estabilizar em valores próximos a 200 °C, enquanto que no caso do ferro fundido vermicular, a curva de temperatura alcança valores mais elevados, ficando próximos a 250 °C. Os resultados de temperatura obtidos destes ensaios são apresentados para cada ferro fundido estudado na tabela 4-10.

Na figura 4-23, são mostradas as curvas correspondentes às forças de atrito medidas nos diferentes ferros fundidos estudados. Como observado nas curvas de temperatura, neste caso nota-se também, um rápido aumento dos valores de força de atrito no começo dos ensaios, devido às características iniciais dos sistemas. Entretanto, depois que os sistemas entram em regime estacionário, as forças de atrito, se estabilizam e se mantêm invariáveis até o final dos ensaios. O tempo necessário para que as superfícies entrem no estado estacionário de desgaste, tempo que corresponderia ao running-in, foi de aproximadamente 1 h.

Nesta figura observam-se também, pequenas diferenças nos valores de força de atrito entre os diferentes materiais. Embora todas as curvas tendam a ficar próximas a 350 N, nota-se que as forças de atrito medidas são maiores seguindo esta seqüência: Fe250, FeAC, FeTi e Vermicular. Os resultados de força de atrito obtidos destes ensaios são apresentados na tabela 4-10.

Os altos valores de força de atrito observados, no ferro fundido vermicular, podem estar relacionados com a presença da ferrita neste material.

Segundo Hutchings (1992) que cita a teoria de atrito de Bowden e Tabor [1950], sabe-se que, a força de atrito se deve a dois fenômenos: a força de adesão, desenvolvida nas áreas de contacto real entre as superfícies (junção de asperezas), considerando que a área real de contacto aumenta significativamente quando se aumenta a carga normal aplicada; e a força de deformação, necessária para que as asperezas da superfície mais dura sulquem a superfície menos dura.

Portanto, sabendo-se que a ferrita possui baixa resistência a adesão, é de se esperar que grandes áreas de ferrita devam formar sítios de junção de asperezas com a superfície da pastilha de freio, favorecidas ainda pela alta carga de frenagem aplica. Desta maneira, as forças de cisalhamento necessárias para quebrar estas junções e continuar com o deslizamento das duas superfícies deveriam ser maiores, o que provocaria um aumento da força de atrito.

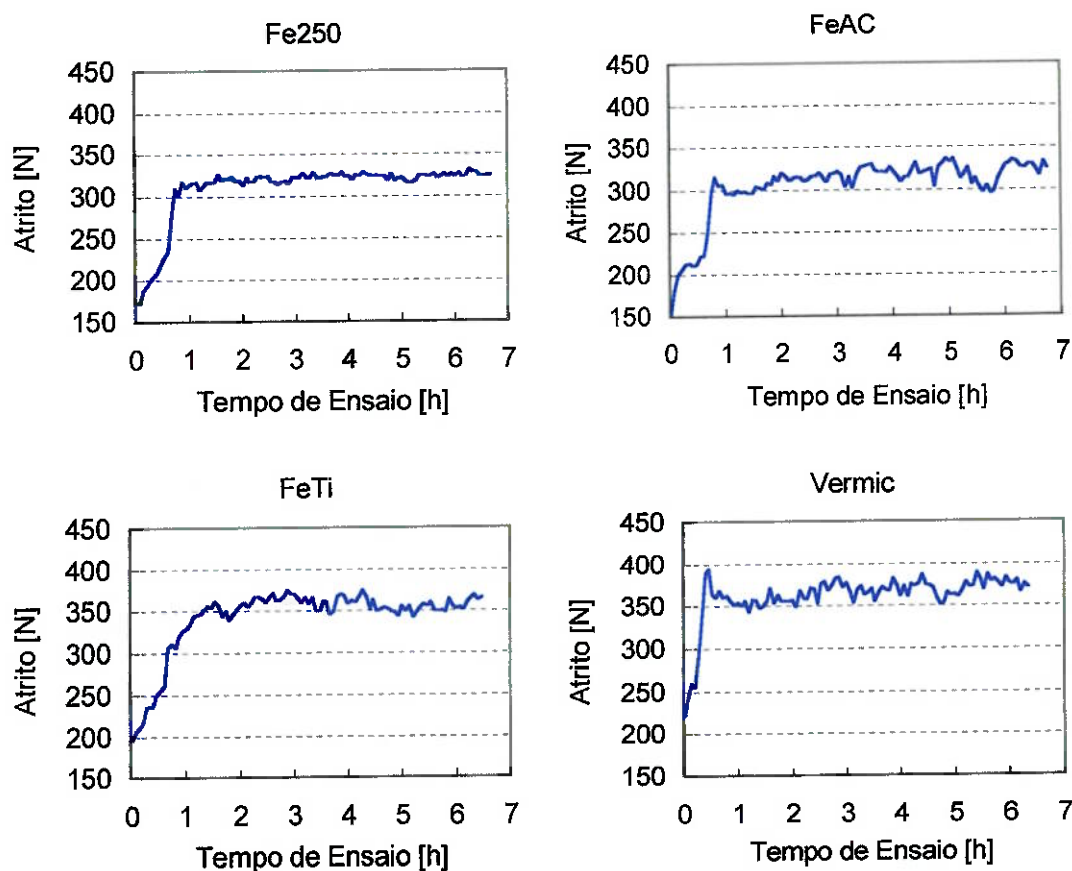


Figura 4-23. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N

Um dos fenômenos comumente observados nos sistemas de frenagem é o “fading” que é a perda da capacidade de frenagem devido à diminuição da força de atrito. Este fenômeno é devido ao aumento da temperatura do sistema. No decorrer destes ensaios verificou-se que, independentemente do tipo de ferro fundido usado, a força de atrito se manteve constante com o tempo, sem evidências de diminuição ou queda devido ao aumento da temperatura. Portanto, pode se dizer que, sob estas condições de ensaio não ocorre “fading” em nenhum dos ferros fundidos estudados.

Na figura 4-24, são mostradas as curvas correspondentes aos coeficientes de atrito calculados no decorrer dos ensaios.

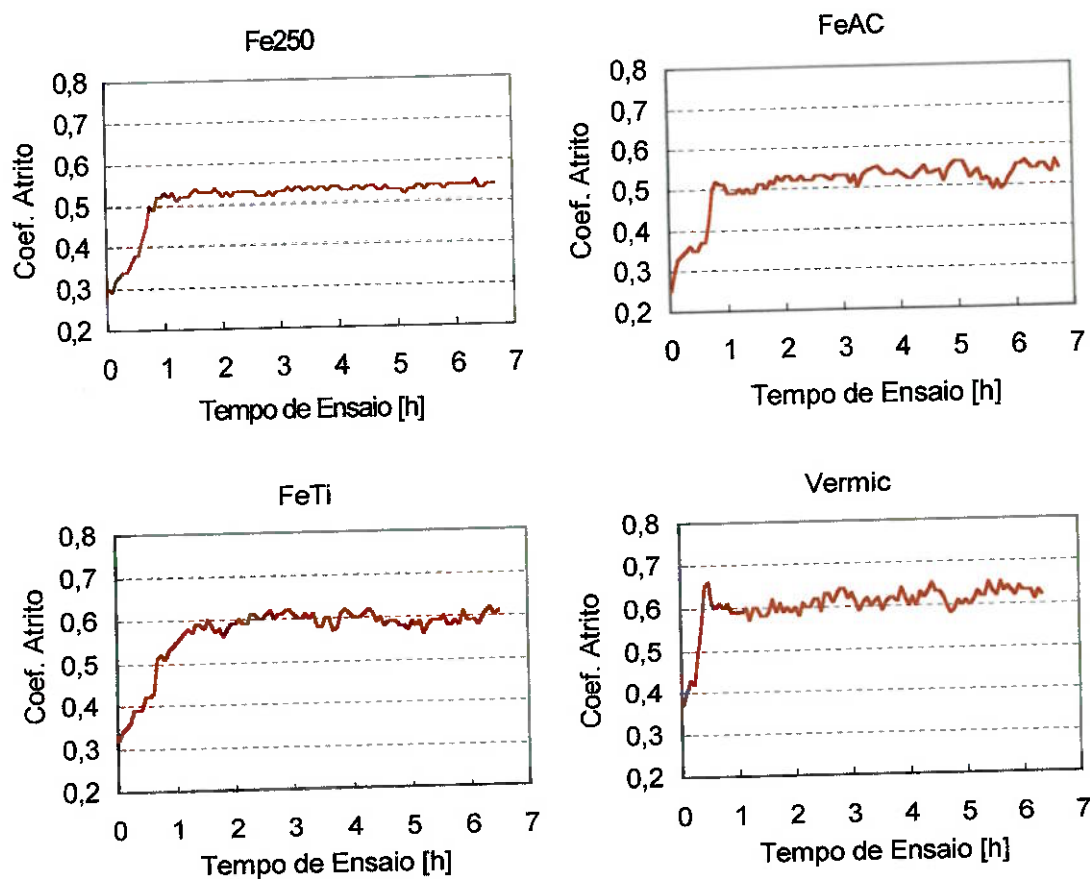


Figura 4-24. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N

Como o coeficiente de atrito foi calculado a partir da força de atrito medida, é compreensível que estas curvas tenham um formato semelhante ao apresentado pelas curvas de força de atrito. Assim, os valores de coeficientes de atrito aumentam rapidamente no começo dos ensaios e depois se estabilizam até o final dos mesmos. Nota-se também, que todas as curvas se estabilizam em valores entre 0,5 e 0,6, na seqüência: Fe250, FeAC, FeTi e Vermicular.

Tabela 4-10. Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito obtidos durante os ensaios de desgaste pino sobre disco.

Material	Temperatura [°C]	Força de Atrito [N]	Coeficiente de Atrito
Fe250	200 ± 10	315 ± 10	0,52 ± 0,02
FeAC	210 ± 10	325 ± 10	0,54 ± 0,02
FeTi	210 ± 10	340 ± 10	0,57 ± 0,02
Vermic	240 ± 10	360 ± 10	0,62 ± 0,02

A tabela 4-10 mostra que as temperaturas alcançadas pelos ferros fundidos cinzentos foram praticamente iguais entre si, independentemente do ferro fundido cinzento utilizado, situando-se em aproximadamente 210 °C. Entretanto, no caso do ferro fundido vermicular, a temperatura foi em média 15% maior, ultrapassando, em alguns casos 250 °C.

A força de atrito e o coeficiente de atrito aumentaram na seqüência: Fe250, FeAC, FeTi e Vermicular.

Considerando o desvio padrão dos resultados, nota-se que a força de atrito nos ferros fundidos cinzentos é praticamente igual para todos eles, e as pequenas variações medidas, estão relacionadas com as temperaturas. Observou-se uma tendência de aumento da temperatura de trabalho com o aumento da força de atrito. No caso do Fe250 foram observados os menores valores de força e coeficiente de atrito. E o ferro fundido vermicular foi o que apresentou os maiores valores de força atrito, coeficiente de atrito e de temperatura.

Estes resultados sugerem que, a utilização do ferro fundido vermicular como disco de freio, demandaria cargas de frenagem menores para se obter forças de frenagem semelhantes àsquelas obtidas com discos de freio de ferro fundido cinzento. Caso esta hipótese se comprove, durante a frenagem com cargas menores, poderia se atingir também, temperaturas menores. Esta hipótese foi estudada e seus resultados serão apresentados no item 4.2.1.4.

4.4.1.3. Análises das superfícies desgastadas.

Rugosidade:

Discos: Foram realizadas medidas de rugosidade nas superfícies dos discos em regiões aleatoriamente escolhidas, antes da realização dos ensaios de desgaste. Após o ensaio, foi medida a rugosidade em cima da trilha de desgaste no sentido transversal a ela. Estas medidas foram realizadas após cada 7 horas de ensaio, durante as paradas feitas para medir a perda de massa nos discos. Foram escolhidos somente os parâmetros de rugosidade Ra e Sm, por considerar que eles forneceriam suficiente informação a respeito das superfícies ensaiadas. Na figura 4-25 são mostrados os valores médios dos parâmetros de rugosidade medidos.

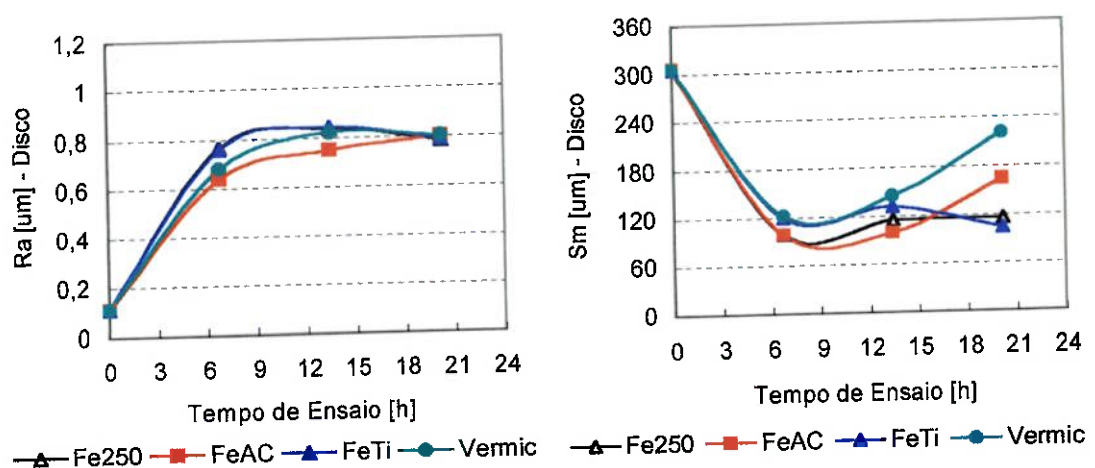


Figura 4-25. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos discos em função do tempo de ensaio. Carga: 600 N

O valor de Ra no começo do ensaio é muito baixo, devido ao polimento prévio até 1 μm dos discos. Entretanto, depois das primeiras 7 horas de ensaio, Ra, em todas as amostras, atinge um valor próximo a 0,8 μm e tende a se estabilizar neste valor.

Na figura 4-25 verifica-se também, que Sm sofre uma variação muito acentuada no decorrer dos ensaios, pois no início, quando as superfícies dos discos estavam polidas, Sm é aproximadamente 300 μm , porém, até o final das primeiras 7 horas de ensaio, ele cai rapidamente alcançando um valor próximo a 120 μm . No caso dos ferros fundidos cinzentos, este valor de 120 μm se mantém praticamente invariável até o final dos ensaios, enquanto que no ferro fundido vermicular, Sm experimenta um pequeno aumento, indicando que as superfícies dos discos deste material tendem a ficar mais lisas com o decorrer dos ensaios.

Pinos: Houve grande dificuldade para registrar valores de rugosidade que representassem com precisão o aspecto das superfícies desgastadas, pois as pastilhas de freio eram fabricadas a partir da aglomeração de vários componentes, resultando um volume heterogêneo e muito poroso quando comparado com o material dos discos. As heterogeneidades introduzem variáveis nas medidas de rugosidade com desvios padrão muito elevados.

Para evitar um pouco estas dificuldades, foram realizadas medidas de rugosidade somente em regiões onde as superfícies aparentemente eram homogêneas, ou seja, sem a presença evidente de poros ou defeitos significativos. Caso isso não fosse feito as medidas resultavam maiores que o fundo de escala do equipamento utilizado. Desta maneira, foram determinados os valores de Ra e Sm nos pinos, e cujos resultados são mostrados na figura 4-26.

Nesta figura observa-se que, independentemente do ferro fundido utilizado, depois das primeiras 7 horas de ensaio, os valores de Ra aumentaram significativamente de: 1,5 μm , quando as superfícies estavam lixadas (lixa 400) até atingir um valor próximo a 3,5 μm . A partir deste ponto, Ra praticamente se estabiliza e permanece invariável até o final dos ensaios.

No caso de S_m , ele também experimentou um aumento, começando com $75 \mu\text{m}$ no estado lixado e alcançando aproximadamente $130 \mu\text{m}$, ao final dos ensaios.

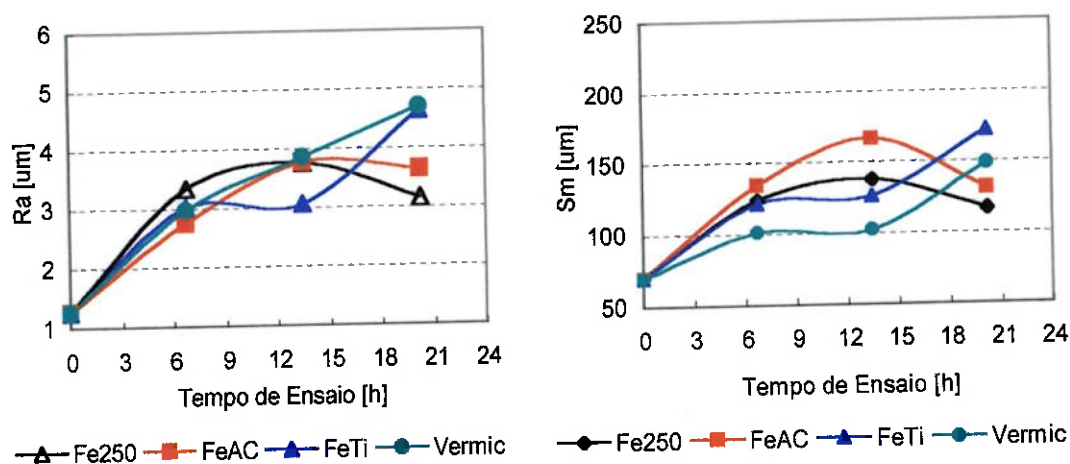


Figura 4-26. Valores médios de rugosidade R_a e S_m das superfícies dos pinos em função do tempo de ensaio. Carga: 600 N

Analisando os resultados de rugosidade apresentados nas figuras 4-25 e 4-26, nota-se que os valores médios de S_m tanto para os discos quanto para os pinos são muito semelhantes. Estes resultados indicam que apesar de os materiais dos discos serem totalmente diferentes dos pinos, tanto no aspecto estrutural quanto no aspecto superficial, quando postos em contato um contra o outro, acabam se ajustando chegando a adotar os mesmos níveis de rugosidade.

Esta evidência é explicável devido à diferença de dureza dos dois materiais: o pino de menor dureza, se desgasta de tal forma que, acomoda sua superfície de contacto à superfície de contacto dos discos, acompanhando as irregularidades destes durante os ensaios de desgaste.

Cabe ressaltar que, essas irregularidades foram criadas justamente, pela ação abrasiva de alguns elementos mais duros que fazem parte do material do pino, os quais durante o carregamento, arranham as superfícies dos discos, deixando marcas típicas de desgaste abrasivo. As marcas resultam também, da ação abrasiva dos “debris” que antes de serem removidos do sistema, atuam como

partículas abrasivas sulcando ambas as superfícies de desgaste. Em outras regiões, parte dessas irregularidades foi provocado pela deformação plástica, ocorrida nas superfícies de desgaste, tanto dos discos quanto dos pinos.

Microscopia óptica:

Na figura 4-27 são apresentadas fotografias que, mostram o aspecto das superfícies desgastadas dos discos, após a realização dos ensaios.

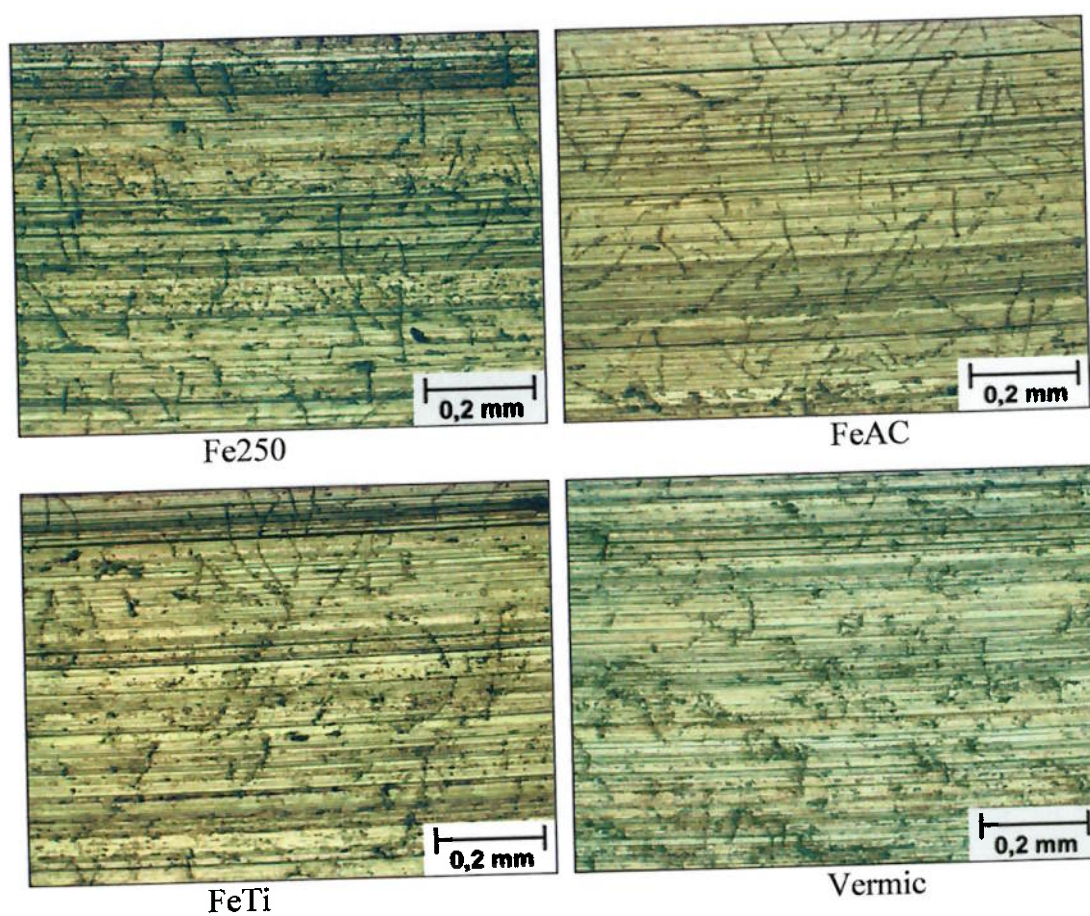


Figura 4-27. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 600 N

Em todas as fotografias, nota-se a presença de sulcos, indicando que as superfícies foram riscadas pela ação abrasiva de detritos que se desprendem dos discos e dos pinos, e que, por um breve intervalo de tempo, ficam livres rolando entre as superfícies, pressionados pela carga aplicada. A profundidade e a separação destes sulcos também é muito parecida em todos os casos.

A aparência das superfícies desgastadas é muito heterogênea, observando-se umas faixas com diferentes tonalidades e larguras. Estas faixas são formadas por óxidos e pelo acúmulo de detritos de desgaste que ficam aderidos à superfície, e que dependendo da quantidade deles, deixam estas faixas mais escuras ou mais claras. Parte dos detritos produzidos durante os ensaios, são expulsos do sistema pino – disco, devido à inércia (saem pela tangente) e a ação do ventilador. Uma outra parte dos detritos, adere à superfície e fica em poros originados no processo de fabricação do ferro fundido e em fendas deixadas pela grafita arrancada durante o contacto entre os discos e os pinos.

As fendas deixadas pelas lamelas de grafitas arrancadas servem como coletores de detritos. O acúmulo desses detritos, nestes locais, pode preencher toda a extensão da fenda, fazendo com que os veios de grafita não fiquem mais visíveis. Os detritos podem formar colônias que ficam aderidas às superfícies dos discos, como visto na figura 4-28. Estas colônias de detritos, segundo Anderson (1992), funcionam como isolante ou filme lubrificante entre as duas superfícies de contacto protegendo-as do desgaste.

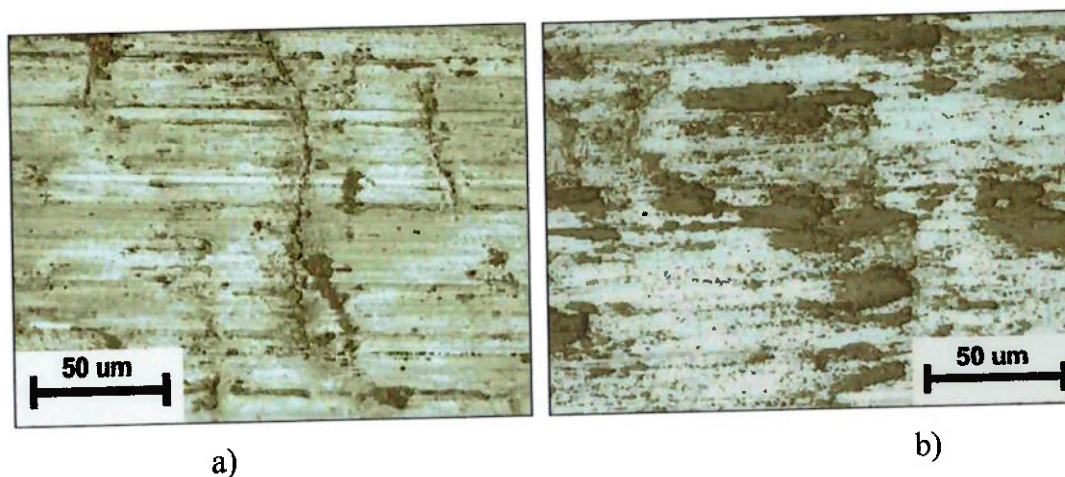


Figura 4-28. Superfícies desgastadas dos discos. a) As lamelas de grafita funcionam como depósitos de detritos. b) Detritos aderidos à superfície desgastada formando colônias.

Observou-se também, que a quantidade de aderências nas superfícies foi maior no ferro fundido vermicular do que nos cinzentos; isto possivelmente é devido às altas forças de atrito e temperaturas alcançadas neste material.

As colônias de detritos puderam ser melhor identificadas através da técnica de microscopia eletrônica de varredura, cujos resultados são mostrados a seguir.

Microscopia eletrônica de varredura:

Discos: As análises realizadas, através de microscopia eletrônica de varredura, das superfícies desgastadas dos discos, comprovaram o que foi observado por microscopia óptica.

Todas as superfícies de desgaste dos discos, independentemente do tipo de ferro fundido analisado, apresentaram um aspecto muito semelhante entre si, mostrando marcas de desgaste abrasivo e grande deformação plástica superficial.

Verificou-se, também, que as lamelas de grafita apresentavam-se parcial ou totalmente encobertas por detritos de desgaste e que, defeitos do material, como aqueles provenientes do próprio processo de fabricação (poros), servem também de depósitos para o acúmulo de detritos originados no processo de desgaste. Esses detritos, em alguns casos formaram colônias, aleatoriamente espalhados na superfície.

Análises EDS permitiram identificar a natureza destes detritos e de outros elementos que apareceram nas superfícies. Na figura 4-29 é mostrado como exemplo, a fotografia da superfície desgastada do ferro fundido cinzento FeTi, na qual foram identificadas algumas características superficiais.

As análises químicas mostraram que, a maior parte desses detritos é constituída por óxido de ferro. Já os detritos acumulados em poros ou em outros defeitos de tamanho semelhante, eram formados basicamente por materiais provenientes do pino, como é possível verificar pelos espectros de raios X, que aparecem junto à fotografia.

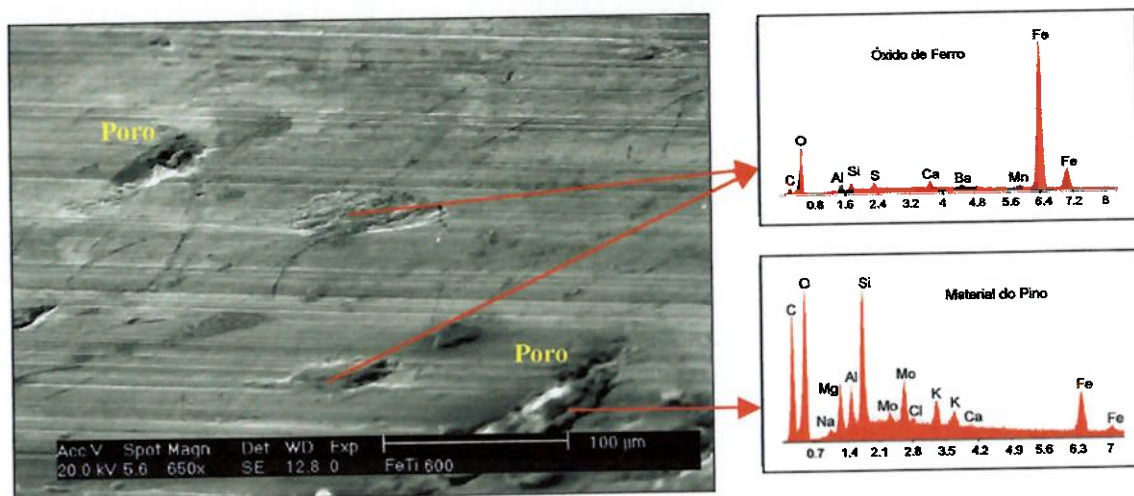
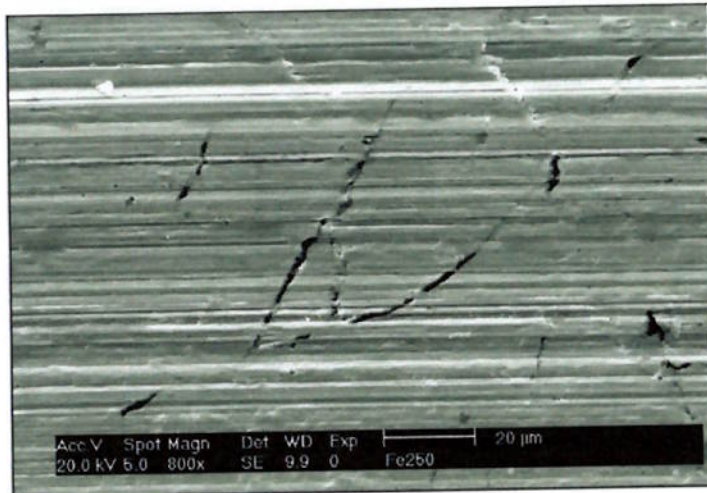


Figura 4-29. Detritos aderidos à superfície desgastada formando colônias e preenchendo defeitos superficiais (poros) e suas respectivas análises químicas EDS.

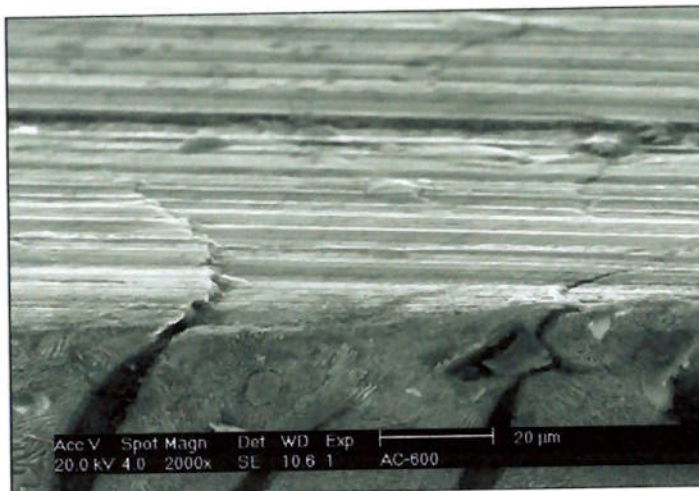
No foi possível identificar se o óxido de ferro observado nas superfícies desgastadas foi formado por mecanismos de desgaste oxidativo ou se era proveniente da pastilha de freio, já que um dos principais constituintes da pastilha de freio, usada neste trabalho, era precisamente óxido de ferro. De qualquer maneira, devido ao tamanho destes detritos pensa-se que, possam ser originários da pastilha, porque o tempo necessário para formar e acumular tamanha quantidade de óxidos, seria muito grande por processos de oxidação natural. Além dos detritos observados, as superfícies desgastadas apresentam riscamento superficial e deformação plástica, indicando que mecanismos de desgaste abrasivo atuaram durante o desgaste.

A figura 4-30 mostra aspectos relevantes encontrados nas superfícies de desgaste dos discos, tais como: a) *Desgaste abrasivo* - riscos uniformemente distribuídos em toda superfície, com diferentes profundidades, b) *Deformação plástica* – o material adjacente às lamelas de grafita é deformado plasticamente no sentido do deslizamento, provocando, a compressão da lamela de grafita e posteriormente o encobrimento dela. O material perde o poder lubrificante da grafita e a capacidade de dissipação de calor, e c) *Trincamento* - o material adjacente à grafita sofre grande deformação plástica, encrua e depois de repetidos

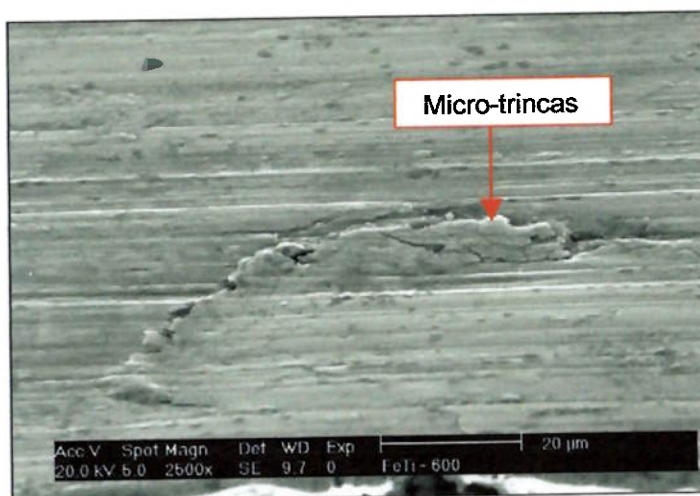
ciclos de deformação, forma micro-trincas, que levam à micro-fratura dessas regiões devido à fadiga, provocando o destacamento de partículas de desgaste.



Riscos superficiais característicos do desgaste abrasivo.



Deformação plástica. Lamelas de grafita comprimidas e cobertas.

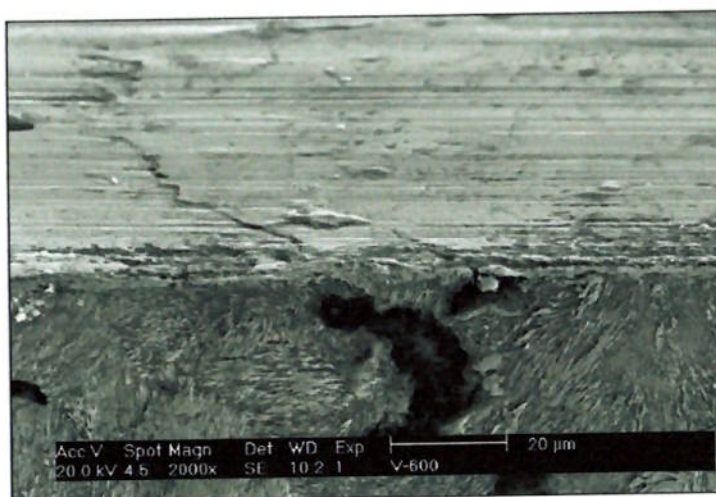


Formação de micro-trincas nas regiões deformadas plasticamente.

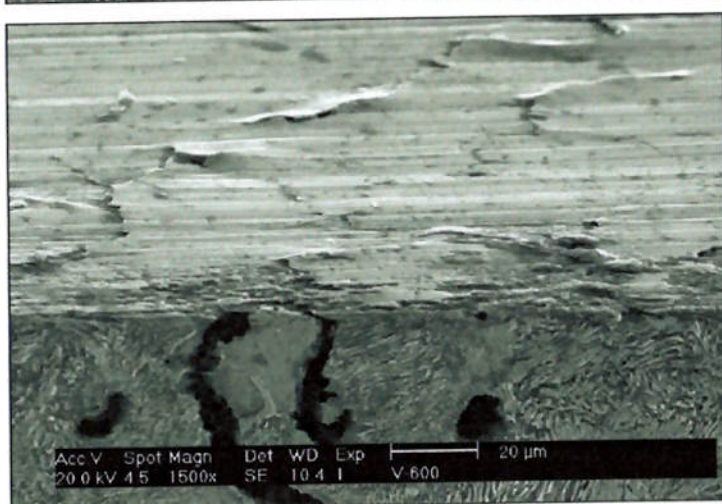
Figura 4-30. MEV - Superfícies desgastadas dos ferros fundidos cinzentos.

No caso do ferro fundido vermicular, as superfícies desgastadas também apresentaram aspectos muito semelhantes aos mostrados nos ferros fundidos cinzentos, porém, as marcas de deformação plástica foram muito mais acentuadas neste material, como é mostrado nas fotografias da figura 4-31.

Estas evidências vêm de encontro à maior perda de massa sofrida por este material. A contínua deformação plástica provoca encruamento da matriz, que fica cada vez mais frágil facilitando a desintegração destas regiões deformadas, e com isto, o aumento da perda de massa, através de mecanismos de fadiga.



Superfícies riscadas por mecanismos abrasivos e deformação plástica do material em regiões adjacentes às lamelas de grafita.



Deformação plástica.
Superfície muito danificada

Figura 4-31. Superfícies desgastadas do ferro fundido vermicular. Marcas de desgaste abrasivo e deformação plástica mais severa que nos ferros fundidos cinzentos.

Com o intuito de analisar as conseqüências do processo de desgaste no material logo abaixo das superfícies de desgaste, foram realizadas observações destas regiões em todos os materiais ensaiados. Verificou-se que a zona de material afetado pelo processo de desgaste é muito pequena e independe do tipo de ferro fundido ensaiado. Na figura 4-32 mostra-se, a título de exemplo, a fotografia da seção transversal, normal à superfície de desgaste, do ferro fundido vermicular, atacada quimicamente com Nital 2%.

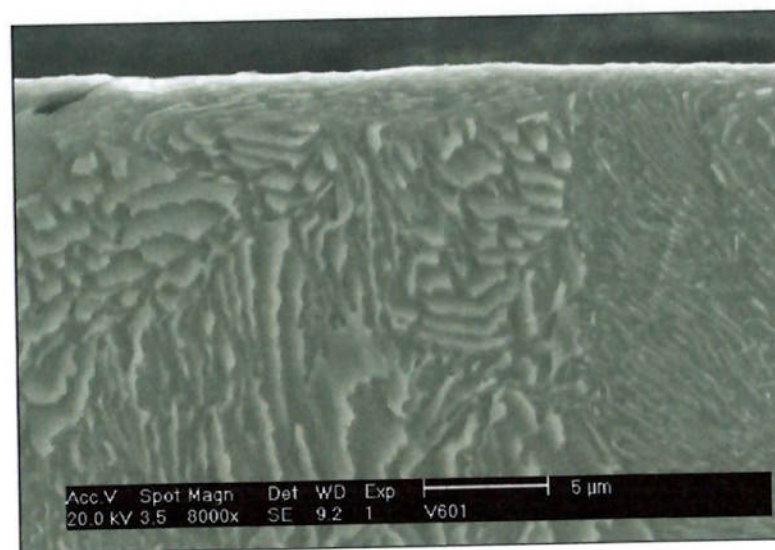


Figura 4-32. Seção transversal da superfície desgastada do ferro fundido vermicular. Matriz perlítica completamente destruída na borda superior, formando uma camada deformada de aproximadamente 2 μm de espessura. Grafita comprimida devido à deformação plástica da superfície.

Nesta fotografia se observa que, somente a perlita que fica muito próxima da superfície de desgaste, sofre deformação plástica, chegando a ficar completamente destruída e formando uma camada deformada de aproximadamente 2 μm de espessura. Nesta camada a cementita foi deformada e fraturada devido à ação mecânica do deslizamento do pino em cima da superfície do ferro fundido. Abaixo desta camada deformada, se observa uma microestrutura

perlítica homogênea, indicando que não foi influenciada pelo processo de desgaste.

Rhee (1973), analisando discos e tambores de freio de ferro fundido cinzento com matriz perlítica, retirados de veículos de passageiros (Peso: 2300 kg) depois de 38000 km de rodagem, observou microestruturas exatamente iguais, àquelas observadas no presente trabalho. Rhee verificou também que, as lamelas de grafita na superfície de contacto, sofreram compressão e posteriormente, foram cobertas pelo metal das bordas, e que a perlita na superfície de contacto, estava totalmente destruída, formando uma zona deformada de 1 a 2 μm de espessura.

Pinos: Análises realizadas nas superfícies desgastadas dos pinos (pastilha de freio), não revelaram diferenças importantes na aparência dos pinos ensaiados com um ou outro material. A quantidade de grafita, vista na superfície dos pinos, antes dos ensaios (fração volumétrica = 25%), não mudou com o processo de desgaste, indicando que a pastilha não perdeu grafita de alto poder lubrificante.

Notou-se que, o contacto entre o pino e o disco, acontece somente em regiões bem localizadas, como visto na figura 4-33, indicando que a área real de contacto é muito menor que a área aparente de 144 mm^2 , inicialmente prevista.

Esta figura mostra que as fibras de ferro, consideradas como elementos estruturais das pastilhas de freio, constituem um dos locais onde o contacto acontece. Entretanto, outras áreas de contacto de coloração cinza clara e preta são também visíveis.

Análises químicas realizadas nestas áreas mostraram que, as áreas pretas eram de grafita e as áreas cinzas claras, constituídas por uma mistura de elementos químicos, com uma predominância do óxido de ferro, como mostram os espectros de raios X da figura 4-33.

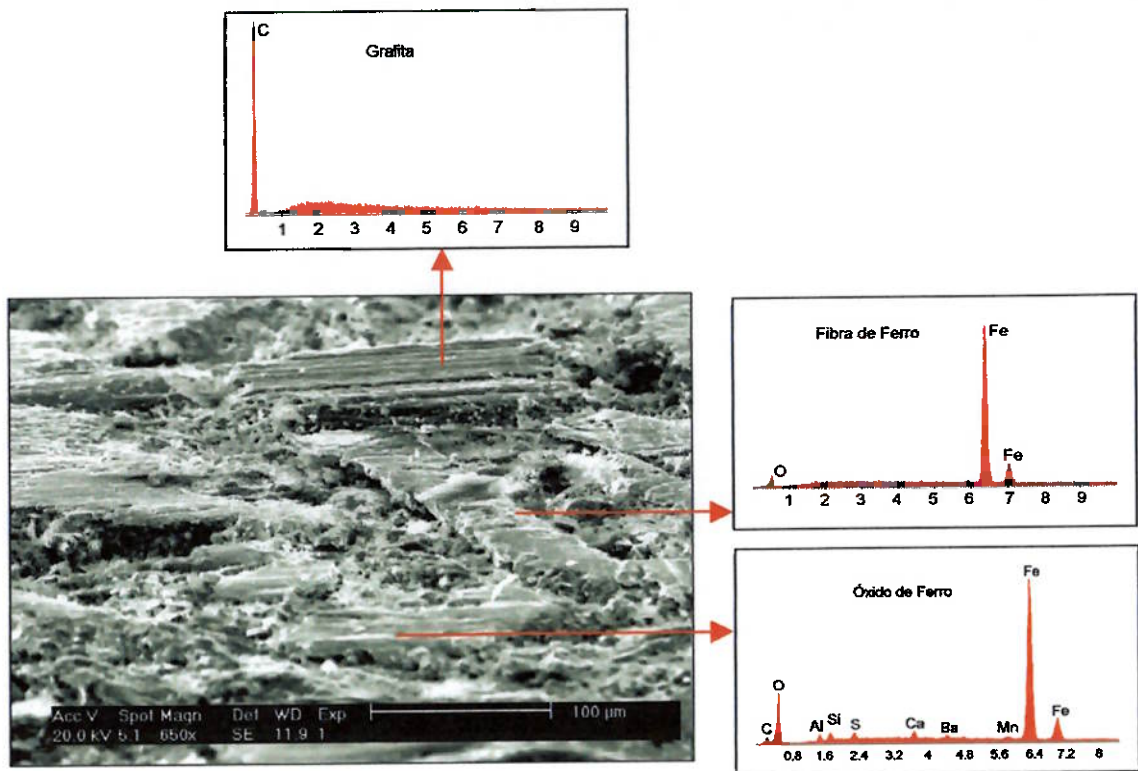


Figura 4-33. Superfícies desgastadas dos pinos, depois dos ensaios de desgaste. As áreas reais de contacto são constituídas basicamente por fibras de ferro, óxidos de ferro e grafita.

As áreas, em que de fato acontece o contacto, formam o que Eriksoon (2002), chama de “platôs de contacto”. Estes platôs são áreas planas, de diferentes tamanhos, espessuras e níveis de altura, que mostram a maneira como o deslizamento entre os dois corpos aconteceu (figura 4-34).

Os platôs de contacto são constituídos por materiais mais resistentes ao desgaste, como as fibras de ferro e os óxidos de ferro. Por isso, aparecem nas fotografias num nível de altura maior que as áreas vizinhas. Durante o processo de desgaste, estes platôs são criados e destruídos em intervalos de tempo muito pequenos. A destruição destes platôs se deve a dois processos de desgaste:

- a) A ação abrasiva de *debris* que rolam entre as duas superfícies em contacto e deixam marcas como os riscos vistos nas fotografias.

b) A processos de delaminação causados pelas tensões de compressão e de cisalhamento a que são submetidos os platôs durante as frenagens. Infelizmente, a fotografias da figura 4-34, não mostram evidências claras deste mecanismo de desgaste, porém no decorrer do trabalho será exposta uma prova disto (carga de 100 N, figura 4-72).

As áreas vizinhas, que nas fotografias aparecem a um nível de altura inferior à dos platôs de contacto, mostram que, são formadas principalmente pela grafita e por outros elementos que constituem a pastilha de freio.

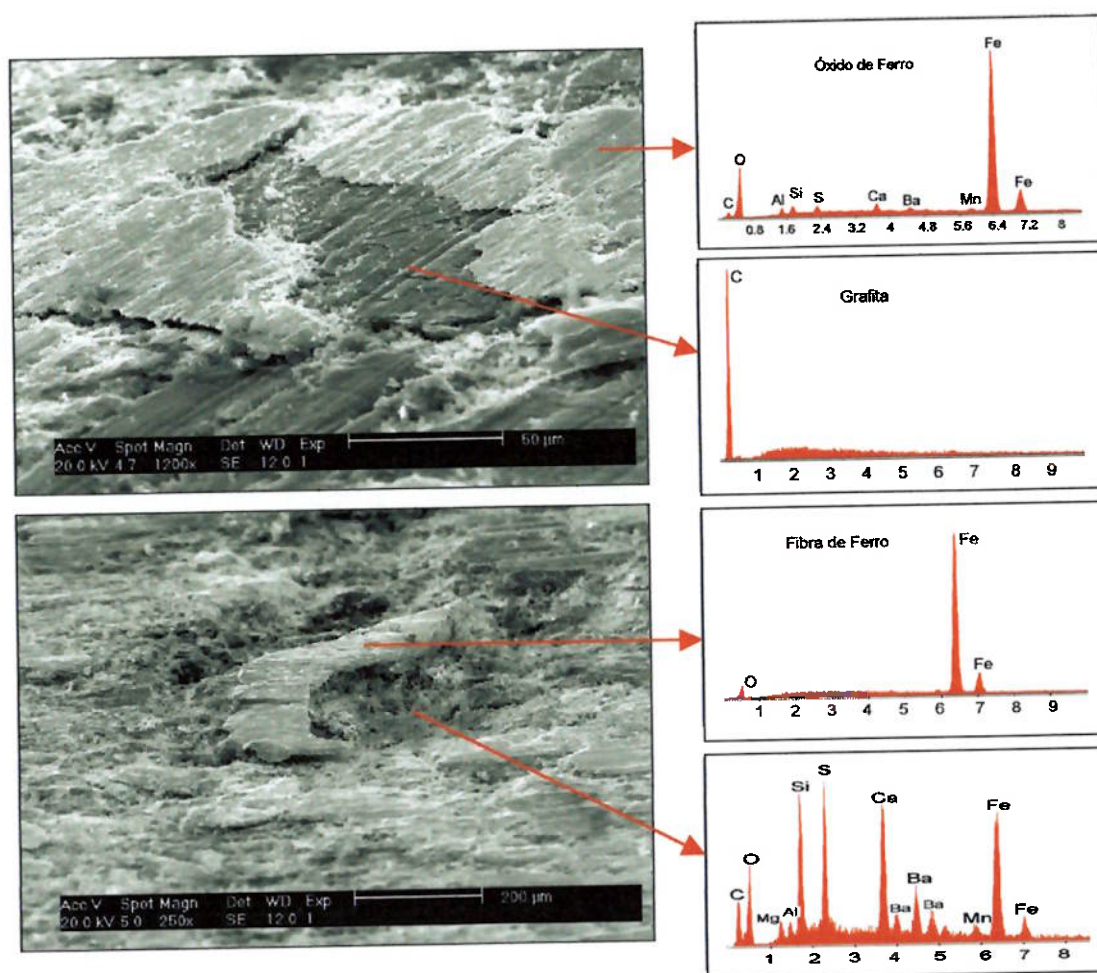


Figura 4-34. Superfícies desgastadas dos pinos. Platôs de contacto e áreas vizinhas.

Foram realizadas também, análises dos detritos de desgaste recolhidos em volta da máquina de ensaios. O papel filtro usado para coletar estes detritos ficou completamente manchado de preto, indicando que grandes quantidades de grafita foram removidas das superfícies em contacto, tanto dos discos, quanto dos pinos.

Observações realizadas no MEV revelaram que, a maior parte destes detritos era constituída por partículas de carbono vindas da grafita, enquanto que partículas de desgaste um pouco maiores eram de óxido de ferro, como se vê nas fotografias da figura 4-35.

Não foi possível determinar se estas partículas de óxido eram provenientes dos pinos ou dos discos. Da mesma forma, não foi possível verificar se estas partículas eram, na verdade, partículas de ferro removidas dos discos e que após os ensaios se oxidaram devido à ação do meio ambiente.

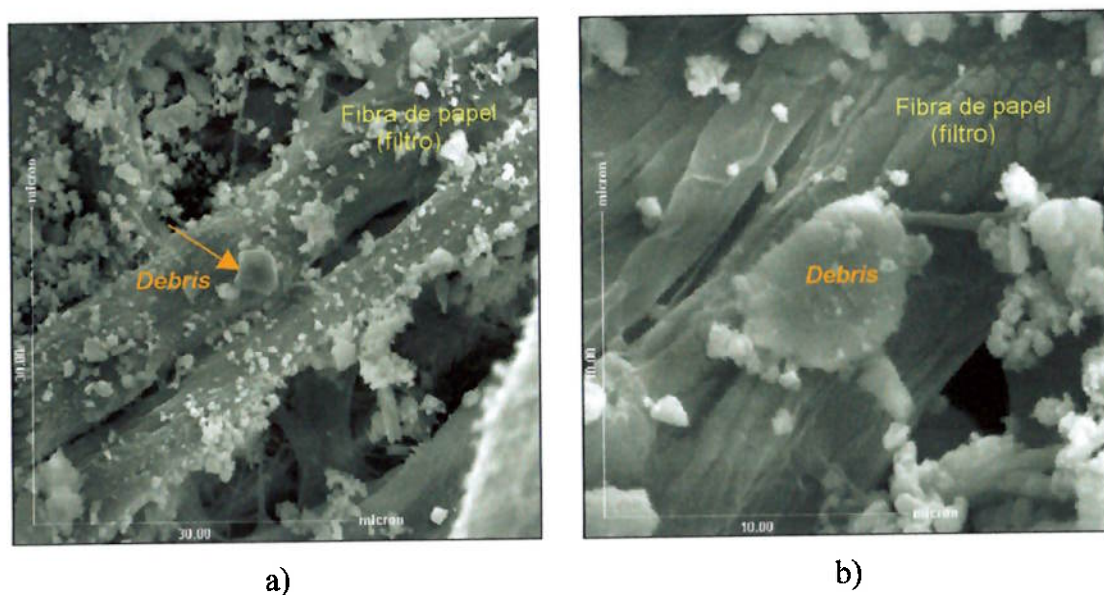


Figura 4-35. Detritos coletados após os ensaios de desgaste.

- a) Partícula de óxido de ferro, rodeado de partículas muito pequenas de carbono, coladas às fibras de papel filtro, usado para a coleta de detritos.
- b) Idem (a), com maior aumento.

4.4.1.4. Ensaio com carga de 500 N.

Como visto na figura 4-23, as forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste utilizando ferro fundido vermicular foram superiores às obtidas com os ferros fundidos cinzentos. Isso levou a pensar que, utilizando-se o ferro fundido vermicular e aplicação de cargas menores que 600 N, poderiam ser obtidos resultados semelhantes aos apresentados pelos ferros fundidos cinzentos, especialmente no que diz respeito à perda de massa e a temperatura.

Para verificar esta hipótese, foram realizados ensaios de desgaste utilizando-se uma carga de 500 N, cujos resultados são mostrados a seguir:

Força de atrito e temperatura

Na tabela 4-11 são mostrados os valores medidos de força de atrito e temperatura obtidos dos ensaios de desgaste realizados, com uma carga aplicada de 500N, no ferro fundido vermicular. Esta tabela compara também, estes resultados com os obtidos dos ensaios realizados nos ferros fundidos cinzentos e vermiculares, utilizando-se 600 N de carga aplicada.

Tabela 4-11. Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito medidos utilizando o ferro fundido vermicular e carga de 500N.

	600 N		500 N
	Cinzento	Vermic	Vermic
Temperatura [°C]	210 ± 10	240 ± 10	200 ± 10
Atrito [N]	325 ± 10	360 ± 10	330 ± 10
Coef. Atrito	0,55 ± 0,02	0,60 ± 0,02	0,66 ± 0,02

Verificou-se que, com 500 N de carga aplicada, os valores de força de atrito e de temperatura, são muito semelhantes aos obtidos com ferros fundidos cinzentos ensaiados com 600 N. Estes resultados permitem inferir que, o ferro fundido vermicular poderia ser usado com a mesma expectativa de desempenho de frenagem que a apresentada pelos ferros fundidos cinzentos, só que necessitando a

aplicação de cargas de frenagem menores, o que poderia levar a menores perdas de massa.

Perda de massa

Na tabela 4-12 são mostrados os resultados de perda de massa dos discos e dos pinos obtidos durante os ensaios de desgaste realizados com o ferro fundido vermicular e carga de 500 N. Os resultados mostram que, com esta carga de frenagem, os desgastes dos discos e dos pinos são praticamente iguais entre si, durante o ensaio. A comparação destes resultados, com os obtidos quando a carga aplicada foi de 600 N são mostrados nas figura 4-36 e 4-37.

Tabela 4-12. Perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular e dos pinos, ensaiados com 500 N de carga aplicada.

Tempo de ensaio [h]	Perda de massa [g] – 500 N		
	7	14	21
Disco	0,18 ± 0,01	0,35 ± 0,02	0,55 ± 0,06
Pino	0,18 ± 0,02	0,37 ± 0,08	0,56 ± 0,08

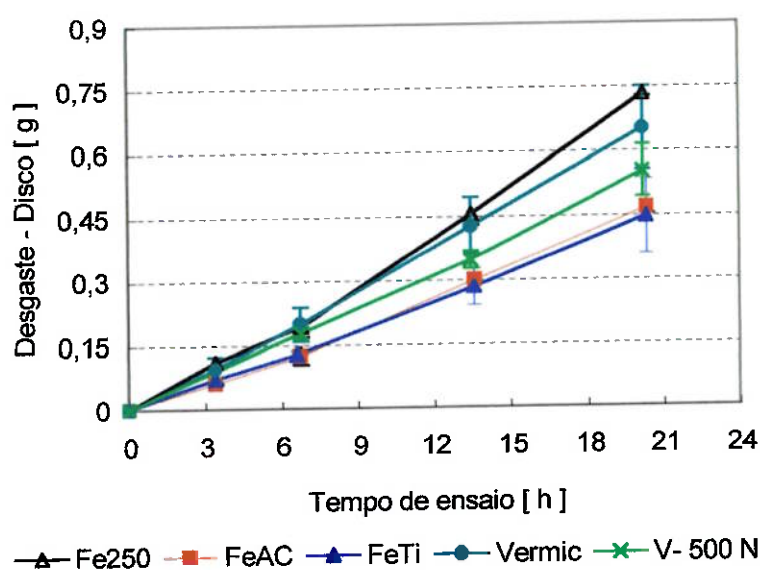


Figura 4-36. Medidas de perda de massa comparativas dos discos obtidas de ensaios de desgaste realizados com carga de 600 N e 500 N.

A figura 4-36 mostra que, a perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular, ensaiados com 500 N, é menor em média que a perda de massa medida neste mesmo material quando ensaiado com 600N. Continua sendo entretanto, um pouco maior que as perdas de massa medidas nos discos de ferro fundido cinzento FeAC e FeTi. Entretanto, considerando o desvio padrão dos resultados, nota-se que, com a carga de 500 N, o ferro fundido vermicular desgasta tanto quanto os ferros fundidos cinzentos, ensaiados com cargas maiores.

A perda de massa dos pinos ensaiados com o ferro fundido vermicular e com a carga de 500 N é mostrada na figura 4-37. Esta figura mostra também, que em média, a perda de massa destes pinos foi inferior àquela medida nos pinos ensaiados com este mesmo material e 600 N de carga aplicada. E é praticamente igual à perda de massa dos pinos ensaiados com o ferro fundido cinzento FeAC, que foram os que menos se desgastaram durante os ensaios com 600 N de carga.

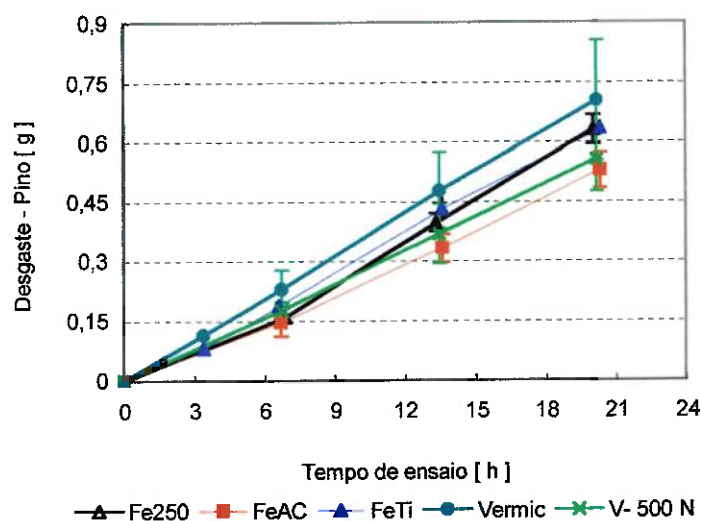


Figura 4-37. Medidas de perda de massa comparativas dos pinos obtidas de ensaios de desgaste realizados com carga de 600 N e 500 N.

Os resultados obtidos com o ferro fundido vermicular e carga de 500 N mostraram que, este material poderia, ser utilizado em discos de freio, apresentando qualidades de frenagem iguais ou até superiores das que poderiam ser obtidas utilizando ferros fundidos cinzentos, sendo necessárias inclusive, menores cargas de frenagem.

4.4.2. Carga cíclica aplicada: 300 N (Pressão: 2 MPa)

4.4.2.1. Perda de massa

O desgaste acumulado dos discos no decorrer dos ensaios foi determinado através das medidas de perda de massa, cujos valores médios e desvios padrão são apresentados na tabela 4-13, e na figura 4-38.

Tabela 4-13. Perda de massa acumulada dos discos. Carga: 300N.

Disco - Perda de massa [g] – 300 N			
Tempo de ensaio [h]	7	14	21
Fe250	$0,05 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$
FeAC	$0,08 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,02$	$0,26 \pm 0,03$
FeTi	$0,06 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,03$
Vermic	$0,07 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,04$

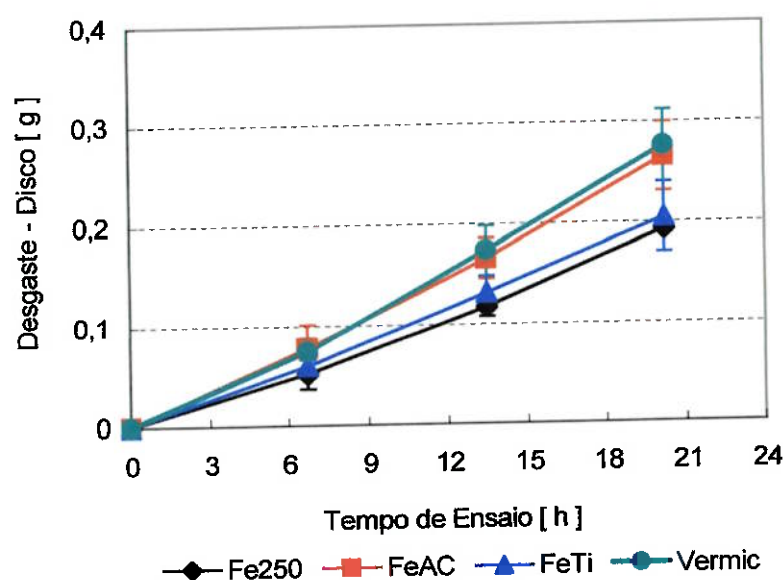


Figura 4-38. Desgaste medido nos discos de ferro fundido. Carga: 300 N

Observa-se que para todos os materiais, o desgaste aumenta uniformemente com o aumento do tempo de ensaio e que a perda de massa é praticamente a mesma. Considerando o desvio padrão dos resultados, verifica-se que não há diferenças significativas entre os ferros fundidos estudados.

A figura 4-38 mostra também que, para todos os materiais, depois das primeiras 7 horas de ensaio a taxa de perda de massa é constante, caracterizando um regime de desgaste estacionário. A taxa de desgaste em tempos menores que 7 horas, foi menor, influenciada pelo “running-in”.

A perda de massa dos discos de Fe250, até as primeiras 7 horas de ensaio, foi de 0,05 g, e logo depois, de 0,07 g. Situações semelhantes aconteceram com os outros três ferros fundidos estudados, onde as perdas de massa antes da sétima hora foram 0,08, 0,06 e 0,07 g e para os outros dois trechos 0,09, 0,07 e 0,1 g para FeAC, FeTi e vermicular, respectivamente.

Na figura 4-38 observam-se também dois níveis de desgaste bem definidos: o primeiro, formado pelos ferros fundidos que menos se desgastaram: Fe250 e FeTi; e o segundo nível, onde aparecem os ferros fundidos que mais se desgastaram, formado pelos FeAC e os vermiculares.

Neste caso, de maneira semelhante ao que foi visto nos ensaios realizados utilizando-se a carga de 600N, o FeTi é o ferro fundido que menos se desgastou enquanto que o vermicular foi o que mais se desgastou. Esse comportamento em desgaste sugere que o Ti presente no FeTi é suficiente para formar nitretos e carbonitretos de titânio que protegeriam o material contra o desgaste; e que a fração de ferrita presente no ferro fundido vermicular seria a principal responsável pela alta perda de massa medida. A maior perda de massa por parte do ferro fundido vermicular não era esperada, pois segundo Zum Gahr (1987), a resistência ao desgaste do ferro fundido cinzento seria de duas a três ordens de grandeza inferior à resistência do ferro fundido nodular, quando submetidos a ensaios de desgaste tipo pino sobre disco, com carga de 2 MPa e velocidade de 2 m/s. Considerando que o ferro fundido vermicular possui propriedades mecânicas intermediárias entre os ferros fundidos cinzentos e nodulares, era de se esperar que apresentasse, pelo menos, uma melhor resistência ao desgaste que os cinzentos, fato não observado nos presentes ensaios.

Na tabela 4-14 e na figura 4-39, é mostrado o desgaste acumulado dos pinos, ensaiados contra os discos de ferro fundido.

Tabela 4-14. Perda de massa acumulada dos pinos. Carga: 300N.

Pino - Perda de massa [g] – 300 N			
Tempo de Ensaio [h]	7	14	21
Fe250	0,03 ± 0,00	0,06 ± 0,00	0,09 ± 0,01
FeAC	0,05 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,14 ± 0,02
FeTi	0,04 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,13 ± 0,01
Vermic	0,04 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,12 ± 0,02

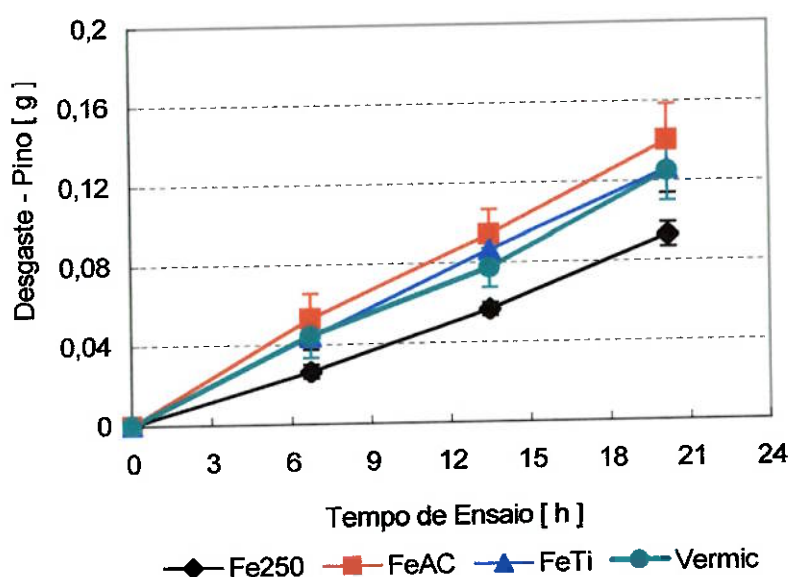


Figura 4-39. Desgaste medido nos pinos. Carga: 300N

Nesta figura observa-se que os pinos que menos se desgastaram foram aqueles ensaiados com os discos de Fe250, coincidindo com a posição das curvas de desgaste dos discos mostrada na figura 4-38. O desgaste dos outros pinos foi praticamente igual, com variação de apenas 0,05 g, independentemente do par tribológico utilizado.

Na tabela 4-14 nota-se também que, a taxa de perda de massa dos pinos é constante nos três trechos analisados, observando-se uma perda de massa média de

aproximadamente 0,04 g. Estes resultados mostram que o running-in praticamente não afeta a perda de massa, pois no primeiro trecho (até 7 horas), desgaste medido é igual ao medido nos outros dois.

Analisando os desgastes dos discos e dos pinos, observa-se que, em geral, os discos sofreram desgaste quase duas vezes maior que os pinos. A perda de massa dos discos, para 21 horas de ensaio foi de aproximadamente 0,25 g enquanto que para os pinos foi de aproximadamente 0,12 g.

Comparando as perdas de massa dos discos e dos pinos em função das cargas de frenagem (600 N e 300 N), observa-se que com 50% de diminuição da carga de frenagem, o desgaste dos discos diminuiu aproximadamente 75% no Fe250, 45% no FeAC, 55% no FeTi e 55% no vermicular. Essa diminuição foi de aproximadamente 80% no caso dos pinos. Isso mostra que não existe uma relação direta entre a carga aplicada e o desgaste medido. Uma possível explicação para isto estaria relacionada com os regimes de desgaste (severo e/ou moderado) atuantes em cada condição de ensaio e principalmente com os mecanismos de desgaste presentes.

Como observado nos ensaios com carga de 600N, também verificou-se que, embora os resultados de desgaste para os ferros fundidos cinzentos e vermicular, fossem praticamente iguais, houve variações de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito; resultados apresentados a seguir.

4.4.2.2. Temperatura, Força de atrito e Coeficiente de atrito.

Na tabela 4-15 e figuras 4-40, 4-41 e 4-42, são mostradas as curvas de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, obtidas no decorrer dos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e para diferentes materiais de disco num período de 7 horas. Cada ponto destas curvas corresponde ao valor máximo alcançado ao final de cada ciclo.

As curvas de temperatura da figura 4-40, referentes aos ensaios realizados com os ferros fundidos cinzentos, indicam temperaturas máximas praticamente iguais. Os ferros fundidos cinzentos atingem 100 °C enquanto que o ferro fundido

vermicular 120 °C, e essa diferença se deve possivelmente a morfologia da grafita nesse material.

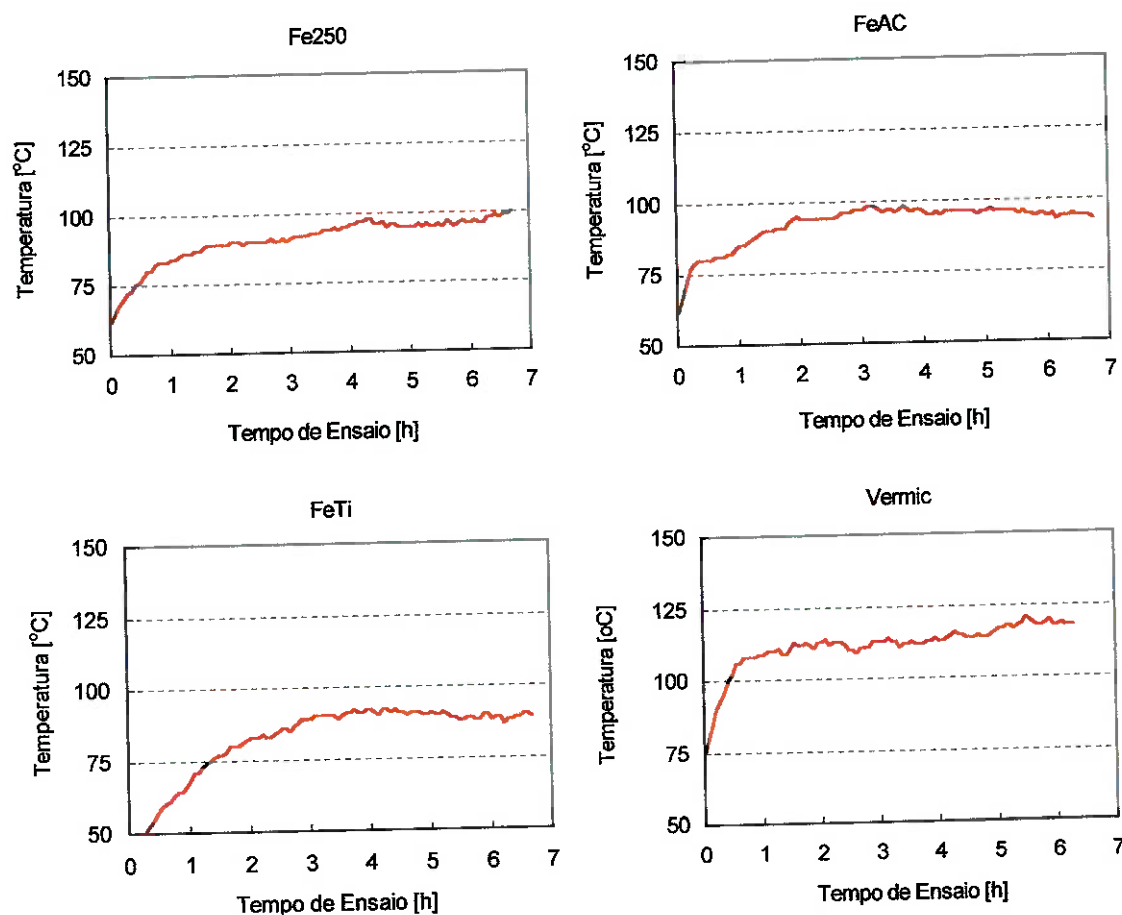


Figura 4-40. Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 300 N

Da mesma forma, as forças de atrito (figura 4-41), apresentam variação semelhante a observada em relação a temperatura: no começo são pequenas, aumentam gradualmente no decorrer do ensaio e atingem um valor praticamente constante. O tempo para atingir esse valor constante corresponde ao necessário para que aconteça a acomodação das duas superfícies em contacto, passando pelo running-in e entrando em regime estacionário. No caso dos ferros fundidos cinzentos, esse tempo foi de aproximadamente 2 a 3 horas, e no ferro fundido vermicular de 1 hora.

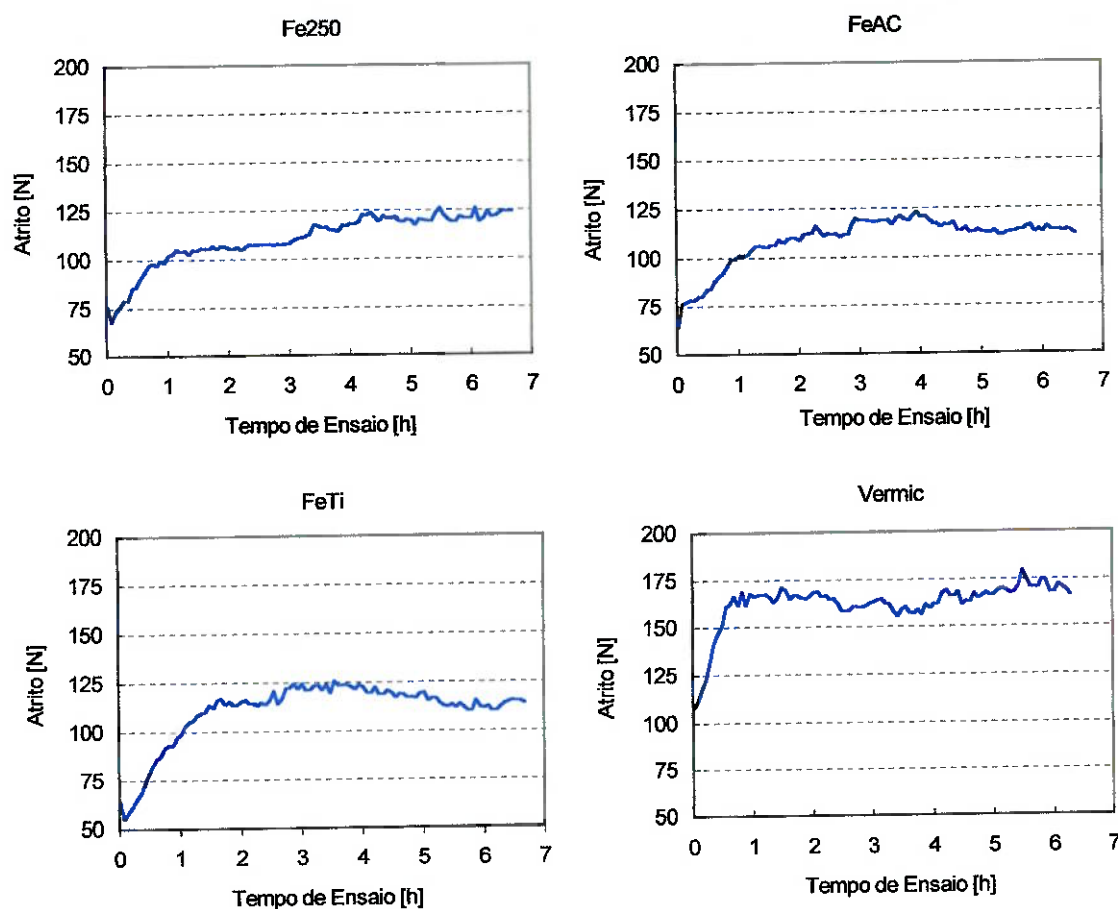


Figura 4-41. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 300 N

A figura mostra, ainda, que os ferros fundidos cinzentos geram forças de atrito muito parecidas, alcançando valores próximos de 125 N. Já o ferro fundido vermicular apresenta forças de atrito próximas de 175 N. Isto quer dizer que para o mesmo nível de carga de frenagem, o ferro fundido vermicular provoca uma força de atrito 40% maior que a obtida com ferros fundidos cinzentos, indicando que, com este material, pode-se usar uma carga de frenagem menor para obter uma resposta de frenagem semelhante àquela obtida com os ferros fundidos cinzentos.

Os ferros fundidos vermiculares apresentaram maiores forças de atrito em decorrência da presença de 14% de ferrita, fase mole favorece os mecanismos de adesão. Estes resultados vêm de encontro aos resultados apresentados anteriormente para carga de frenagem foi de 600N.

De maneira semelhante ao observado nos ensaios com carga de 600N, não ocorreu “fading” em nenhum dos ferros fundidos estudados.

Os coeficientes de atrito calculados durante os ensaios são apresentados na figura 4-42. Como esperado, os coeficientes de atrito dos ferros fundidos cinzentos foram semelhantes para todos eles, enquanto que o do ferro fundido vermicular foi maior.

Os valores médios de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito obtidos no decorrer dos ensaios de desgaste, com carga de frenagem de 300 N, são apresentados de forma condensada na tabela 4-15.

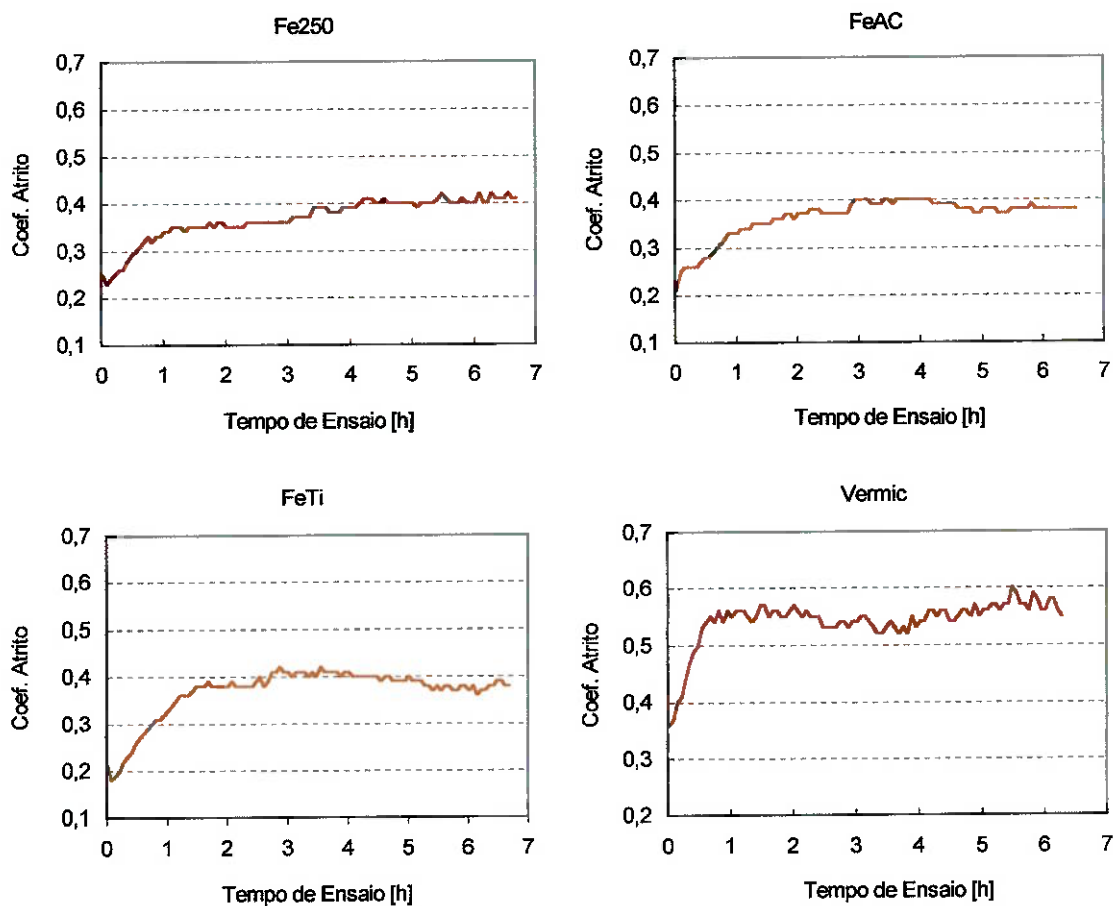


Figura 4-42. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 300 N

Tabela 4-15. Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito. Carga: 300 N.

Material	Temperatura [°C]	Força de Atrito [N]	Coeficiente de Atrito
Fe250	90 ± 5	110 ± 10	0,36 ± 0,03
FeAC	85 ± 10	110 ± 5	0,36 ± 0,02
FeTi	95 ± 5	110 ± 5	0,37 ± 0,02
Vermicular	115 ± 5	165 ± 5	0,55 ± 0,02

A tabela 4-15 mostra que as temperaturas (90°C), as forças de atrito (110 N) e os coeficientes de atrito (0,36) são muito semelhantes para os ferros fundidos cinzentos, enquanto que, para o vermicular foram respectivamente 115, 165 e 0,55.

Comparando os resultados mostrados na tabela 4-15 com os resultados mostrados na tabela 4-10, nota-se que, a diminuição da carga de frenagem de 600 N para 300N (-50%), provoca uma diminuição de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito. A temperatura nos ferros fundidos cinzentos cai de 210°C para 90°C (-57%), a força de atrito de 320 N para 110 N (-65%) e do coeficiente de atrito de 0,55 para 0,36 (-35%). No caso do vermicular essas diminuições eram mais proporcionais, verificando-se que a temperatura passou de 240°C para 115°C(-52%), a força de atrito de 360 N para 165 N (-55%) e o coeficiente de atrito de 0,6 para 0,55 (-8%).

Das comparações realizadas entre os resultados obtidos com as cargas de 600 N e 300 N, pode-se concluir que o ferro fundido vermicular apresenta um comportamento mais uniforme durante as variações de carga de frenagem aplicadas, porque ante uma variação de carga de 50%, este material apresentou variações médias de 55% na perda de massa, temperatura e força de atrito.

4.4.2.3. Análises das superfícies desgastadas.

Rugosidade:

Discos: As medidas de rugosidade Ra e Sm dos discos ensaiados com a carga de frenagem de 300 N são mostradas na figura 4-43. Observa-se que o valor de Ra, no início do ensaio é muito baixo, devido ao polimento prévio de todos os discos até $1\ \mu\text{m}$; após as 7 horas iniciais de ensaio este valor, praticamente, igual para todos os ferros fundidos, em torno de $0,7\ \mu\text{m}$. Observa-se o mesmo comportamento em relação ao parâmetro Sm, que se estabiliza em aproximadamente $120\ \mu\text{m}$.

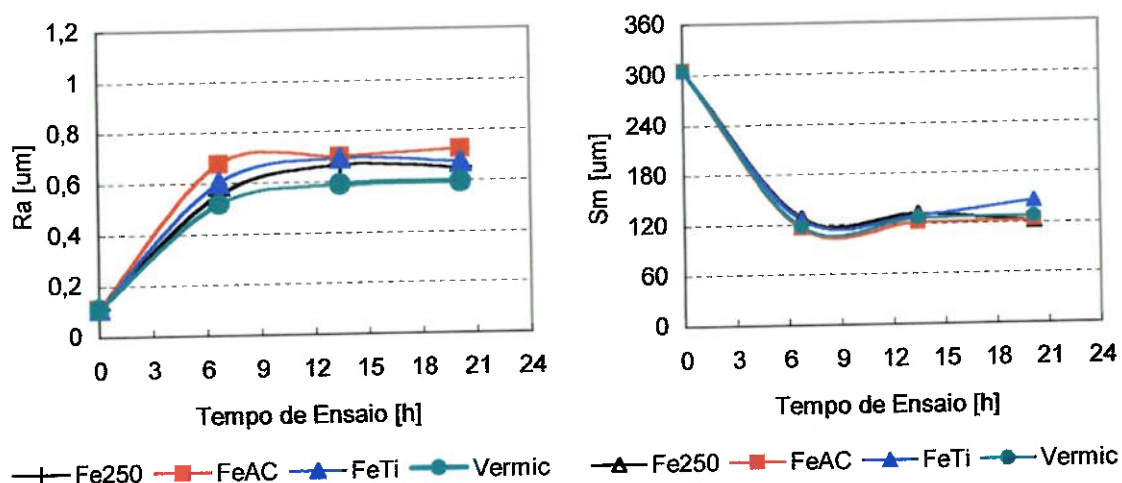


Figura 4-43. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos discos em função do tempo de ensaio. Carga: 300 N

Estes resultados indicam nestas condições de ensaio, o contacto entre pastilhas e discos ocorre de forma semelhante em todos os ferros: as marcas deixadas pelo deslizamento entre as duas superfícies independe do material usado como disco de freio.

Comparando os valores de Ra e Sm medidos com as cargas de 600N (figura 4-25) e 300N (figura 4-43), nota-se que, são muito parecidos entre si. Pois o Ra e

Sm com carga de 600N foram $0.8 \mu\text{m}$ e $120 \mu\text{m}$, respectivamente; enquanto que com a carga de 300 N foram $0.7 \mu\text{m}$ e $120 \mu\text{m}$.

Pinos: Na figura 4-44 são mostrados os valores de Ra e Sm dos pinos. Nota-se que os valores de Ra tendem a se estabilizar em aproximadamente $3 \mu\text{m}$, independentemente do ferro fundido ensaiado, e os valores de Sm em aproximadamente $120 \mu\text{m}$.

De maneira análoga ao observado nos discos, a rugosidade dos pinos também, tende a se estabilizar a partir da sétima hora de ensaio. O valor de Ra não é igual ao dos discos, porém o valor de Sm é muito semelhante alcançando um valor próximo a $120 \mu\text{m}$.

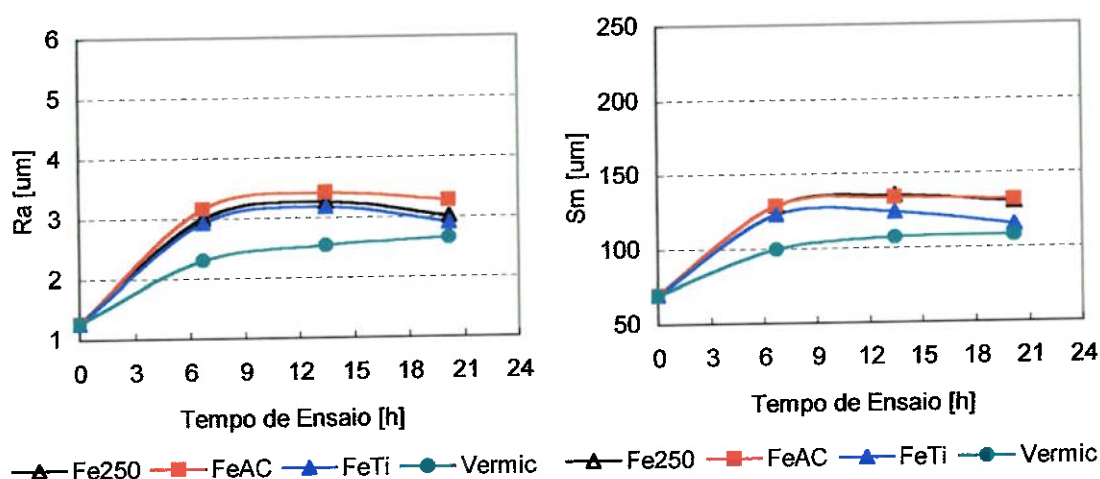


Figura 4-44. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies dos pinos em função do tempo de ensaio. Carga: 300 N

Microscopia óptica:

A figura 4-45 mostra as superfícies dos discos desgastadas durante os ensaios feitos com carga de 300N. As superfícies apresentam maior número de *debris* aderidos que o observado quando o ensaio foi feito com carga de 600 N, indicando que houve desgaste adesivo.

A aparência das superfícies é muito semelhante em todos os ferros estudados. Foram observados riscos uniformemente distribuídos sobre toda a superfície, resultantes de desgaste abrasivo. Devido à grande quantidade de detritos,

as lamelas de grafita em algumas regiões ficam escondidas, especialmente no caso do ferro fundido vermicular.

Identificou-se por meio de difração de raios X que as superfícies desgastadas, continham depositados óxidos e/ou material proveniente dos pinos (pastilhas de freio). Durante o processo de frenagem esses fragmentos não conseguem ser expulsos do sistema e ficam impregnados nas superfícies dos discos. Estas evidências indicam também, mecanismos de desgaste oxidativo operando durante o processo de frenagem.

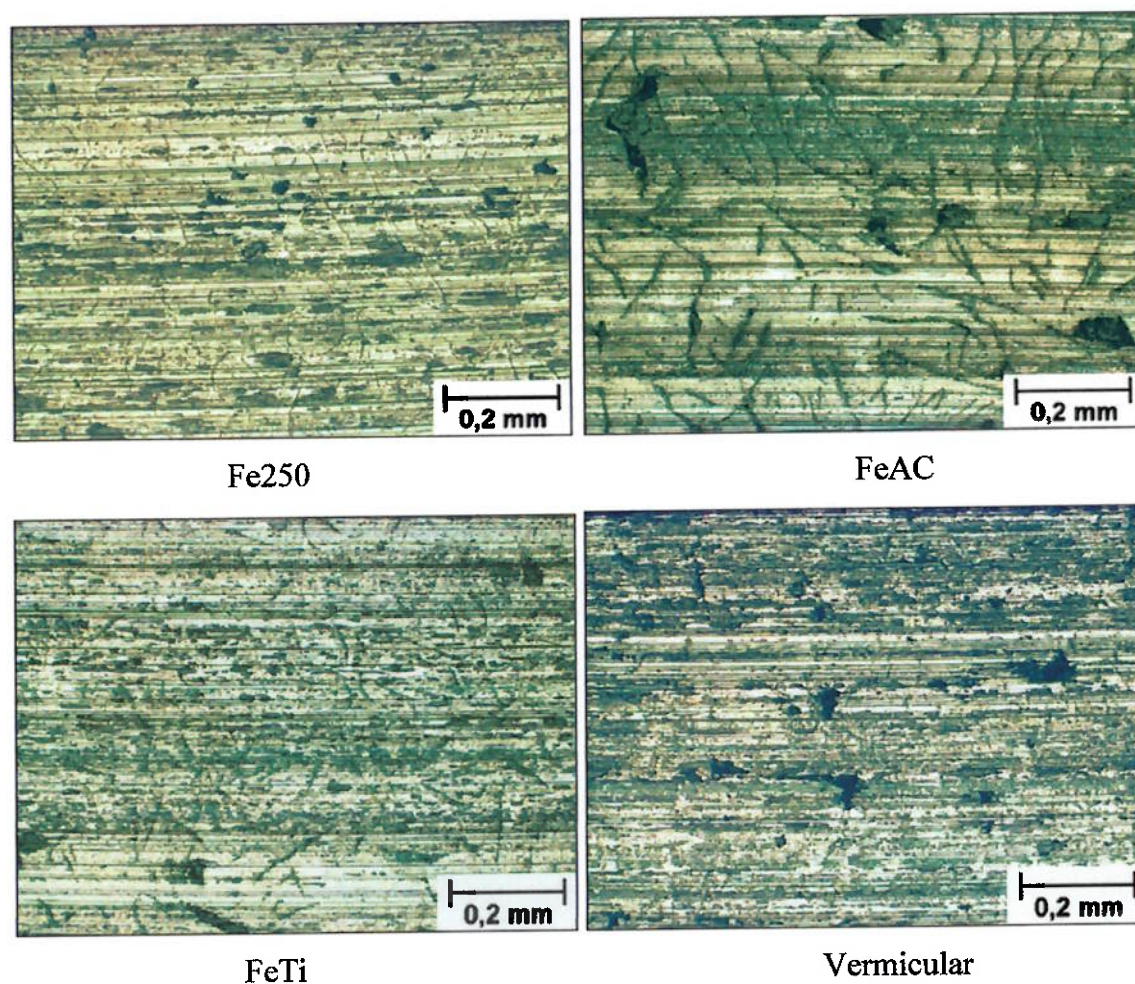


Figura 4-45. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 300 N

Os detritos superficiais são responsáveis pela variação dos resultados de desgaste obtidos no decorrer destes ensaios, pois às vezes formam-se camadas de detritos tão uniformemente distribuídos em toda a superfície, que quase não permitiam a visualização do material base (figura 4-46). Estas camadas funcionam como “filmes lubrificantes” que impedem o contacto entre as duas superfícies em atrito, protegendo-as do desgaste. Entretanto, devido ao fato de que a formação e a remoção destes filmes é um processo dinâmico, aleatoriamente existirão regiões livres destas camadas onde o desgaste dos discos seria facilitado.

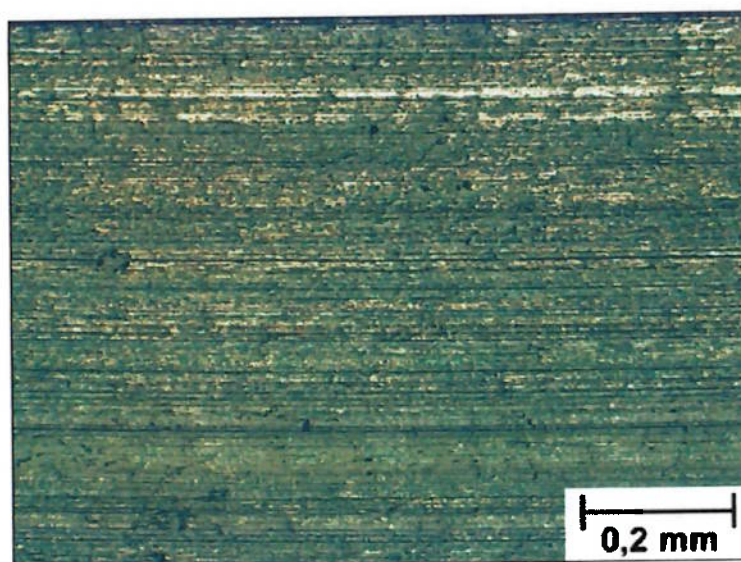


Figura 4-46. Superfície desgastada de um disco de ferro fundido vermicular totalmente coberta por detritos. Carga: 300 N

Microscopia eletrônica de varredura:

Discos: Análises realizadas através de MEV mostraram, também, que as superfícies desgastadas apresentam regiões onde há acúmulo de detritos, como mostrado na figura 4-47. Estas regiões são, em geral, cavidades, onde antes havia grafita ou poros (defeitos do material), que com o decorrer dos ensaios, vão sendo preenchidos, até formarem uma espécie de crosta e em alguns casos chegando a formar camadas.

Neste caso, tampouco foi possível identificar se estes óxidos presentes nas superfícies desgastadas foram formados por mecanismos de oxidação natural ou se

são originários da própria pastilha de freio. Entretanto, devido à sua quantidade, imagina-se que tenham vindo da pastilha.

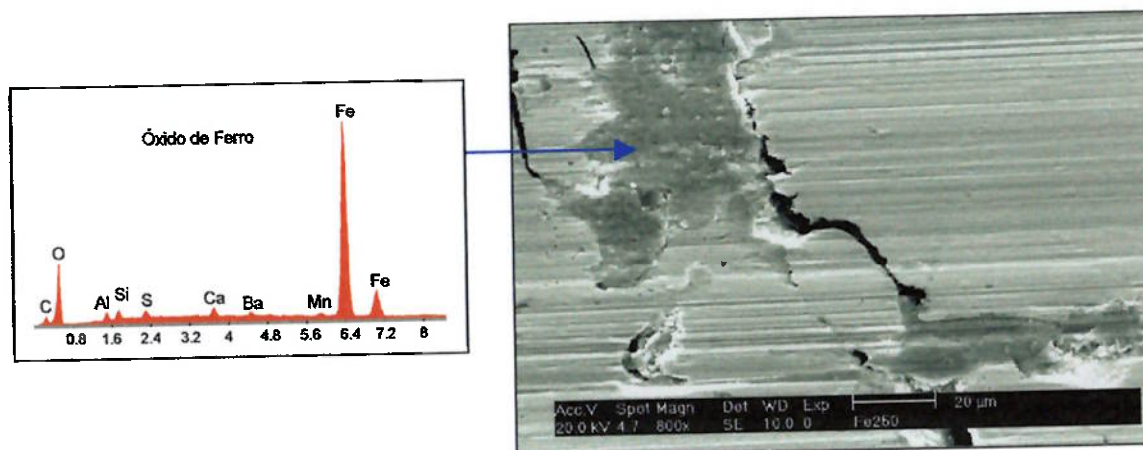
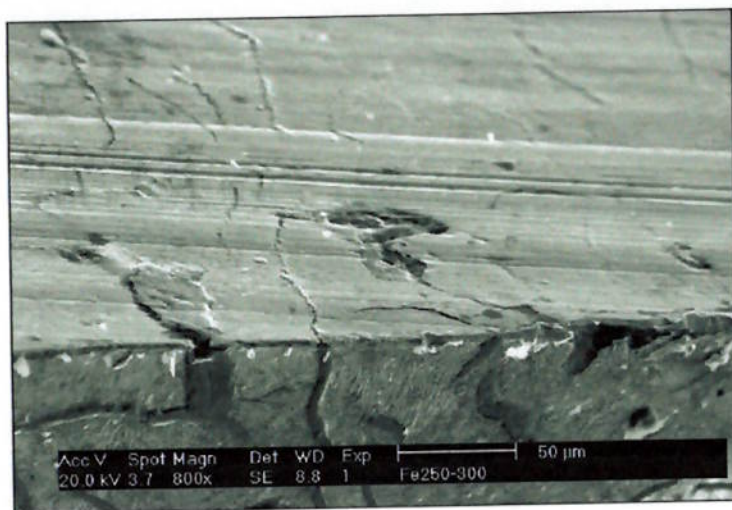


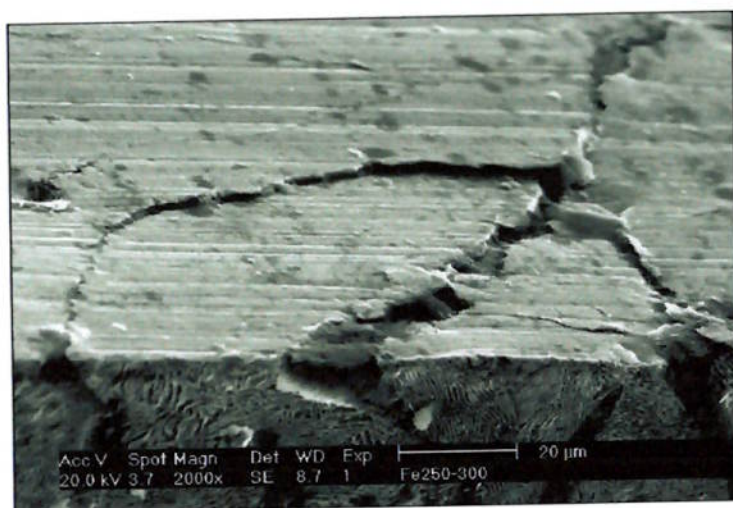
Figura 4-47. Acúmulo de detritos produzidos durante a frenagem sobre uma lamela de grafita e/ou poros (defeitos do material).

Semelhante ao observado quando a carga de frenagem foi de 600 N, as superfícies desgastadas dos ferros fundidos cinzentos, apresentam também, marcas de riscamento superficial e de deformação plástica, indicando que mecanismos de desgaste abrasivo e de fadiga estiveram atuando durante os processos de desgaste, como é mostrado na figura 4-48.

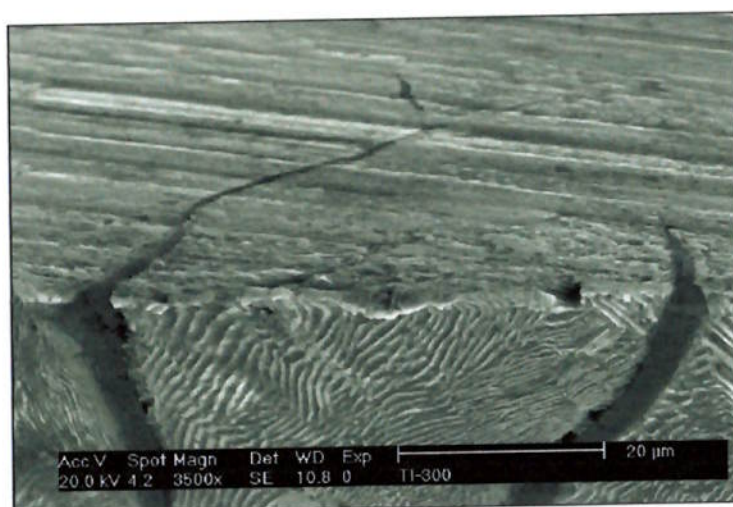
A superfície desgastada do ferro fundido vermicular se apresentou mais deformado plasticamente, principalmente, nas regiões onde havia ferrita, provocando maior deterioração superficial, como mostrado na figura 4-49. Pode-se verificar dessa forma, que a ferrita é a principal responsável pelo maior desgaste medido neste material.



Riscos superficiais próprios do desgaste abrasivo.
Detritos aderidos na superfície (nas cavidades das lamelas de grafita e em poros do material).

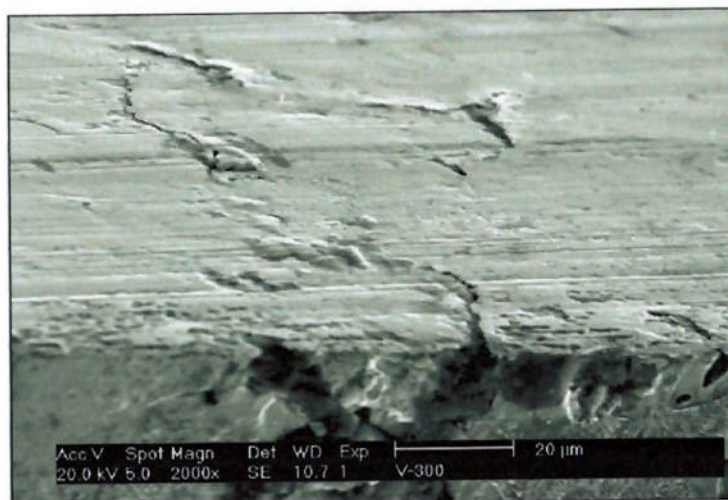


Deformação plástica nas bordas das lamelas de grafita que provocará a remoção de material por delaminação.

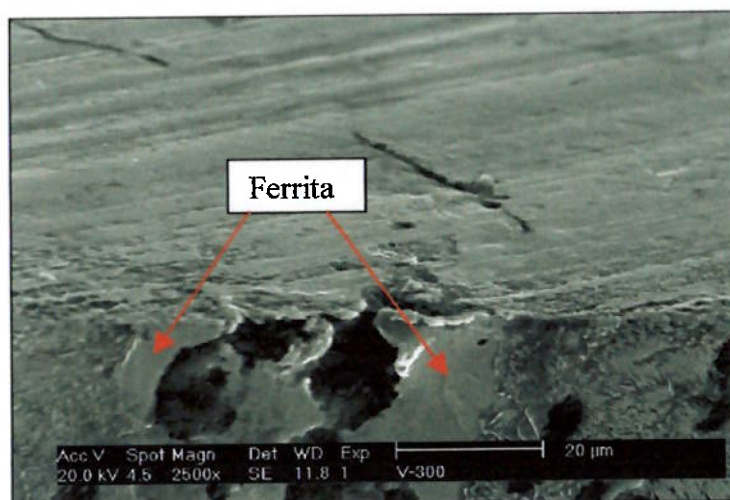


Lamelas de grafita comprimidas pela deformação plástica superficial.

Figura 4-48. MEV - Superfícies desgastadas dos ferros fundidos cinzentos.



Superfície desgastada do ferro fundido vermicular. Marcas de maior deterioração.



Grande destruição da superfície onde a grafita está rodeada por ferrita.

Figura 4-49. Superfícies desgastadas do ferro fundido vermicular.

Logo abaixo das superfícies de desgaste foi observado que, a espessura de material afetado pelo processo de desgaste é muito pequena e independe do tipo de ferro fundido ensaiado.

Na figura 4-50 mostra-se a fotografia da superfície transversal à superfície desgastada do ferro fundido vermicular, atacada com Nital 2%, onde se observa que, somente a perlita, que fica muito próxima da superfície de desgaste, sofre deformação plástica, chegando a ficar bastante deformada em uma camada de cerca de 2 μm de espessura.

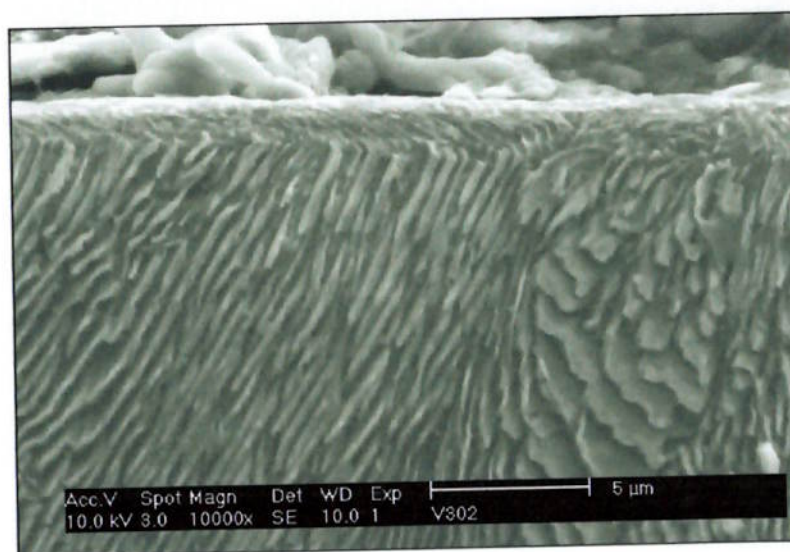


Figura 4-50. Seção transversal à superfície desgastada do ferro fundido vermicular. Matriz perlítica completamente destruída na borda superior, formando uma camada deformada muito pequena.

Pinos: As superfícies desgastadas dos pinos (pastilha de freio), não revelaram diferenças importantes na aparência dos pinos ensaiados com um ou outro material. Da mesma forma a como foi observado nos ensaios de desgaste realizados com a carga de 600 N, aqui também, foi notado que, o contacto entre os pinos e os discos, acontece somente em regiões bem localizadas, como é mostrado na figura 4-51, indicando que a área real de contacto é muito menor que a área aparente. Os platôs de contacto mostram sinais de como o processo de desgaste aconteceu nas pastilhas deixando riscos que indicam a atuação de mecanismos de desgaste abrasivo.

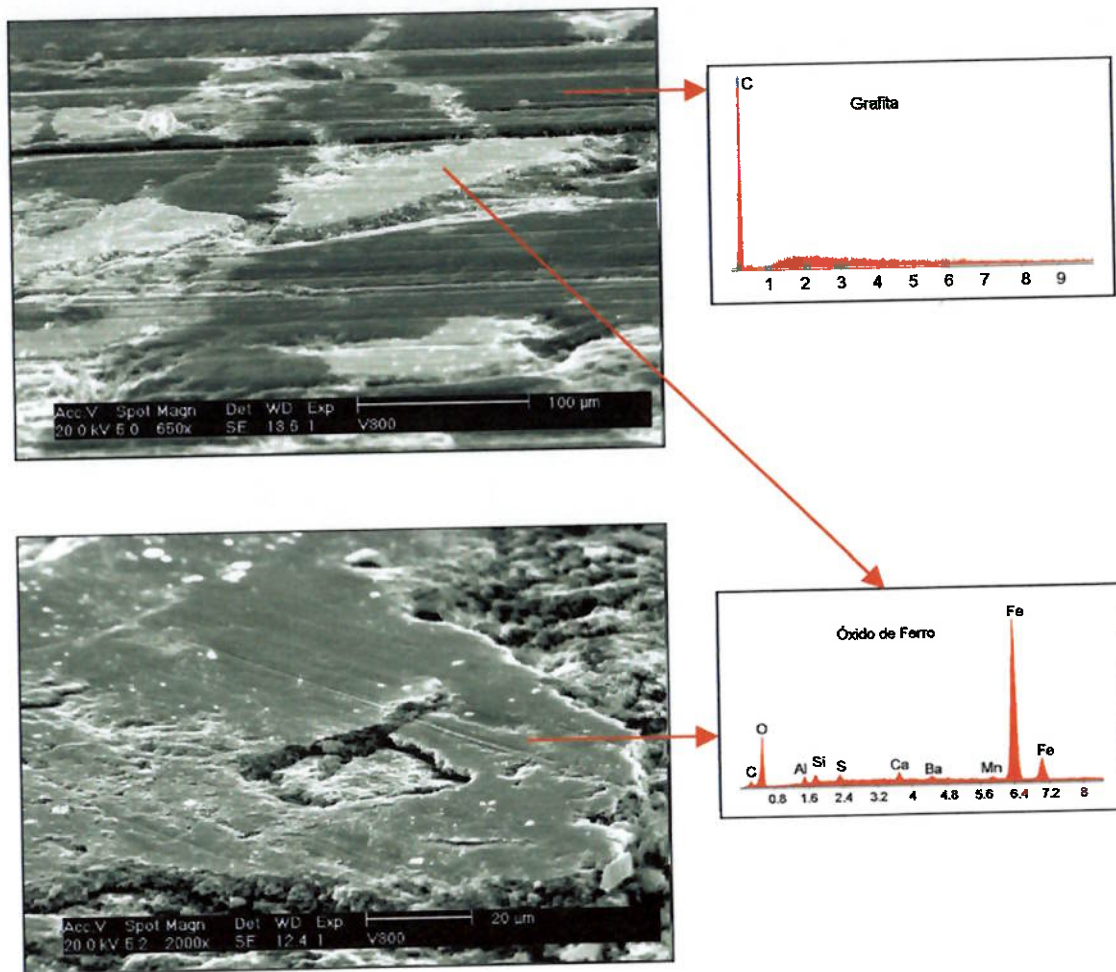


Figura 4-51. Superfícies desgastadas dos pinos. Carga: 300 N. Formação de platôs de contacto com sinais de desgaste abrasivo.

Os detritos de desgaste recolhidos depois dos ensaios eram constituídos basicamente por carbono e por partículas de óxido de ferro, como se vê na figura 4-52.

Da mesma forma que o observado nos ensaios realizados com a carga de 600 N, não foi possível determinar se as partículas de óxido eram provenientes dos pinos ou dos discos. Ou se estas partículas eram, partículas de ferro removidas dos discos e que depois dos ensaios se oxidaram.

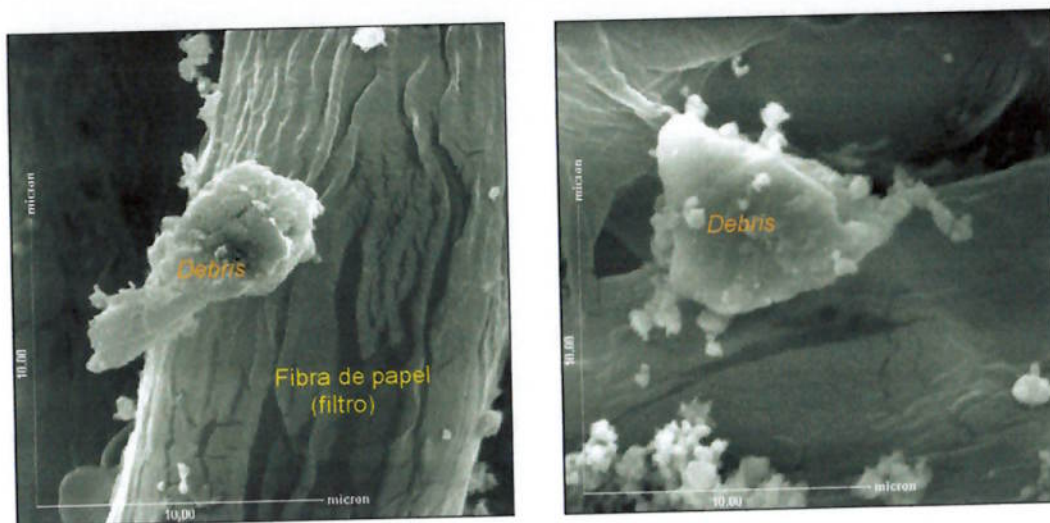


Figura 4-52. Detritos coletados depois dos ensaios de desgaste.

Partículas de óxido de ferro rodeadas de partículas muito pequenas de carbono, coladas às fibras de papel filtro, usado para a coleta de detritos.

4.4.2.4. Ensaio com carga de 250 N e 200N.

Como foi visto na figura 4-41, a força de atrito desenvolvida durante os ensaios realizados com ferro fundido vermicular foi muito superior do que a observada quando os ensaios foram feitos com os ferros fundidos cinzentos; isto levou a pensar de que seriam necessárias forças de frenagem menores para se ter respostas de atrito iguais à dos ferros fundidos cinzentos. Por isso foram realizados ensaios de desgaste usando somente o ferro fundido vermicular e cargas de frenagem de 200 N e 250 N, cujos resultados são mostrados nas figuras 4-53 e 4-54.

Força de Atrito e Temperatura

Na tabela 4-16 são mostrados os valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito medidos nos ensaios de desgaste realizados com carga de frenagem de 200 e 250 N. Estes resultados mostram que com a carga de 250N, se consegue obter uma força de atrito semelhante àquela que tinha sido alcançada pelos ferros fundidos cinzentos, quando eles foram ensaiados com carga de 300N. Além disso, notou-se que os valores de temperatura também, se igualaram.

Devido ao fato de que o coeficiente de atrito é calculado, relacionando diretamente a carga aplicada com a força de atrito, não é de estranhar que os valores obtidos nos ensaios usando a carga de 250 N, sejam um pouco maiores que aqueles obtidos pelos ferros fundidos cinzentos ensaiados com a carga de 300 N.

Com o intuito de analisar melhor a influência da carga de frenagem no desempenho deste ferro fundido, foram realizados ensaios de desgaste utilizando-se 200 N de carga de frenagem, cujos resultados também, são apresentados na tabela 4-16. Nesta tabela observa-se que, a diminuição da carga de frenagem provoca a diminuição da temperatura, da força de atrito e do coeficiente de atrito.

Tabela 4-16. Valores de força de atrito e temperatura medidos no ferro fundido vermicular e cargas de 250N e 200N.

	300 N		250 N	200 N
	Cinzento	Vermic	Vermic	Vermic
Temperatura [°C]	90 ± 5	115 ± 5	93 ± 5	90 ± 5
Atrito [N]	110 ± 5	165 ± 5	110 ± 5	90 ± 5
Coef. Atrito	0,36 ± 0,02	0,55 ± 0,02	0,44 ± 0,02	0,45 ± 0,02

Este grupo de resultados confirma, em um primeiro momento, a hipótese de que o ferro fundido vermicular poderia ter um desempenho semelhante ao apresentado pelos ferros fundidos cinzentos, sendo entretanto, necessário aplicar cargas menores de frenagem, o que poderia levar, também, a menores perdas de massa.

Perda de massa

Os resultados de força de atrito e temperatura obtidos com as cargas de 250 N e 200 N levaram a pensar que seria possível obter perdas de massa menores que aquelas obtidas quando a carga foi de 300 N. Entretanto, como mostrado na tabela 4-17 e na figura 4-53, isso não ocorreu. Ao contrario do esperado, o valor médio da perda de massa aumentou com a diminuição da carga na faixa de 300 a 200 N, e foi particularmente maior para o ferro fundido vermicular ensaiado a 250 N que para os ferros fundidos cinzentos ensaiados a 300 N, ambas com 150 N de força de atrito.

Estes resultados mostram que não há uma relação direta entre a carga de frenagem aplicada e a perda de massa medida, o que indica que, do ponto de vista do desgaste, a diminuição da carga de frenagem não leva a uma diminuição do desgaste.

Tabela 4-17. Perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular ensaiados com cargas de 300, 250 e 200 N.

Tempo de ensaio [h]	Perda de massa [g] – Disco		
	7	14	21
300 N	$0,07 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,04$
250 N	$0,09 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$
200 N	$0,13 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,01$

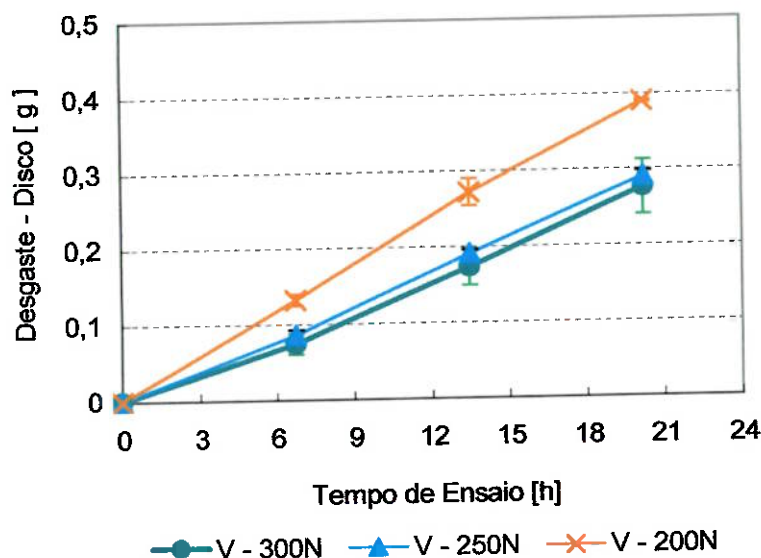


Figura 4-53. Medidas de perda de massa comparativas dos discos de ferro fundido vermicular, ensaiados com cargas de 300, 250 e 200 N, em função do tempo de ensaio.

Relacionando estes resultados com os obtidos nos ensaios com cargas de frenagem maiores (600 N e 500 N), nota-se que, as condições de ensaio geram mudanças tão marcantes no desgaste deste material que, seria razoável considerar que a carga de 300 N corresponderia a uma transição no regime de desgaste. Observou-se

que a perda de massa diminui quando se reduz a carga de frenagem de 600 N para 500 N (0,65 g e 0,55 g respectivamente), e diminuir ainda mais quando a carga é reduzida até 300 N (0,28 g). A partir deste ponto, entretanto, diminuições da carga de frenagem causam perdas de massa maiores como mostrado na tabela 4-17, onde se observa que com cargas de 250 N e 200 N foram medidas perdas de massa de 0,29 g e 0,39 g, respectivamente.

Com relação ao desgaste dos pinos verificou-se que, a diminuição da carga de frenagem de 300 N para 250 N e para 200 N, não influi na perda de massa destes elementos, como se vê na tabela 4-18 e na figura 4-54.

Tabela 4-18. Perda de massa dos pinos ensaiados contra os discos de ferro fundido vermicular utilizando-se cargas de 300, 250 e 200 N.

Tempo de ensaio [h]	Perda de massa [g] – Pino		
	7	14	21
300 N	0,044 ± 0,011	0,077 ± 0,01	0,125 ± 0,015
250 N	0,038 ± 0,005	0,076 ± 0,004	0,115 ± 0,012
200 N	0,041 ± 0,007	0,077 ± 0,009	0,118 ± 0,002

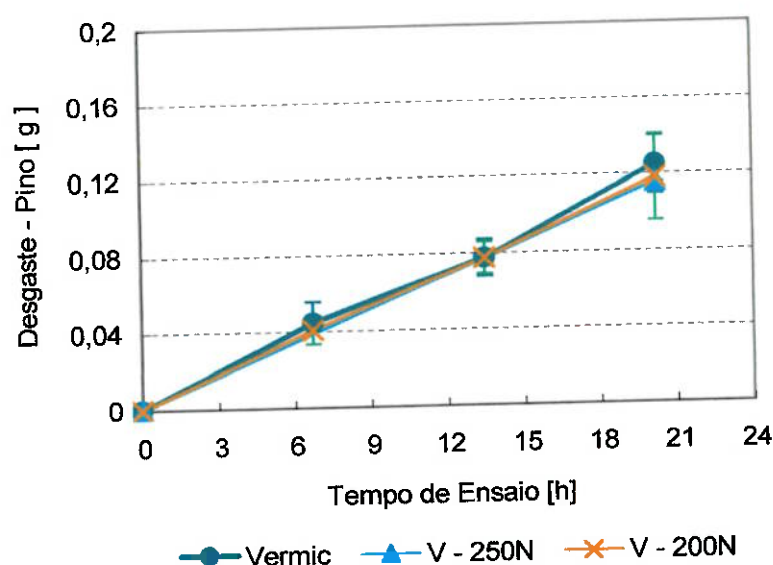


Figura 4-54. Medidas de perda de massa comparativas dos discos obtido em ensaios de desgaste realizados com carga de 300, 250 e 200 N, em função do tempo de ensaio.

4.4.3. Carga cíclica aplicada: 100 N (Pressão: 0.7 MPa)

4.4.3.1. Perda de massa

O desgaste acumulado dos discos, após os ensaios realizados com a carga cíclica de 100 N, determinado através de medidas de perda de massa, são mostrados na tabela 4-19 e na figura 4-55.

Tabela 4-19. Perda de massa acumulada dos discos. Carga: 100N.

Disco - Perda de massa [g] – 100 N			
Tempo de ensaio [h]	7	14	21
Fe250	0,03 ± 0,01	0,10 ± 0,03	0,20 ± 0,02
FeAC	0,06 ± 0,02	0,14 ± 0,01	0,22 ± 0,02
FeTi	0,04 ± 0,00	0,11 ± 0,00	0,18 ± 0,00
Vermic	0,12 ± 0,02	0,27 ± 0,03	0,40 ± 0,05

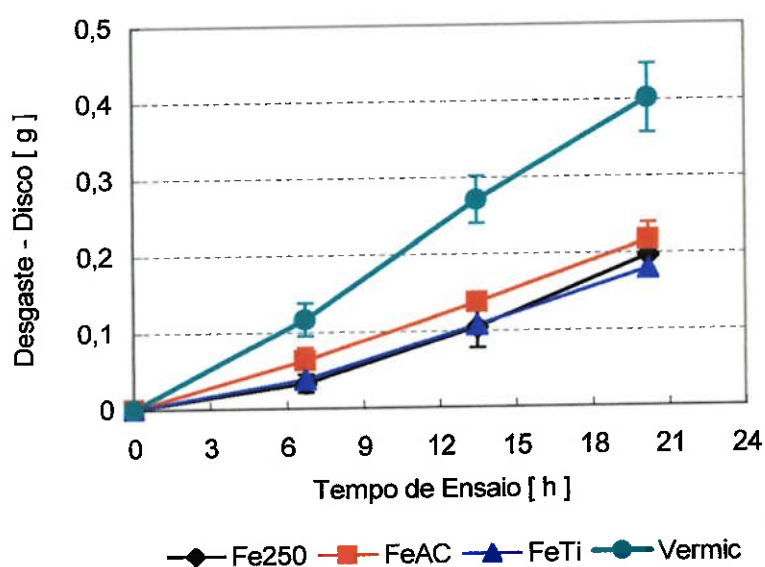


Figura 4-55 Desgaste medido nos discos de ferro fundido. Carga: 100 N

Os resultados mostram que, a resistência ao desgaste apresentada pelos ferros fundidos cinzentos é praticamente igual para todos eles e quase duas vezes superior que do ferro fundido vermicular. Os ferros fundidos cinzentos perderam aproximadamente 0,2 g depois de 21 h de ensaio, o vermicular perdeu 0,4 g.

A tabela 4-19 mostra também que, para todos os materiais, depois das primeiras 7 horas de ensaio a taxa de perda de massa é constante, caracterizando um regime de desgaste estacionário. A taxa de desgaste em tempos menores que 7 horas, foi menor, influenciada pelo “running-in”.

A perda de massa dos discos de Fe250, até as primeiras 7 horas de ensaio, foi de 0,03 g, e logo depois, de 0,07 g. Situações semelhantes aconteceram com os outros três ferros fundidos estudados, onde as perdas de massa antes da sétima hora foram 0,06, 0,04 e 0,12 g e para os outros dois trechos 0,08, 0,07 e 0,15 g para FeAC, FeTi e vermicular, respectivamente.

A figura 4-55 mostra claramente dois níveis de desgaste bem definidos: o primeiro - formado pelos ferros fundidos cinzentos com desgaste semelhante entre si, e o segundo – correspondente ao ferro fundido vermicular. Em geral, o desgaste dos ferros fundidos cinzentos, nestas condições de ensaio, não foi afetado por pequenas diferenças microestruturais ou de teor de elementos de liga destes ferros.

Da mesma forma que o observado nos casos anteriores (cargas de 600 e 300 N), o ferro fundido vermicular foi o que mais se desgastou e o FeTi, cujo desgaste foi igual ao dos outros ferros fundidos cinzentos, comprovam que existe uma tendência de comportamento em desgaste destes dos materiais para este tipo de solicitações.

Chama a atenção o fato de que, com esta carga de frenagem (100 N) o desgaste acumulado pelos discos de ferro fundido vermicular (0,40 g) foi muito maior que aquele medido nos ensaios realizados utilizando-se a carga de 300 N (0,28 g); os resultados corroboram uma tendência de aumento do desgaste com a diminuição da carga de frenagem a partir de 300 N.

Portanto, este grupo de resultados indica que, entre 600 N e 100 N de carga de frenagem, existe uma mudança no regime de desgaste.

Uma comparação semelhante realizado com os ferros fundidos cinzentos mostra que, o desgaste dos discos ensaiados com a carga de 100 N (0,2 g) é

praticamente igual ao desgaste medido nos discos quando a carga foi de 300 N (0,25 g), indicando que a perda de massa dos discos deste material, não é afetada pela carga de frenagem nesse intervalo de cargas.

O desgaste sofrido pelos pinos, no decorrer dos ensaios realizados com a carga de 100 N, é mostrado na tabela 4-20 e na figura 4-56.

Tabela 4-20. Perda de massa acumulada dos pinos. Carga: 100N.

Pino - Perda de massa [g] – 100 N			
Tempo de ensaio [h]	7	14	21
Fe250	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,02	0,07 ± 0,01
FeAC	0,02 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,07 ± 0,01
FeTi	0,02 ± 0,00	0,05 ± 0,00	0,07 ± 0,00
Vermic	0,023 ± 0,00	0,054 ± 0,00	0,083 ± 0,002

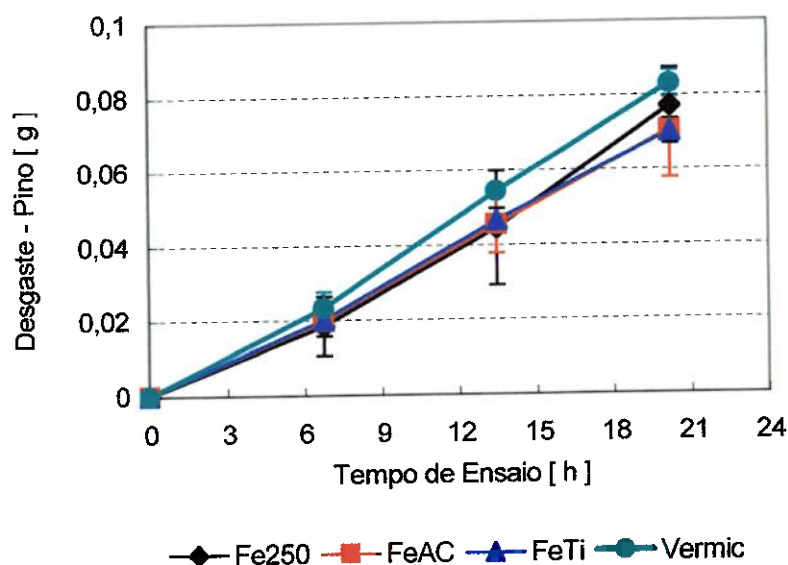


Figura 4-56. Desgaste medido nos pinos desgastados. Carga: 100 N

Os valores mostrados na tabela 4-20 e na figura 4-56 indicam que, considerando o desvio padrão dos resultados, o desgaste dos pinos foi igual para todos os casos, independentemente do ferro fundido usado como disco, alcançando-

se, ao final das 21 horas de ensaio uma média de aproximadamente 0,07 g. Observa-se também que, a perda de massa em cada trecho foi praticamente igual para todos os pinos, com valores próximos de 0,02 g; fato que indicaria também, que o running-in não afetou o comportamento em desgaste dos pinos.

Comparando os desgaste dos discos e dos pinos ensaiados com a carga de 100 N nota-se que, no caso dos ferros fundidos cinzentos, o desgaste dos discos é quase três vezes maior que os desgaste dos pinos, enquanto que os discos de ferro fundido vermicular se desgastaram aproximadamente sete vezes mais que seus respectivos pinos, indicando que as condições de contacto foram muito mais severas, nos ensaios realizados, com o ferro fundido vermicular do que com os cinzentos.

Verificou-se, também, que os valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito foram praticamente iguais entre os ferros fundidos cinzentos e maiores no vermicular, como mostrado a seguir.

4.4.3.2. Temperatura, Força de atrito e Coeficiente de atrito.

Na tabela 4-21 e nas figuras 4-57 a 4-59, encontram-se os valores e as curvas de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, obtidas durante os ensaios realizados com a carga de 100 N, em função do tempo de ensaio (trecho de 7 horas de ensaio) e do material do disco utilizado.

Verificou-se, novamente, que as temperaturas alcançadas pelos pinos quando ensaiados com os ferros fundidos cinzentos foram muito semelhantes entre si, chegando a valores próximos de 60 °C, como mostrado na figura 4-57. Entretanto, na mesma figura observa-se que os valores de temperatura no ferro fundido vermicular foram sempre maiores que 60 °C.

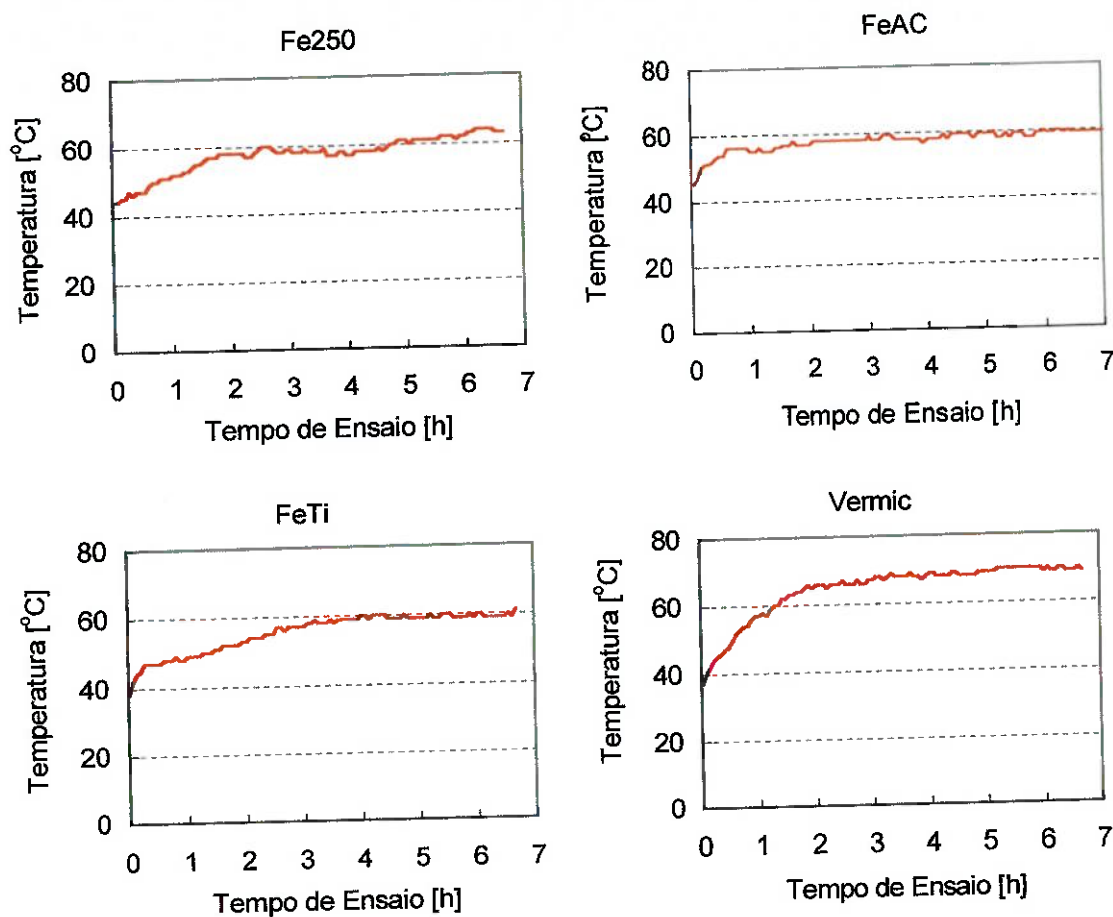


Figura 4-57. Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 100 N

Os valores força de atrito para carga de 100 N encontram-se na figura 4-58. Observa-se que, forças de atrito nos ferros fundidos cinzentos são praticamente iguais e próximas de 40 N, com exceção do FeAC que apresentou forças de atrito um pouco menores. Possivelmente, devido ao maior teor de grafita que este material possui. Nesta figura nota-se também, que as forças de atrito alcançadas pelo ferro fundido vermicular, ultrapassam 40 N, chegando a aproximadamente 60 N.

As maiores forças de atrito alcançadas pelo ferro fundido vermicular explicam as maiores temperaturas atingidas por estes materiais durante os ensaios.

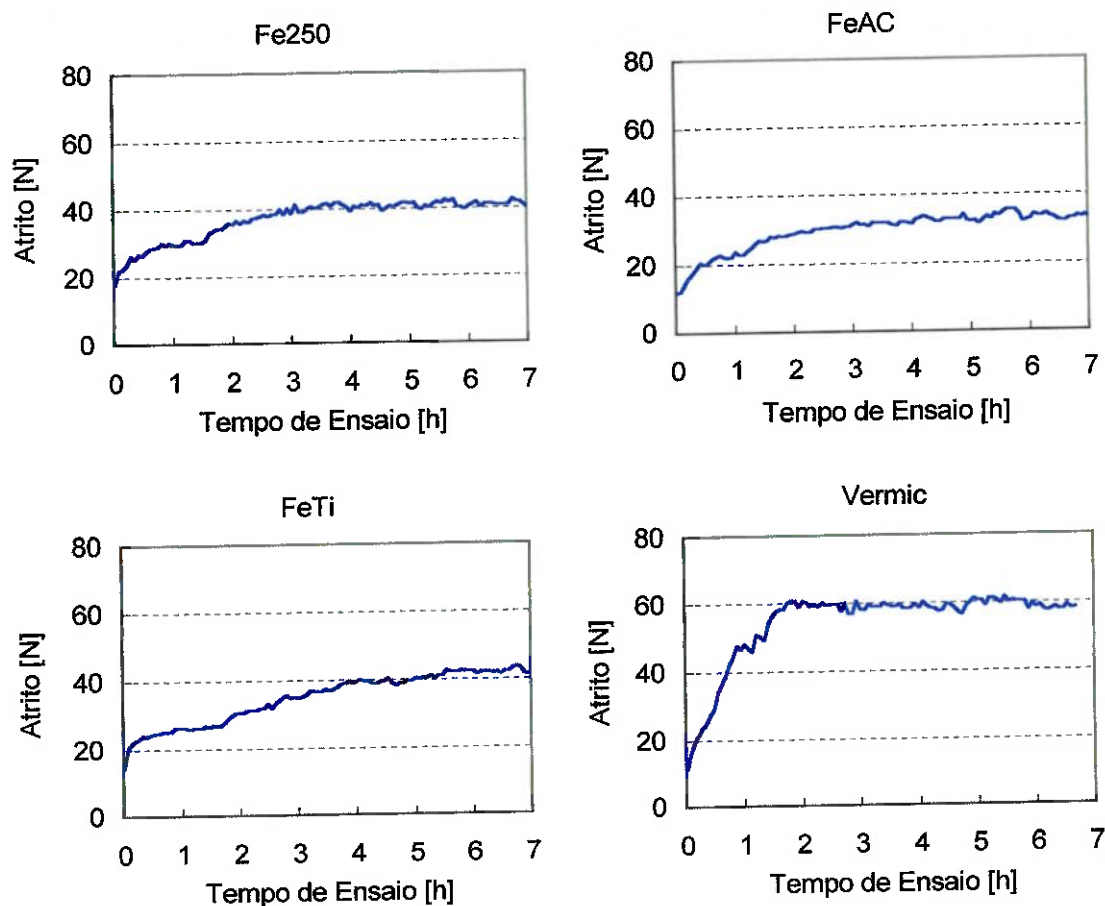


Figura 4-58. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 100 N

Comparando os valores de força de atrito obtidos, anteriormente, com a carga de 300 N e de 100 N, nota-se que a diminuição da força de atrito é proporcional à diminuição da carga de frenagem.

Não foram detectadas variações de força de atrito provocado pelo aumento da temperatura indicando, não ter ocorrido “fading” em nenhum dos ferros fundidos estudados.

A figura 4-59 mostra a variação dos coeficientes de atrito com o tempo de ensaio. Observa-se que os ferros fundidos cinzentos apresentam coeficientes de atrito muito semelhantes com valores próximos de 0,4, enquanto que no caso do ferro fundido vermicular esse valor é de aproximadamente 0,6. Os coeficientes de atrito dos ferros fundidos cinzentos ensaiados com 100 N são muito parecidos com

os obtidos com carga de 300 N. No caso do ferro fundido vermicular os valores de coeficiente de atrito são semelhantes aos obtidos com carga foi de 600 N.

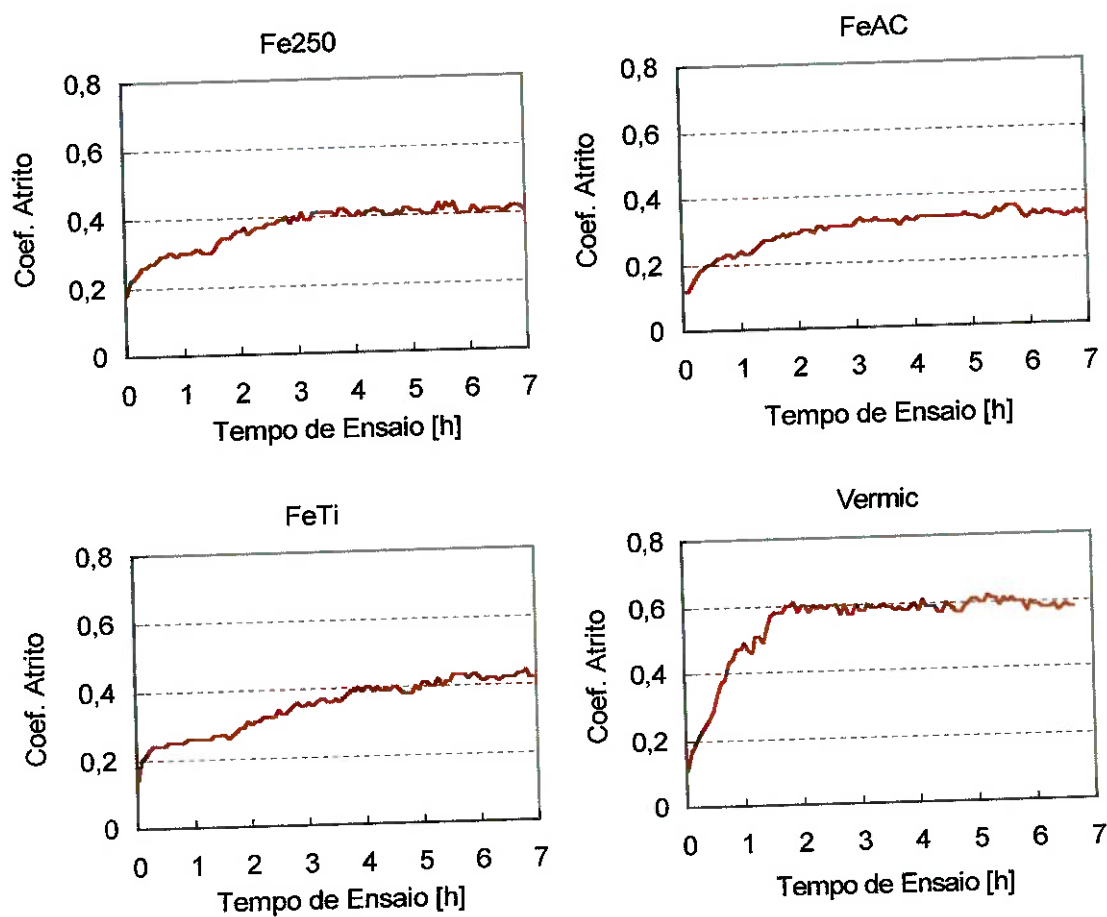


Figura 4-59. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 100 N

Tabela 4-21. Valores de temperatura, força e coeficiente de atrito. Carga: 100N.

Material	Temperatura [°C]	Força de Atrito [N]	Coeficiente de Atrito
Fe250	60 ± 3	39 ± 5	$0,39 \pm 0,04$
FeAC	58 ± 3	35 ± 5	$0,34 \pm 0,04$
FeTi	60 ± 3	39 ± 5	$0,39 \pm 0,04$
Vermicular	67 ± 3	60 ± 3	$0,59 \pm 0,04$

4.4.3.3. Análises das superfícies desgastadas.

Rugosidade:

Discos: As medidas de rugosidade superficial Ra e Sm dos discos ensaiados com 100 N de carga de frenagem são mostradas nas figura 4-60. Observa-se que, a partir das sete primeiras horas de ensaio, a rugosidade dos discos praticamente se estabiliza em valores de Ra e Sm, próximos de 0,6 μm e 60 μm , para os Fe250 e FeTi, respectivamente; e 0,8 μm e 120 μm para os FeAC e Vermicular, semelhantes as obtidas sob carga de 600 N.

Nota-se também que a rugosidade Ra dos discos de FeAC e Vermicular, são um pouco maiores que as dos Fe250 e FeTi, indicando que de alguma maneira, as superfícies destes materiais sofreram maior deterioração (maior deformação plástica, maior riscamento devido a mecanismos abrasivos, etc.), comprovando a maior perda de massa medida anteriormente, nestes dois ferros fundidos.

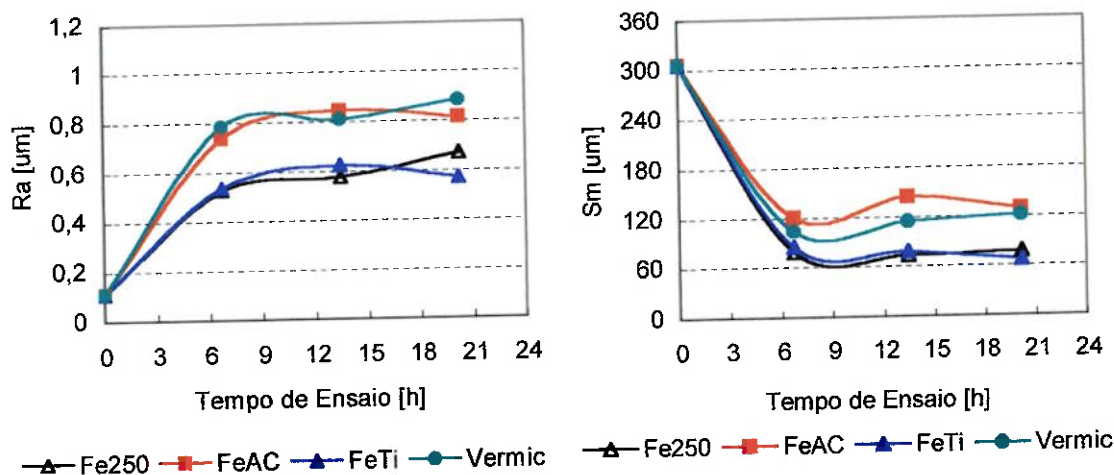


Figura 4-60. Valor médio da rugosidade dos discos desgastados. Carga: 100 N

Os valores de Ra e Sm medidos no ferro fundido vermicular a 100 N, se igualam aos medidos anteriormente, quando os ensaios foram realizados com a carga de 600 N. Com a carga alta, o aspecto superficial dos discos desgastados, mostrava evidências de deformação plástica e de desgaste abrasivo, entretanto, não seriam tão severos quanto no caso de carga de 100 N. Mais adiante serão mostradas

as superfícies desgastadas que permitiram identificar os mecanismos de desgaste predominantes, e ajudaram a explicar a semelhança dos resultados de rugosidade obtidos com as duas cargas de frenagem diferentes.

Na figura 4-61 são mostrados os valores de Ra e Sm dos pinos após os ensaios de desgaste com 100 N de carga.

Observa-se que os valores de Ra são muito dispersos no início, mas tendem a se estabilizar em aproximadamente 3 μm . Essas variações tão grandes provêm, principalmente, das heterogeneidades das pastilhas decorrentes do processo de fabricação e aos defeitos introduzidos nelas pelos mecanismos de desgaste atuantes durante a frenagem. A dispersão de valores Sm (150 μm) foi menor que a dispersão de resultados Ra.

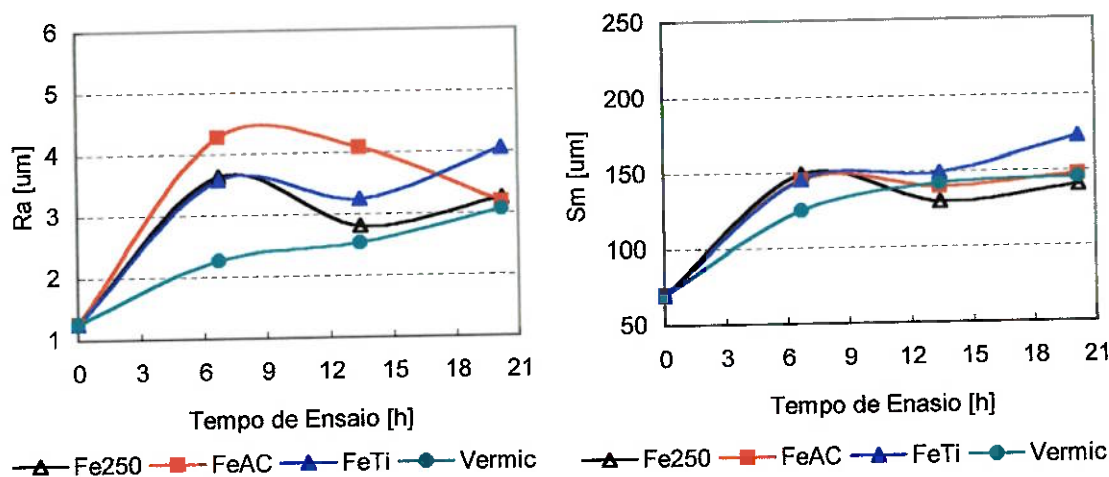


Figura 4-61. Valor médio da rugosidade dos pinos desgastados. Carga: 100 N

Microscopia óptica:

Os ensaios de desgaste realizados com a carga de 100 N deixaram nas superfícies dos discos marcas muito particulares, como é mostrado na figura 4-62. As lamelas de grafita são vistas nitidamente nas fotografias, e as superfícies estão riscadas, devido a mecanismos abrasivos de desgaste. Estes riscos apresentam-se uniformemente distribuídos sobre toda a superfície.

Por outro lado, as superfícies apresentam manchas escuras de óxidos, parecidas com nódulos de grafita, e que no decorrer dos ensaios vão aumentando ou diminuindo, indicando que mecanismos de desgaste oxidativo estiveram atuando nestas superfícies. Algumas dessas marcas arredondadas vistas nas fotografias, correspondem a poros no material, os quais por acaso eram mais numerosos nestes discos do que nos discos ensaiados com cargas maiores.

Nota-se, também, na figura 4-63 que há acúmulo de detritos nas lamelas de grafita, formando finas colônias ou camadas de detritos, semelhante ao observado com cargas maiores (300 e 600 N).

Análises posteriores, utilizando microscopia eletrônica de varredura e análises de EDS, permitiram identificar com precisão a natureza desses detritos, constituídos principalmente de óxidos de ferro.

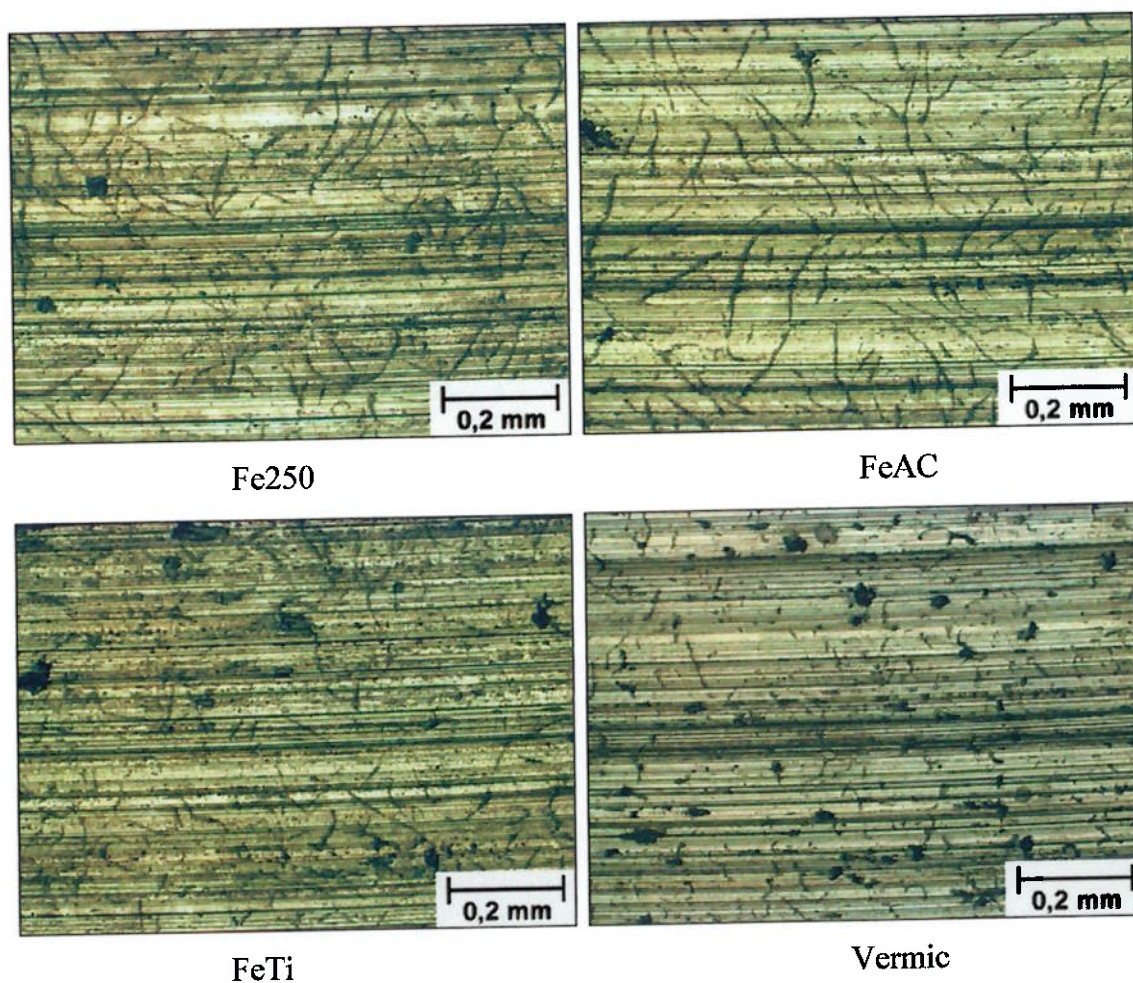


Figura 4-62. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 100 N

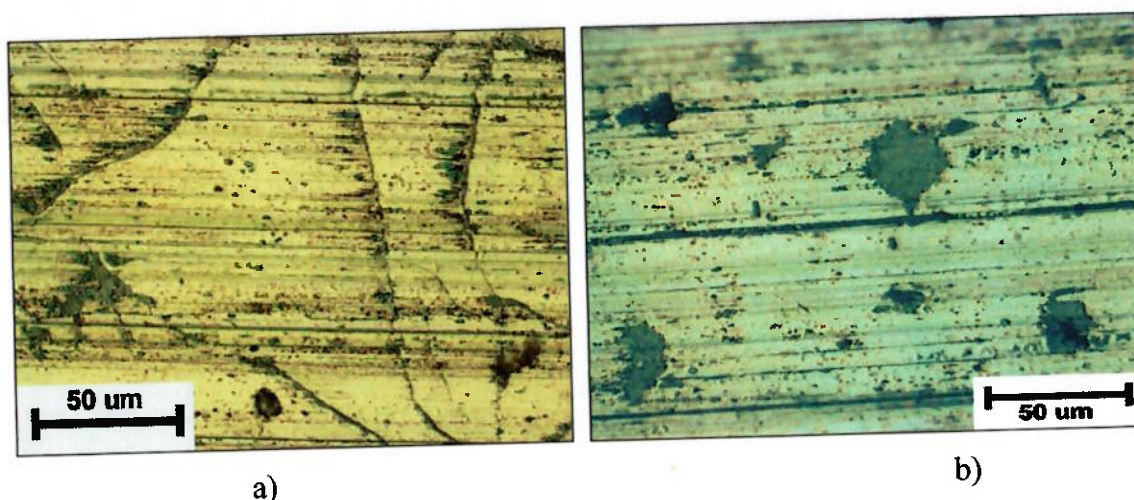


Figura 4-63. Superfícies desgastadas dos discos. Carga: 100 N. a) As lamelas de grafita atuam como barreiras e depósitos de detritos. b) Detritos arredondados aderidos à superfície desgastada formando colônias de óxidos.

Microscopia eletrônica de varredura:

Discos: As figuras 4-64 a 4-66 mostram uma seqüência de fotografias nas quais são mostrados exemplos dos aspectos mais característicos das superfícies desgastadas dos discos de ferro fundido cinzento ensaiados com a carga de 100 N. Inicialmente, na figura 4-64, observa-se uma grande quantidade de defeitos superficiais, tais como poros e aderências. Alguns destes defeitos aparecem parcial ou totalmente preenchidos pelos detritos de desgaste.

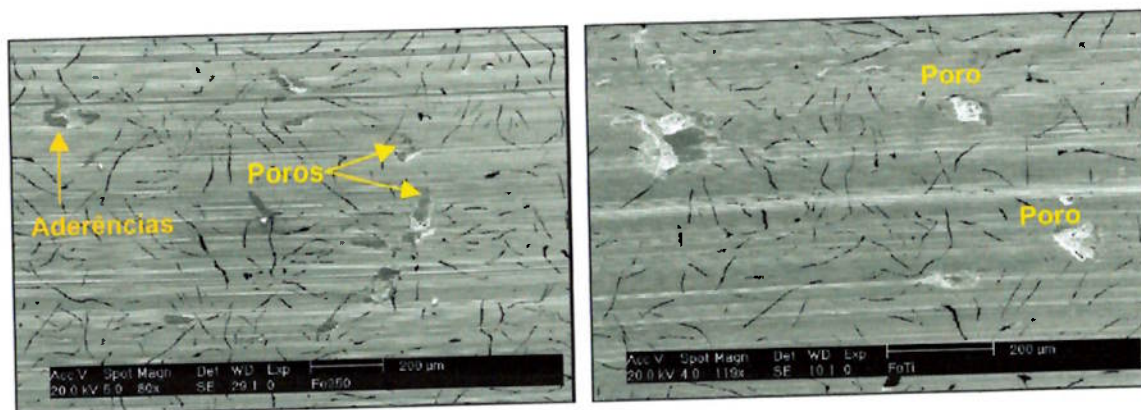


Figura 4-64. Ferros fundidos cinzentos: presença de defeitos superficiais (poros e aderências) nas superfícies desgastadas.

Observações mais detalhadas destas superfícies desgastadas mostraram também, uma grande quantidade de riscos, indicando a atuação de mecanismos de desgaste abrasivo.

Análises EDS realizadas nos detritos que preenchem os poros e as cavidades da grafita mostraram que esses detritos eram constituídos principalmente por óxido de ferro, como é mostrado na figura 4-65.

Nesta figura observa-se, também, que as bordas dos poros se encontram bem deteriorados, devido ao desgaste. Considerando que existe uma grande quantidade de defeitos superficiais (poros) que apresentam bordas de poros deterioradas pode-se supor que este mecanismo de desgaste é um dos mais importantes nessa condição de carregamento.

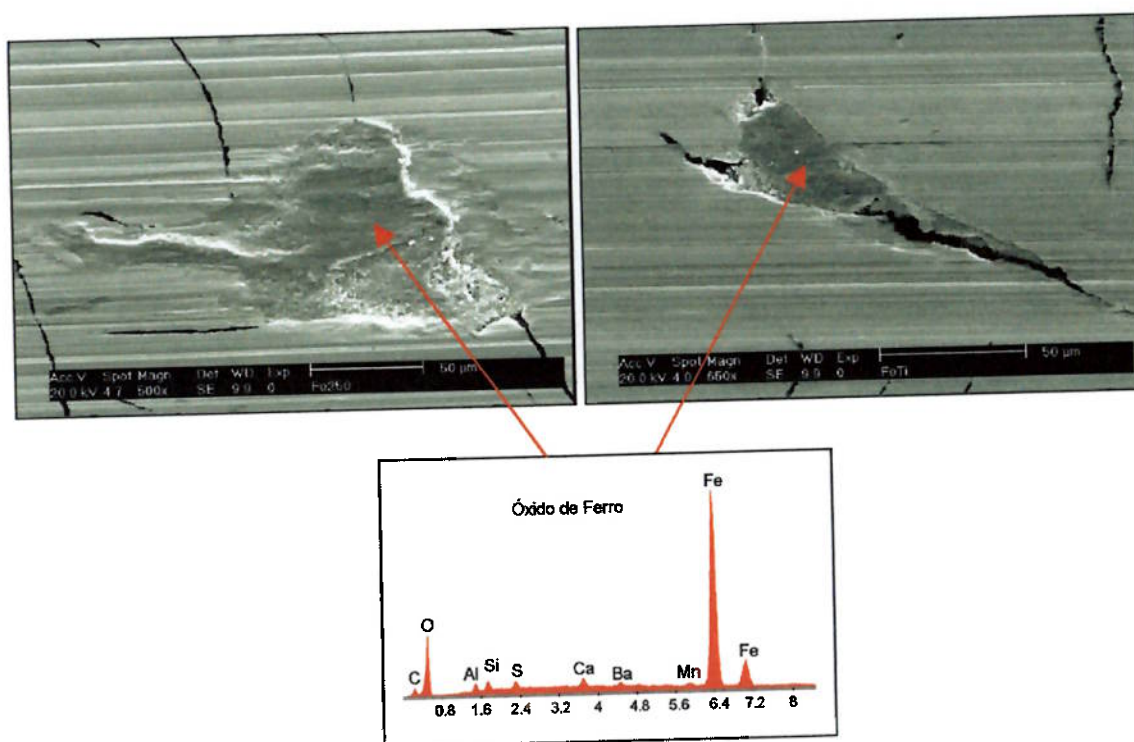


Figura 4-65. Ferros fundidos cinzentos: marcas de desgaste abrasivo. Os poros e as lamelas de grafita servem como depósito de detritos de desgaste.

Além de o desgaste estar concentrado nas bordas dos poros, foi notado também que, houve considerável deformação plástica nas bordas das lamelas de grafita, como se mostra na figura 4-66. Isto indica que, como nos casos anteriores (cargas de 600 e 300 N), mecanismos de desgaste devidos à micro-fadiga e delaminação tenham ocorrido.

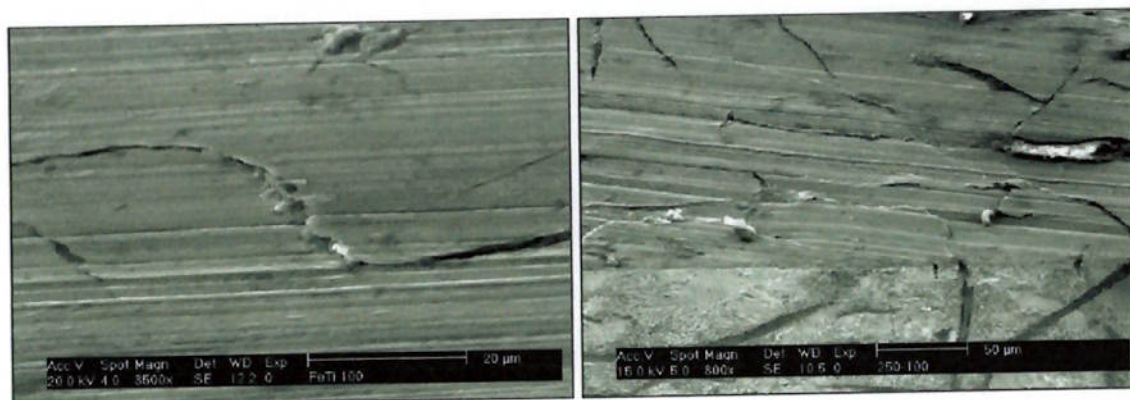


Figura 4-66. Ferros fundidos cinzentos: grande deformação plástica do material das bordas da grafita que provocará a remoção de debris por micro-fadiga e delaminação.

No caso das superfícies desgastadas do ferro fundido vermicular, foram observadas evidências muito semelhantes àsquelas vistas nos ferros fundidos cinzentos, ou seja, marcas de desgaste abrasivo e presença de poros, como se vê na figura 4-67.

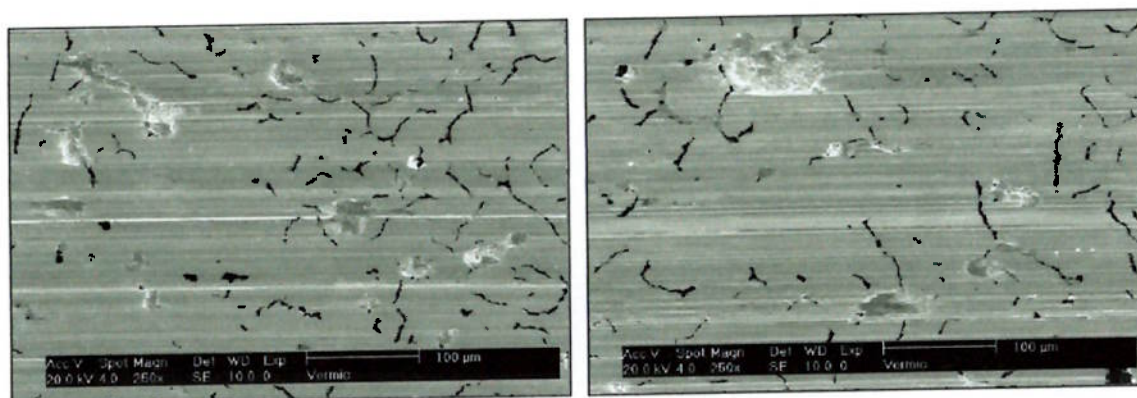


Figura 4-67. Ferro fundido vermicular: riscamento superficial próprio do desgaste abrasivo e presença de poros nas superfícies desgastadas.

As cavidades da grafita também foram preenchidas pelos detritos de desgaste (óxido de ferro), como mostrado na figura 4-68. Além disso, as áreas em volta da grafita são mais lisas que aquelas observadas nos ferros fundidos cinzentos, indicando que não aconteceu significativa deformação plástica, e que o mecanismo de perda de massa por micro-fadiga, parece não ser o mais importante.

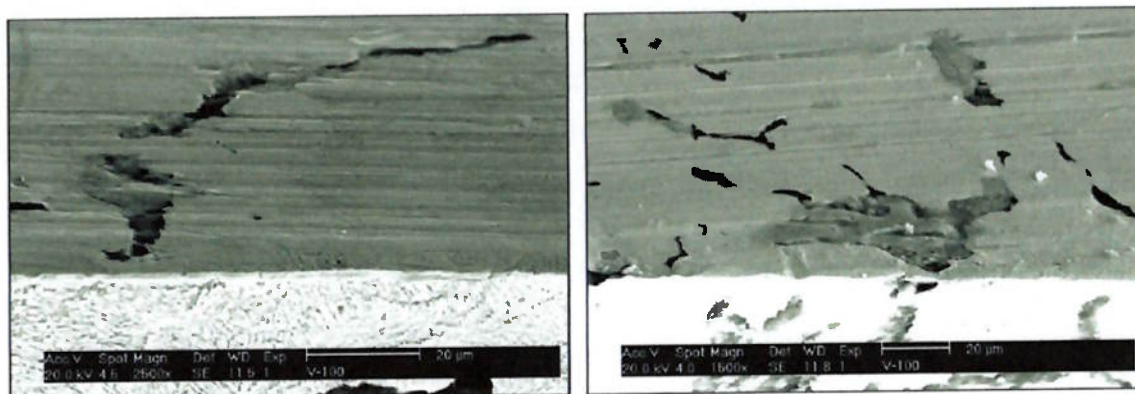


Figura 4-68. Ferro fundido vermicular: preenchimento das cavidades da grafita com detritos e matriz metálica não muito deformada plasticamente.

A fotografia da figura 4-69 mostra de maneira ampliada, a superfície desgastada de um disco de ferro fundido vermicular. Nela nota-se que a perda de massa ocorreu principalmente devido a mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo.

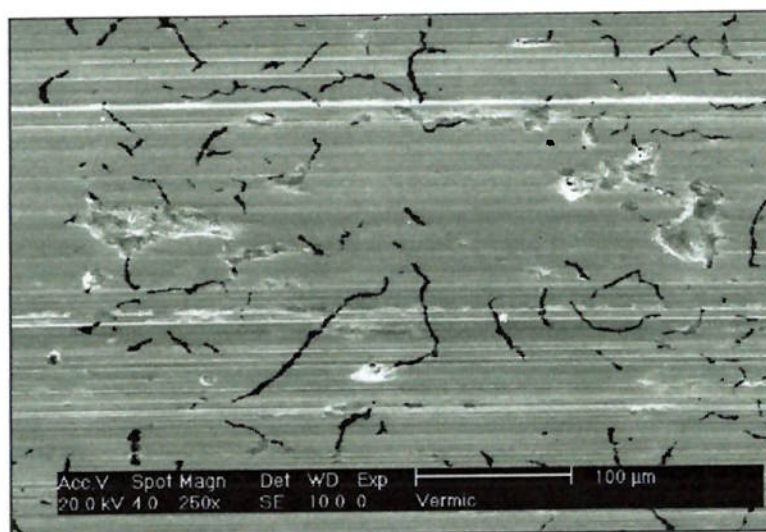


Figura 4-69. Ferro fundido vermicular: o processo de desgaste ocorre através de mecanismos de adesão e abrasão.

Análises realizadas na seção transversal à superfície de desgaste mostraram que, a camada de material que é afetada pelos esforços decorrentes do processo de desgaste é muito fina, como pode ser visto na figura 4-70.

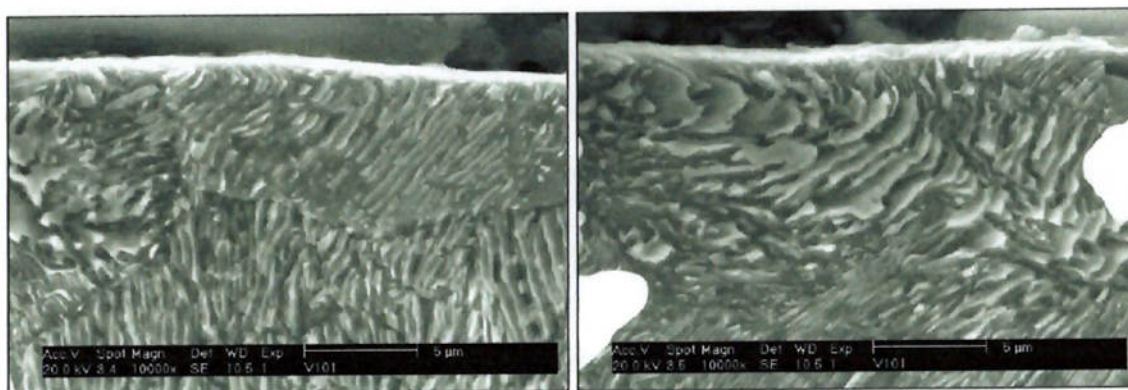


Figura 4-70. Ferro fundido vermicular: superfície transversal à superfície de desgaste. A espessura da camada sub-superficial afetada pela forças de frenagem é muito pequena.

Pinos: As aparências das superfícies desgastadas dos pinos foram muito semelhantes quando ensaiados com diferentes materiais. , independentemente do tipo de ferro fundido usado como disco de freio. O contacto entre os pinos e os discos, acontece somente nos platôs de contacto, onde se observam marcas que indicam desgaste abrasivo (presença de riscos superficiais), como se vê na figura 4-71.

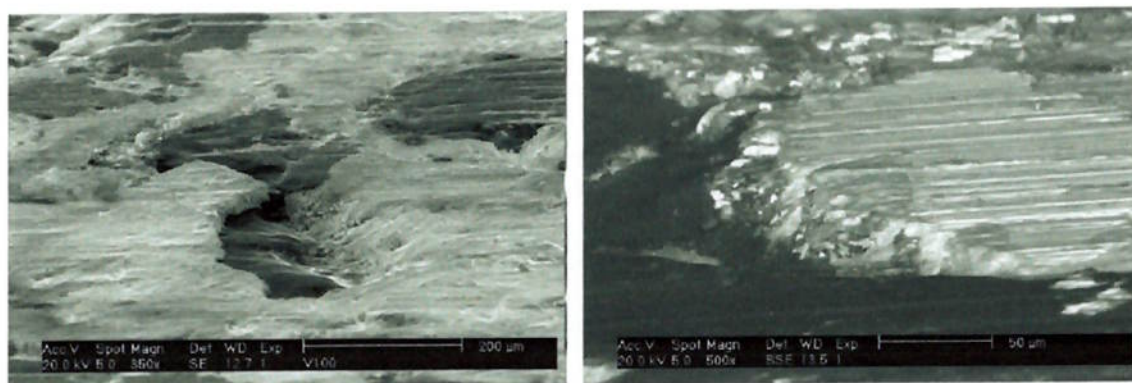


Figura 4-71. Superfície desgastada do pino. Presença de platôs de contacto e marcas de desgaste abrasivo.

Na figura 4-71 se observam áreas escuras (grafita) e áreas claras (mistura de ingrediente da pastilha) que podem estar tanto em alto como em baixo relevo, indicando que no momento em que foi interrompido o ensaio, estavam ou não em contacto com a superfície dos discos. Na dinâmica de criação e aniquilação de platôs de contacto, nem sempre as áreas em contacto durante todo o ensaio são as mesmas.

Um dos mecanismos de desgaste predominantes nos pinos foi a delaminação, como é mostrado na figura 4-72. Nesta figura são mostradas duas fotografias nas quais pode ser observada a maneira como um *debris* é formado. Inicialmente, ocorre trincamento sub-superficial, como mostra a figura 4-72 (a). No decorrer do ensaio a trinca se propaga para à superfície formando uma partícula em forma de lâmina. O desprendimento dessa lâmina ocorre devido ao trincamento da parte posterior, como mostra a figura 4-72 (b).

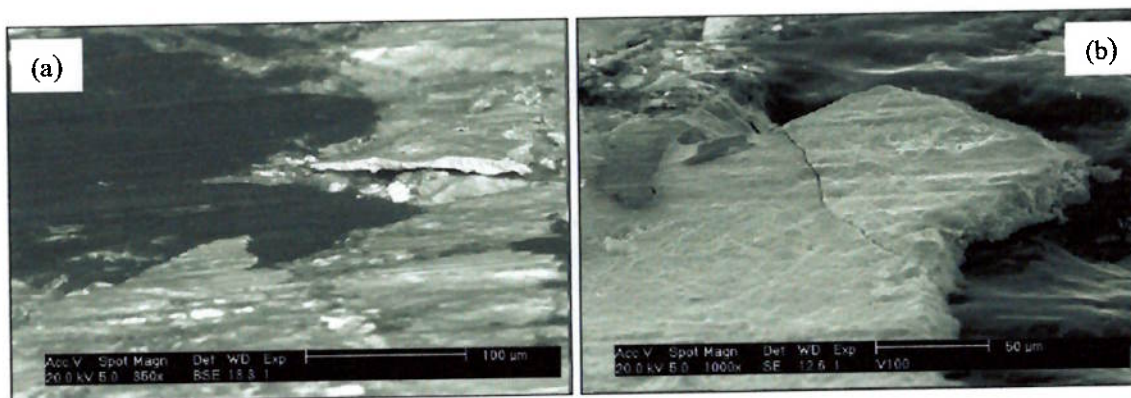


Figura 4-72. Superfície desgastada do pino. Formação de um *debris* por delaminação. a) trincamento sub-superficial, b) trincamento na parte posterior da lâmina que provoca o desprendimento dos *debris*.

Utilizando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura e análises EDS de raios X com elétrons retro-espalhados - BSE - (back scattering electrons), foi possível identificar as composições químicas dos platôs formados, sendo os resultados mostrados nas fotografias da figura 4-73.

A fotografia do lado esquerdo, feita com elétrons secundários, mostra três regiões bem definidas: escura, cinza escura e cinza clara. E a fotografia do lado direito, corresponde à mesma área obtida com elétrons retro-espalhados. Devido à

diferença de contraste pode se diferenciar a composição de cada uma das áreas antes observadas. As áreas escuras continuam sendo escuras e são formadas por grafita; confirmado por EDS; as áreas cinza escuras, passaram a ser áreas brilhantes e forma identificadas por EDS como fibras de ferro; as áreas cinza claras, agora cinza escuras correspondem a matriz da pastilha de freio, formada pelas substâncias utilizadas como enchimento e modificadores de atrito (resina, óxidos, barita, etc.).

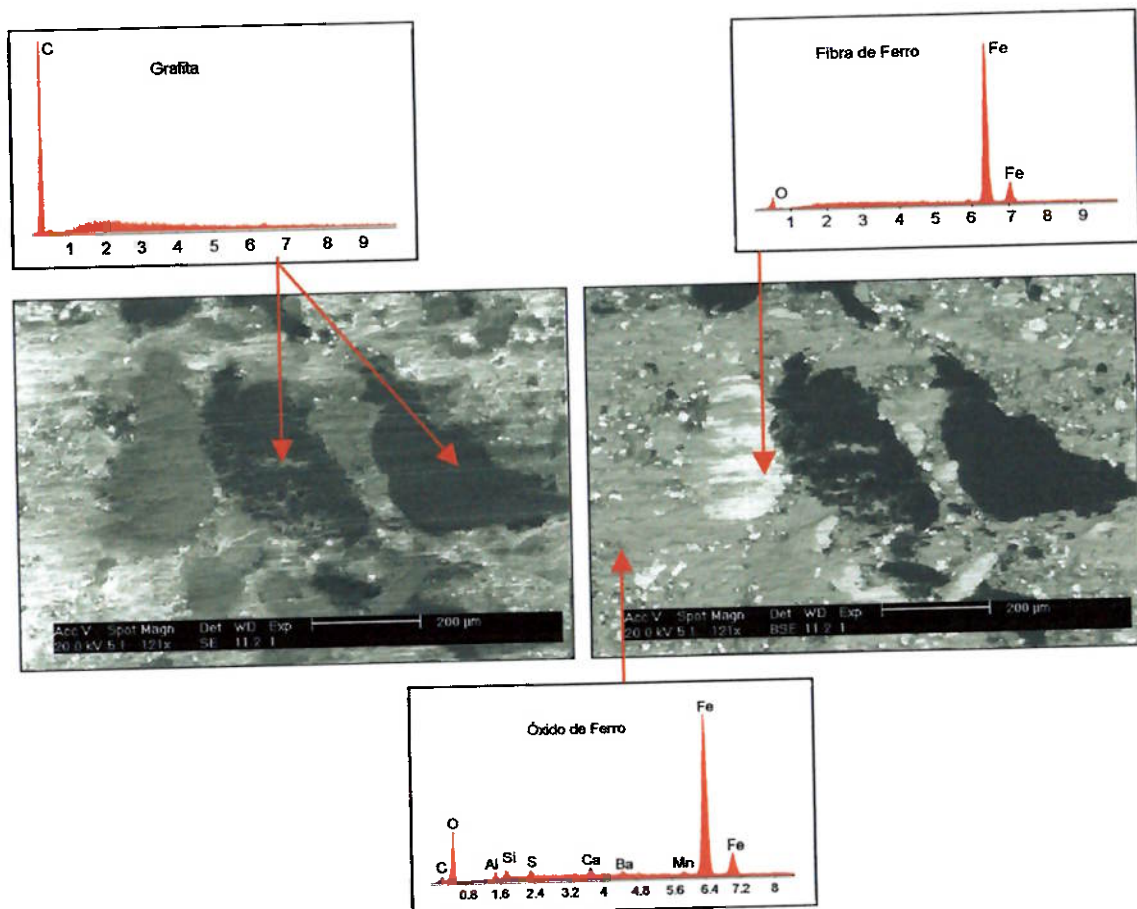


Figura 4-73. Superfície desgastada do pino. Composição química dos platôs de contacto.

Análises realizadas nos detritos de desgaste recolhidos em volta da máquina de ensaios, revelaram a presença de partículas de carbono vindas da grafita, seja dos discos ou dos pinos, sendo que as partículas de desgaste um pouco maiores eram de óxido de ferro, como se vê nas fotografias da figura 4-74.

Pela morfologia arredondada destes *debris* pensa-se que, durante o processo de frenagem, tenham rolado entre as duas superfícies em atrito, submetidos a altas cargas de compressão e temperaturas elevadas, até finalmente ser expulsas do sistema. O mecanismo pelo qual os *debris* são formados poderia ser semelhante àquele apresentado por Sasada (1979), que afirma a possibilidade de criação de *debris* através de elementos transferidos. Não foi possível determinar se estes *debris* provieram dos pinos ou dos discos.

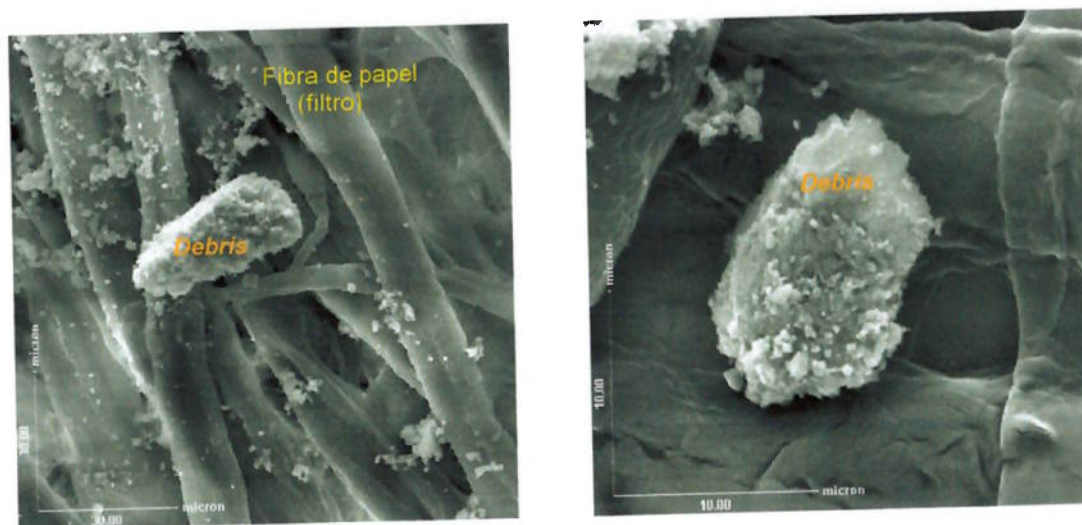


Figura 4-74. Detritos coletados após os ensaios de desgaste. Partículas de óxido de ferro, rodeadas de partículas muito pequenas de carbono.

4.4.3.4. Ensaio com carga de 60 N.

Na figura 4-58 mostrou-se que a força de atrito, desenvolvida durante os ensaios realizados com ferro fundido vermicular, foi superior que aquela medida nos ferros fundidos cinzentos. Com o intuito de verificar o comportamento do ferro fundido vermicular, quando submetido a forças de atrito semelhantes às desenvolvidas pelos ferros fundidos cinzentos, foram realizados ensaios de desgaste usando o ferro fundido vermicular com uma carga de frenagem de 60 N. Os resultados destes ensaios são mostrados a seguir:

Força de atrito e temperatura

Na tabela 4-22 são mostrados os valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito medidos durante os ensaios realizados com o ferro fundido vermicular e a carga de frenagem de 60 N.

Os resultados desta tabela mostram que, o ferro fundido vermicular ensaiado com a carga de frenagem de 60 N, apresenta valores de temperatura e força de atrito muito semelhantes àqueles obtidos com os ferros fundidos cinzentos ensaiados com 100 N. Isto permitiria pensar que, este material poderia ser usado com igual expectativa de desempenho de frenagem que o apresentado pelos ferros fundidos cinzentos, só que necessitando aplicar menores cargas de frenagem; levando dessa forma a menores perdas de massa.

Tabela 4-22. Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito medidos utilizando o ferro fundido vermicular e carga aplicada de 60N.

	100 N		60 N
	Cinzento	Vermic	Vermic
Temperatura [°C]	60 ± 3	67 ± 3	60 ± 3
Atrito [N]	39 ± 5	60 ± 10	35 ± 3
Coef. Atrito	0,39 ± 0,04	0,59 ± 0,04	0,58 ± 0,007

Perda de massa

Os valores de perda de massa nos discos e nos pinos, medidos durante os ensaios com carga de 60 N são mostrados na tabela 4-23 e na figura 4-75. Nesta figura verifica-se que o ferro fundido vermicular sofreu desgaste praticamente igual à metade do desgaste observado quando ensaiado com 100 N de carga de frenagem. Além disso, esse novo valor de perda de massa se iguala aos valores de perda de massa obtidos nos ferros fundidos cinzentos quando ensaiados com carga de 100 N. Na tabela observa-se que a perda de massa dos pinos também é muito semelhante àquelas medidas durante os ensaios usando ferro fundido cinzento e a carga de 100 N.

Portanto, os resultados de temperatura, força de atrito, coeficiente de atrito e perda de massa obtidos, nos ensaios realizados com o ferro fundido vermicular utilizando a carga de 60 N, comprovam que com este material são necessárias cargas de frenagem menores para se obter desempenhos de frenagem semelhantes àqueles obtidos com os ferros fundidos cinzentos, quando estes são usados com cargas de frenagem maiores.

Tabela 4-23. Perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular e dos pinos, ensaiados com carga de 60 N.

Tempo de ensaio [h]	Perda de massa [g] - 60 N		
	7	14	21
Disco	0,07 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,19 ± 0,01
Pino	0,02 ± 0,04	0,04 ± 0,00	0,06 ± 0,00

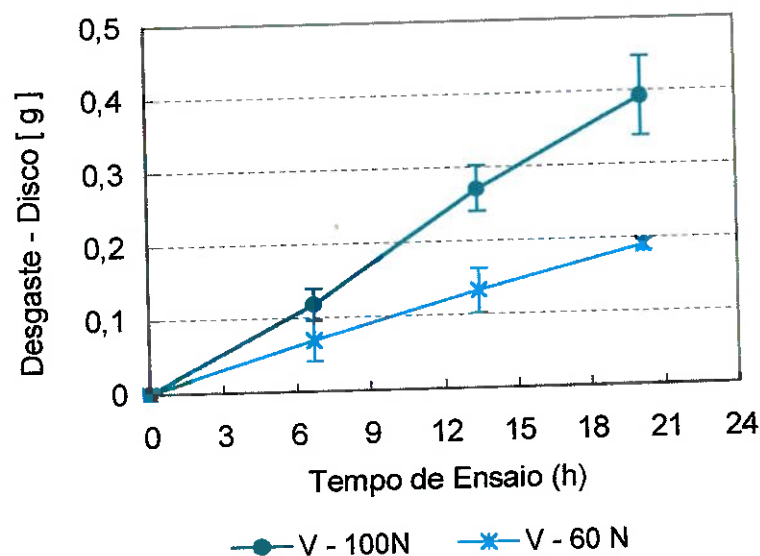


Figura 4-75. Perda de massa comparativa dos ensaios de desgaste realizados com os discos de ferro fundido vermicular e cargas de 100 N e 60 N.

4.4.4. FERRO FUNDIDO VERMICULAR TRATADO TERMICAMENTE

Carga cíclica aplicada: 600 N (Pressão: 4 MPa)

Com o intuito de estudar o efeito da microestrutura na resistência ao desgaste do ferro fundido vermicular e desta maneira, entender melhor os resultados anteriormente obtidos, foram realizados ensaios de desgaste, em discos de ferro fundido vermicular tratado termicamente (temperado em óleo e ferritizado).

A carga de frenagem utilizada foi de 600 N (4MPa) e o tempo de duração do ensaio foi de 21 horas sem intervalos, ou seja, foi feito um único trecho de 21 h e não os três trechos, como nos ensaios anteriores. Os resultados destas experiências são apresentados a seguir.

4.4.4.1. Perda de massa

O desgaste acumulado dos discos e dos pinos, no decorrer dos ensaios, foi determinado através de uma única medida de perda de massa, realizada ao final das 21 horas de ensaio, e cujos valores médios e desvios padrão são apresentados na tabela 4-24 e nas figuras 4-76 e 4-77. Nesta tabela e nas figuras são feitas também, comparações com os resultados obtidos dos ensaios com o ferro fundido vermicular de matriz perlítico-ferrítica.

Tabela 4-24. Perda de massa medida nos discos tratados termicamente. Carga: 600N. Tempo de ensaio 21 h.

Perda de massa [g] – 600 N		
Matriz	Disco	Pino
Martensítica	0,38 ± 0,05	0,5 ± 0,05
Ferrítica	0,67 ± 0,14	0,65 ± 0,15
Perlítico-Ferrítica	0,65 ± 0,1	0,70 ± 0,15

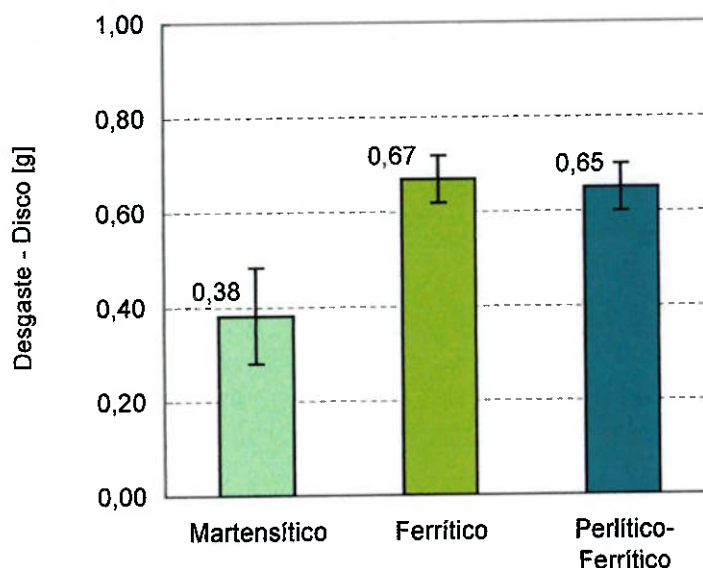


Figura 4-76. Desgaste medido nos discos de ferro fundido vermicular tratado termicamente. Carga: 600N.

As medidas de perda de massa dos discos de ferro fundido vermicular tratados termicamente, apresentados na tabela 4-24 e na figura 4-76, mostram que o vermicular com matriz martensítica é o que menos se desgastou, enquanto que o vermicular com matriz ferrítica (80% ferrita e 20% perlita) foi o que mais se desgastou.

Estes resultados são coerentes com a literatura, pois sabe-se que a um aumento de dureza do material, corresponde em geral, uma elevação da sua resistência ao desgaste. Hutchings (1992) afirma que outros fatores podem influenciar os resultados de desgaste nos metais, como por exemplo, presença de carbonetos nos aços ou de grafita nos ferros fundidos. Zum Gahr (1987) cita também em seu livro os trabalhos vários pesquisadores que estudaram a influência da dureza no desgaste por deslizamento. Este autor afirma que, o aumento da dureza provoca aumento da resistência ao desgaste, através da modificação do micro-mecanismo de desgaste atuante. Enquanto nos materiais com baixa dureza os micro-mecanismos preponderantes são de adesão e micro-corte, nos de alta dureza o desgaste oxidativo passa a ser mais importante. Como se sabe os processos de desgaste triboquímico são menos severos quanto à remoção de *debris*, comparados com os micro-mecanismos de adesão e corte.

As considerações sobre a influencia da dureza na resistência ao desgaste, citadas na literatura, se comprovam nos ensaios realizados neste trabalho. Pois, as características microestruturais dos diferentes discos tratados termicamente são muito semelhantes, principalmente, no que se refere ao teor de grafita e carbonetos. Portanto, o aumento da dureza, através do tratamento de têmpera, melhora a resistência ao desgaste deste material em quase duas vezes, comparado com este mesmo material de matriz ferrítica.

Já na figura 4-76 nota-se que, o desgaste alcançado pelos discos com matriz ferrítica é praticamente igual ao desgaste medido nos discos com matriz perlítico-ferrítica (75% perlita 14% ferrita) obtidos no estado bruto de fundição, indicando que, neste caso, a dureza não foi o fator mais importante no comportamento em desgaste do material. Possivelmente, a presença de ferrita nas microestruturas. Microconstituente este que possui baixa dureza e baixa resistência ao desgaste adesivo e ao micro-corte, mas que pode ser beneficiado pela formação de camadas de óxidos protetoras que reduziriam fortemente sua taxa de desgaste.

Na tabela 4-24 e na figura 4-77, encontram-se os valores de perda de massa acumulados pelos pinos em função do tipo de matriz metálica obtida após os tratamentos térmicos.

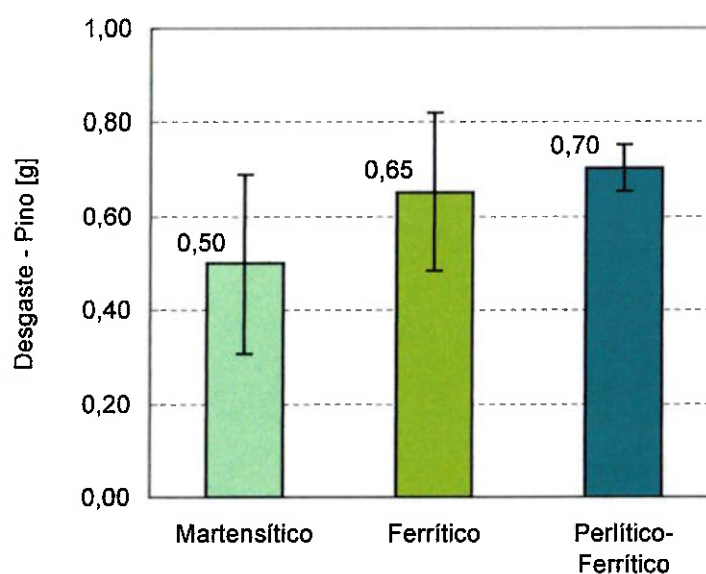


Figura 4-77. Desgaste medido nos pinos ensaiados contra os discos de ferro fundido vermicular tratado termicamente. Carga: 600 N

Os resultados apresentados na figura 4-77 mostram também, que os pinos que mais se desgastaram foram aqueles ensaiados com os discos de matriz martensítica, seguidos dos pinos ensaiados com discos de matriz ferrítica e de matriz perlítico-ferrítica. Entretanto, considerando o desvio padrão dos resultados, observa-se que o desgaste dos pinos foi praticamente igual entre todos eles, independentemente do tipo de disco utilizado durante o ensaio, alcançando um valor médio de aproximadamente 0,65g .

As diferenças nos valores de desgaste dos discos observadas nestes ensaios podem ser explicadas analisando os valores de temperatura, a força atrito e coeficiente de atrito, alcançados por cada material no decorrer dos ensaios.

4.4.4.2. Temperatura, Força de atrito e Coeficiente de atrito.

Durante os ensaios de desgaste pino sobre disco, utilizando-se ferros fundidos vermiculares tratados termicamente e carga cíclica 600 N foram medidos para cada material, os valores de temperatura e força de atrito, e calculados os coeficientes de atrito cujos resultados são apresentados na tabela 4-25 e nas figuras 4-78 a 4-80.

Os resultados mostrados na tabela 4-25 e na figura 4-78 indicam que, os discos com matriz ferrítica alcançaram, durante os ciclos de frenagem, temperaturas muito semelhantes às obtidas com os discos de matriz perlítico-ferrítica, as quais são aproximadamente 20% maiores que as temperaturas medidas nos discos com matriz martensítica.

Tabela 4-25. Valores de temperatura, força de atrito e coeficiente de atrito, obtidos durante os ensaios de desgaste com os discos tratados termicamente.

Matriz	Temperatura [°C]	Força de Atrito [N]	Coeficiente de Atrito
Martensítica	195 ± 5	300 ± 10	0,5 ± 0,01
Ferrítica	230 ± 10	355 ± 15	0,59 ± 0,03
Perlítico- Ferrítica	240 ± 10	360 ± 10	0,62 ± 0,02

As diferenças de temperatura observadas, na tabela 4-25, podem ser explicadas analisando as forças de atrito desenvolvidas por cada material. Nesta mesma tabela e na figura 4-79 são mostrados os valores medidos de força de atrito alcançado por cada material, durante os ensaios de desgaste.

Verifica-se que as forças de atrito nos discos com matriz ferrítica são iguais às forças de atrito alcançadas pelos discos de matriz perlítico-ferrítica, fato que sugeriria que estes dois discos poderiam alcançar temperaturas muito parecidas.

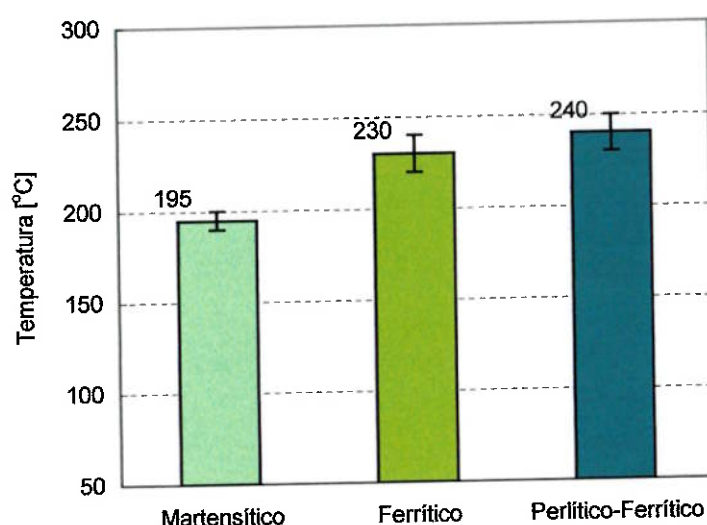


Figura 4-78. Temperaturas medidas nos pinos durante os ensaios de desgaste em função do tempo de ensaio e do material utilizado. Carga: 600 N

Pensava-se que os discos com matriz ferrítica poderiam alcançar forças de atrito muito superiores às alcançadas pelos outros discos, devido ao fato de conter 80% de ferrita na microestrutura, pois sabendo-se que a ferrita possui baixa resistência à adesão, esperar-se-ia que grandes áreas de ferrita pudessem formar sítios de junção de asperezas com a superfície dos pinos, favorecidos ainda pela alta carga de frenagem aplicada. Desta maneira, as forças de cisalhamento requeridas para quebrar estas junções e continuar o deslizamento das duas superfícies, deveriam ser maiores, o que provocaria um aumento da força de atrito, porém isso não ocorreu.

As elevadas perdas de massa, observadas no caso dos discos ferríticos e perlítico-ferríticos, podem ser explicadas pelas elevadas forças de atrito e pela baixa

dureza superficial, que facilitam a remoção de material através de mecanismos de adesão e fadiga.

No caso dos discos de matriz martensítica, as forças de atrito alcançadas são aproximadamente 15% menores que as obtidas com os outros dois discos, coincidindo com a menor perda de massa medida nestes discos. Além disso, a microestrutura martensítica possui uma resistência à adesão e à fadiga, muito superior às resistências das matrizes ferrítica e perlítica, fato que justificaria as menores perdas de massa medidas.

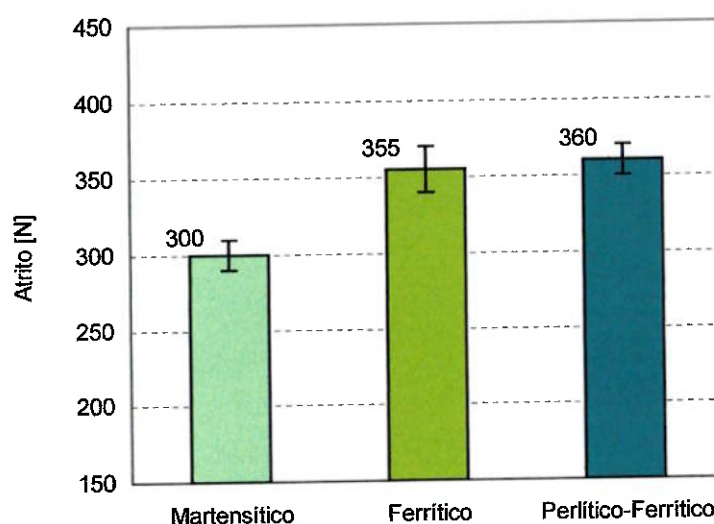


Figura 4-79. Forças de atrito medidas durante os ensaios de desgaste em função da microestrutura dos discos de ferro fundido vermicular.

Na figura 4-80, são mostrados os valores dos coeficientes de atrito calculados no decorrer dos ensaios. Verifica-se novamente que, os coeficientes de atrito são maiores nos discos com matrizes perlítico-ferrítica e ferrítica que nos de matriz martensítica.

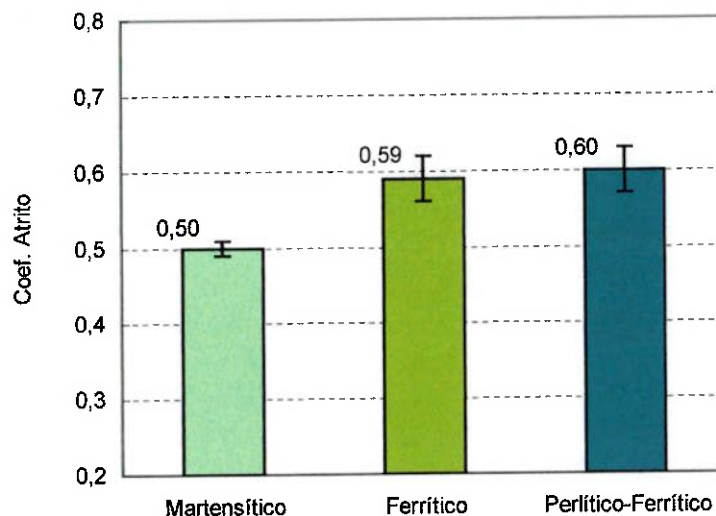


Figura 4-80. Coeficientes de atrito calculados nos ensaios de desgaste em função da microestrutura dos discos de ferro fundido vermicular.

4.2.4.3. Análises das superfícies desgastadas.

Rugosidade dos discos

Foram realizadas medidas de rugosidade nas superfícies desgastadas dos discos de ferro fundido vermicular tratado termicamente, sendo os resultados mostrados na figura 4-81, em comparação com as amostras perlítico-ferríticas (brutas de fundição), ensaiados com a carga de 600 N.

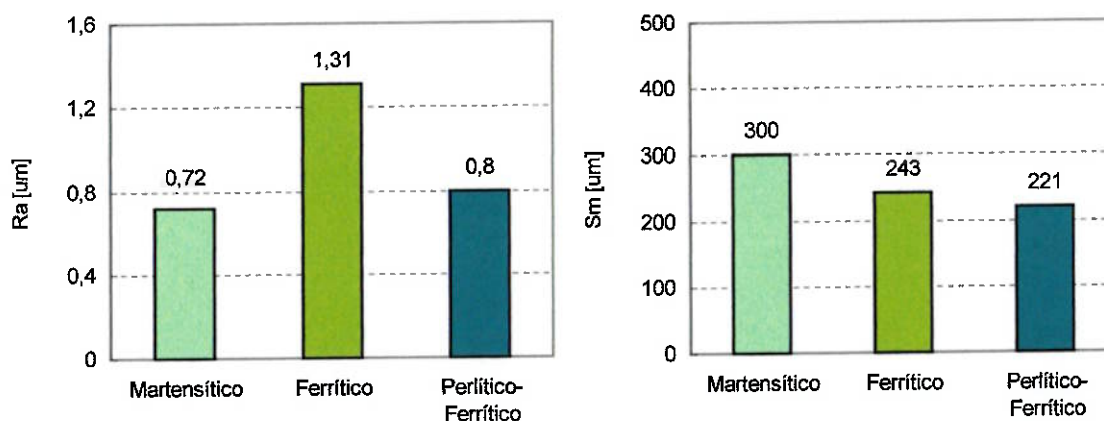


Figura 4-81. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies desgastadas dos discos tratados termicamente. Carga: 600 N

Nota-se que, o valor de Ra é muito maior nos discos ferríticos, e praticamente igual nos martensíticos e perlítico-ferríticos. Esses resultados mostram que as superfícies desgastadas dos discos ferríticos ficaram mais rugosas, preponderantemente devido, as deformações plásticas sofridas. Já nos discos com matriz martensítica, menos deformáveis, observa-se que a rugosidade Ra preponderantemente associada a riscos superficiais provocados por micro-mecanismos de corte e trincamento.

Verifica-se também, que Sm das amostras ferrítica e perlítico-ferrítica são muito parecidos e menores que o das amostras martensíticas, indicando que as superfícies dos discos deste material tendem a ficar menos rugosas com o decorrer dos ensaios.

Microscopia óptica:

Na figura 4-82 são apresentadas fotografias que, mostram o aspecto das superfícies desgastadas dos discos tratados termicamente. Nota-se que, nas duas fotografias, as lamelas de grafita não estão perfeitamente visíveis, pois no caso da amostra com matriz ferrítica, a deformação plástica e a oxidação superficial escondem a grafita e no caso da amostra martensítica, isso se deve principalmente à oxidação superficial.

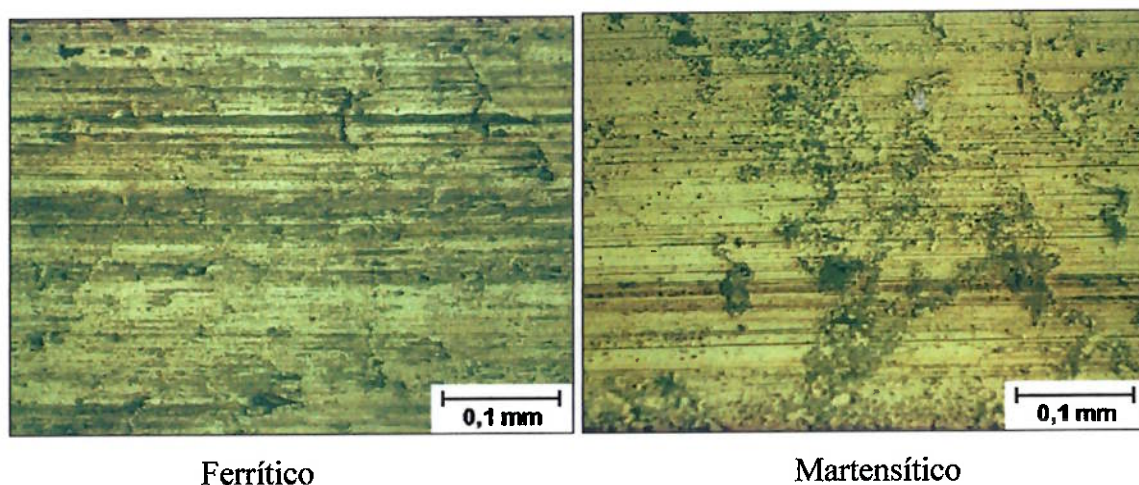


Figura 4-82. Superfícies desgastadas dos discos tratados termicamente. Carga:600N

Nas fotografias se observa também, a presença de sulcos, indicando que as superfícies sofreram desgaste abrasivo. A profundidade e a separação destes sulcos é diferente nas duas amostras, pois se verifica que as superfícies das amostras martensíticas parecem ser mais lisas que as ferríticas.

A aparência das superfícies desgastadas é muito heterogênea, observando-se faixas com diferentes tonalidades e larguras. Estas faixas são formadas por óxidos e pelo acúmulo de detritos de desgaste que ficam aderidos à superfície, e que dependendo da quantidade, deixam estas faixas mais escuras ou mais claras.

A quantidade de aderências nas superfícies é maior nas amostras ferríticas do que nas martensíticas, devido possivelmente, à maior quantidade de óxidos formados nas altas temperaturas alcançadas por este material.

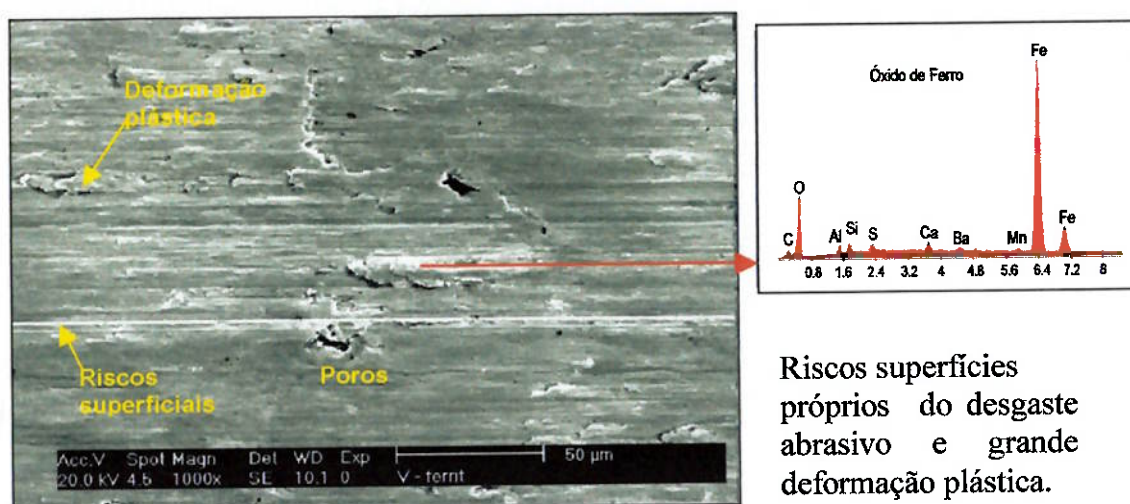
Microscopia eletrônica de varredura:

Matriz ferrítica: Na figura 4-83, são mostradas, fotografias que ilustram os aspectos mais relevantes das superfícies desgastadas dos discos com matriz ferrítica. Identificou-se a presença de riscos superficiais de diferentes tamanhos e profundidades, indicando a ação de mecanismos de desgaste abrasivo. Além desses riscos, foi observada, grande deformação plástica superficial, sendo esta, superior àquela observada nos discos com matriz perlítico-ferrítica (item 4.2.1).

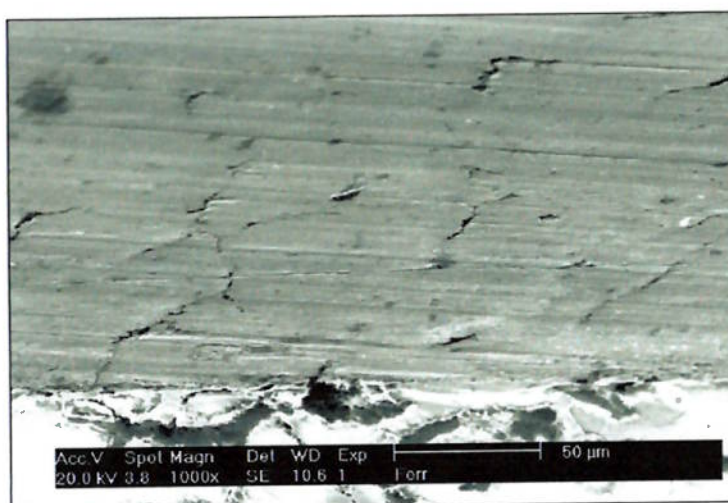
Foi verificado também, que os veios de grafita e os poros apresentavam-se parcial ou totalmente encobertas pelo material das bordas, que se deformou plasticamente, ou pelos detritos de desgaste que se acumularam nestas cavidades. Análises EDS identificaram a natureza destes detritos como sendo formados principalmente por óxidos de ferro.

Uma parte dos detritos que aparecem espalhados por toda a superfície desgastada, identificada como óxidos de ferro, se formou devido à reação química do disco com o oxigênio da atmosfera em alta temperatura. Uma outra parte desses detritos, pode ter sido formada devido à transferência de material da pastilha para a superfície do disco.

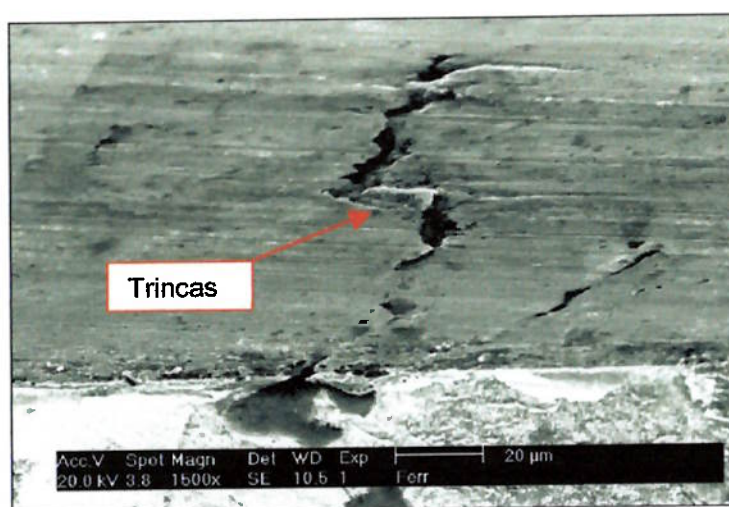
A aparência das superfícies desgastadas, dos discos com matriz ferrítica, foi muito semelhante à dos discos de vermicular com matriz perlítico-ferrítica, diferenciando-se unicamente no grau de deformação plástica sofrida.



Riscos superficiais próprios do desgaste abrasivo e grande deformação plástica.



Deformação plástica.
Veios de grafita comprimidos e cobertos.



Deformação plástica nas bordas da grafita que favorecem a remoção de material micro-fadiga.

Figura 4-83. Superfícies desgastadas dos discos de ferro fundido vermicular de matriz ferrítica. - MEV -

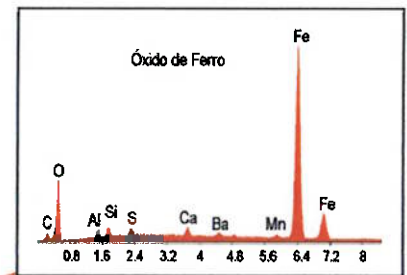
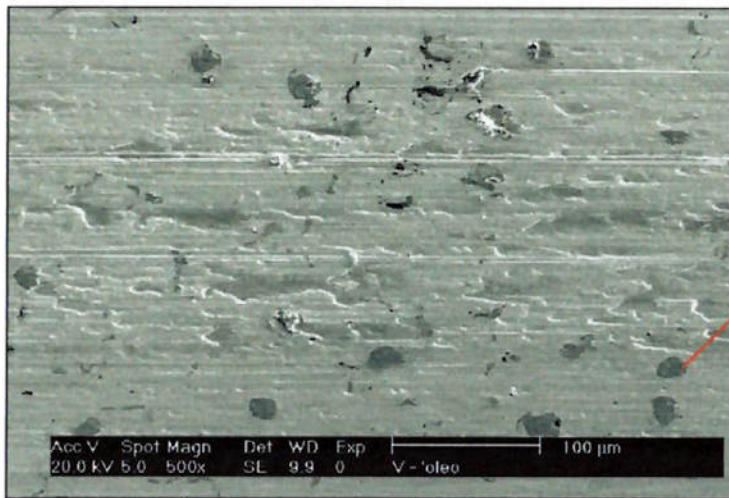
Matriz martensítica: As observações realizadas, nas superfícies desgastadas dos discos com matriz martensítica (figura 4-84), mostram alguns aspectos semelhantes e outros muito diferentes àqueles vistos anteriormente em outras amostras.

Foram observados riscos superficiais de diferentes tamanhos e profundidades, indicando a ação de mecanismos de desgaste abrasivo. Além disso, foi notada também, a ocorrência de deformação plástica em sítios bem localizados, como por exemplo, nas bordas dos veios de grafita que chegavam a encobrir a grafita. A deformação plástica deste material se deve a presença de austenita retida.

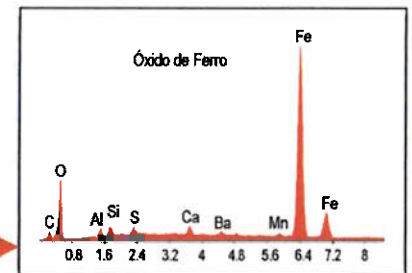
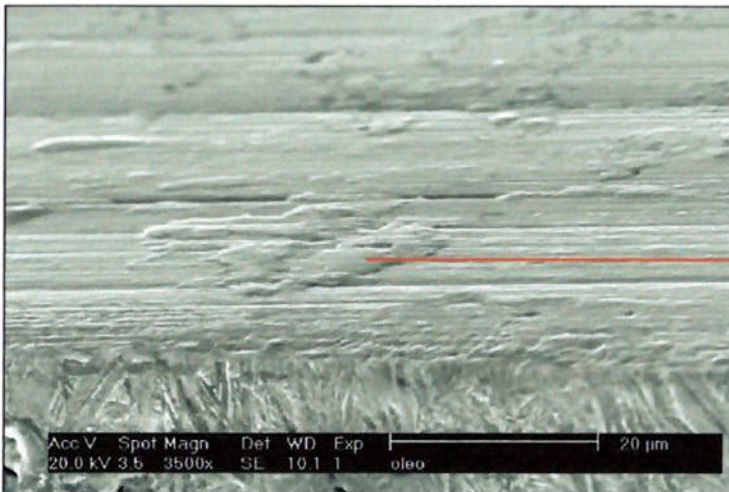
Um aspecto muito diferente destas superfícies, mostrado na figura 4-84 (a), quando comparadas às outras analisadas anteriormente, foi o fato de apresentarem grande número de depressões, possivelmente originadas da remoção de óxidos por mecanismos abrasivos.

A aparência das superfícies sugere que durante o processo de desgaste, filmes de óxido tenham sido criados e tenham tido tempo suficiente para crescer até atingir uma espessura que possibilite sua remoção superficial na forma de lâminas, como foi mencionado por Liu (1995). Este mecanismo de remoção de material deixaria as superfícies dos discos com muitas regiões em baixo relevo.

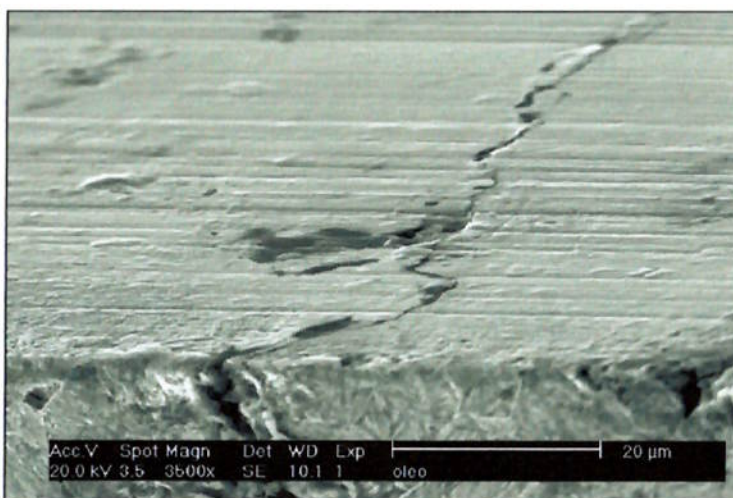
Os outros detritos que aparecem espalhados nas superfícies de desgaste, também foram identificados como sendo óxidos de ferro, os quais ficaram aderidos às superfícies devido às altas cargas de compressão presentes nestes ensaios.



a) Marcas deixadas pela remoção de material através de mecanismos oxidativos.



b) Óxidos aderidos como detritos à superfície de desgaste.



c) Deformação plástica localizada em regiões onde existia austenita retida e que provocaram a compressão da lamela de grafita.

Figura 4-84. Superfícies desgastadas dos discos de ferro fundido vermicular de matriz martensítica. - MEV -

4.4.5. Disco de freio real

Com o intuito de comparar os resultados obtidos neste trabalho com o caso real de um disco de freio usado em automóveis, foi analisada a superfície desgastada de um disco de freio retirado de um automóvel de passeio, cujos resultados são mostradas a seguir.

Rugosidade:

Na figura 4-85 são mostrados os valores de rugosidade Ra e Sm medidos no disco de freio real e nos discos de ferro fundido vermicular com matriz perlítico-ferrítica ensaiado na máquina de desgaste tipo pino contra disco (carga de 600 N).

Esta figura mostra que, o parâmetro de rugosidade Ra é 50% maior no disco de freio real do que no vermicular utilizado neste trabalho, indicando que a superfície desgastada do disco de freio real está muito mais deteriorada que a superfície de desgaste obtida através de ensaios de desgaste tipo pino contra disco. Esta evidência era esperada, considerando que, as severas condições de uso do disco de freio real, com cargas de frenagem de 4 MPa ou mais, e onde o atrito produzido, gera temperaturas superiores a 800 °C; provoca grande degradação do material devido às limitadas propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos utilizados nestas aplicações.

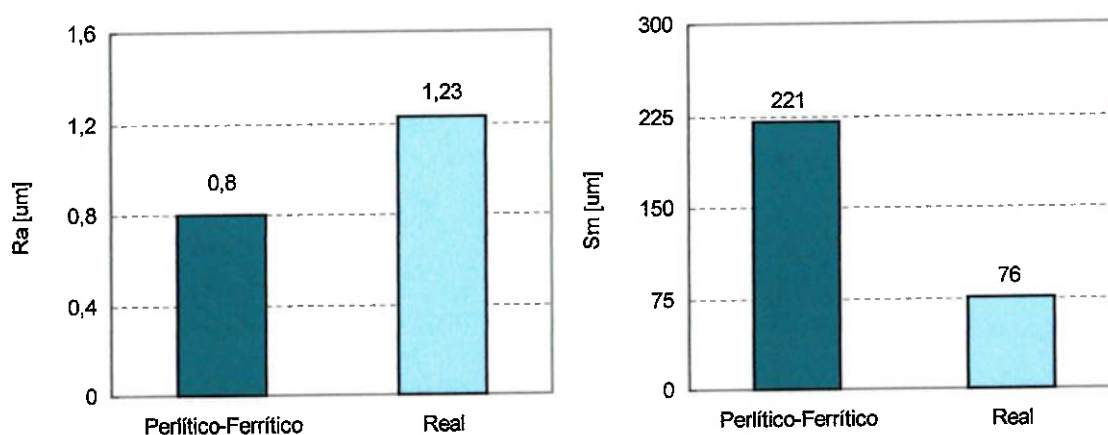


Figura 4-85. Valores médios de rugosidade Ra e Sm das superfícies desgastadas de um disco de freio real e dos discos de ferro fundido vermicular ensaiados no laboratório com a carga de 600 N.

Pode-se observar também, que os valores de S_m , no disco de freio real é menor que no disco de vermicular, comprovando mais uma vez que as superfícies dos discos de freio real foram submetidas a condições de uso mais severo que aqueles testados no laboratório, onde as condições de ensaio produzem superfícies mais lisas.

Microscopia óptica:

Na figura 4-86 são apresentadas fotografias que, mostram o aspecto das superfícies desgastadas do disco de freio real. Em geral, pode se dizer que não há diferenças muito marcantes entre elas e as superfícies desgastadas dos discos ensaiados no laboratório mostrados anteriormente na figura 4-27.

Aqui também são encontradas marcas de sulcos, indicando que as superfícies foram riscadas por ações abrasivas de detritos, e a presença de óxidos e detritos aderidos à superfície, com formas arredondadas ou irregulares que formam faixas com diferentes tonalidades e larguras.

As lamelas de grafitas atuam também, como coletores de detritos que podem chegar a cobrir a grafita, fazendo com que não sejam mais vistas nas fotografias. Esses óxidos aderidos à superfície em alguma regiões são tão abundantes que chegam a formar camadas que protegem a superfície do disco.

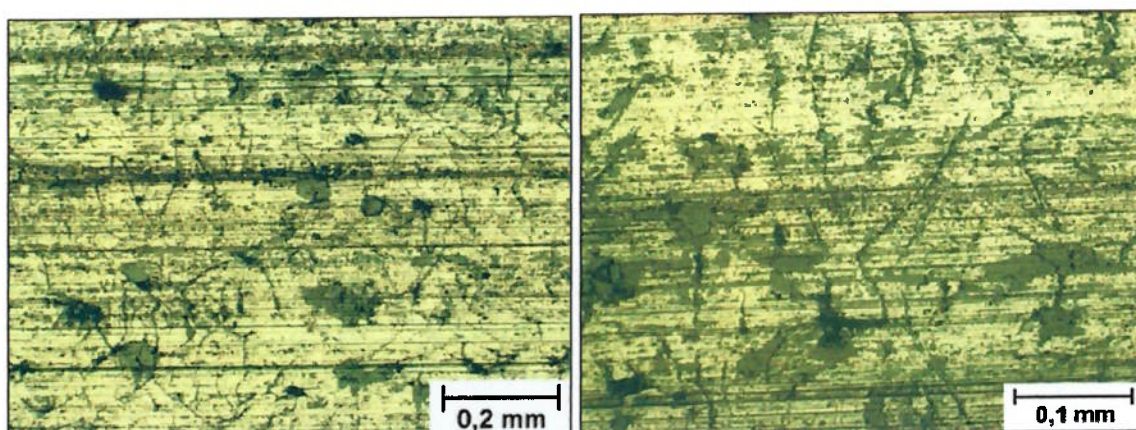
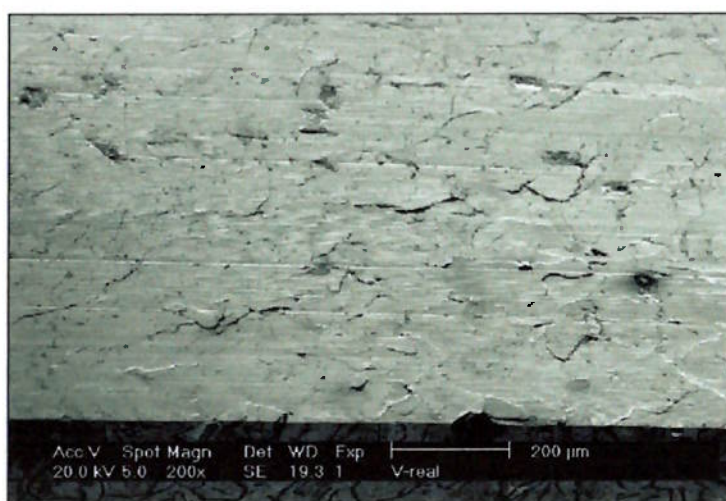


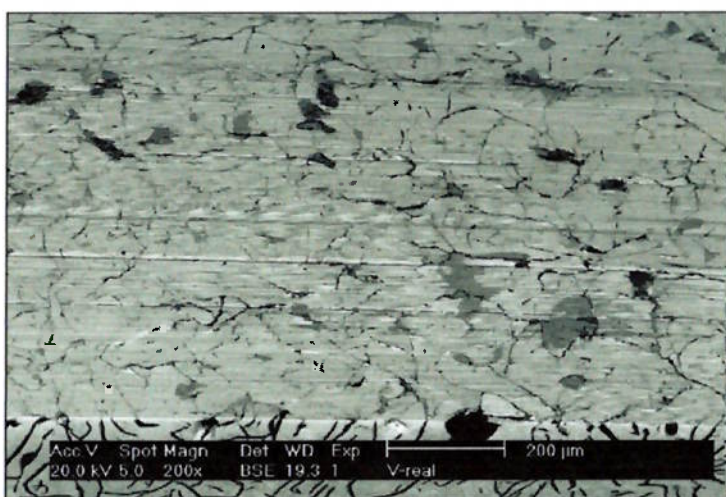
Figura 4-86. Superfícies desgastadas do um disco de freio real.

Microscopia eletrônica de varredura:

As análises realizadas, através de microscopia eletrônica de varredura, das superfícies desgastadas de um disco de freio real, comprovaram o que foi observado por microscopia óptica. A superfície de desgaste deste disco apresentou um aspecto muito semelhante àquela visto depois dos ensaios de desgaste realizados no laboratório, mostrando marcas de desgaste abrasivo e de grande deformação plástica superficial, como pode ser visto nas fotografias da figura 4-87.



Marcas de deformação plástica superficial, com altos e baixos relevos.

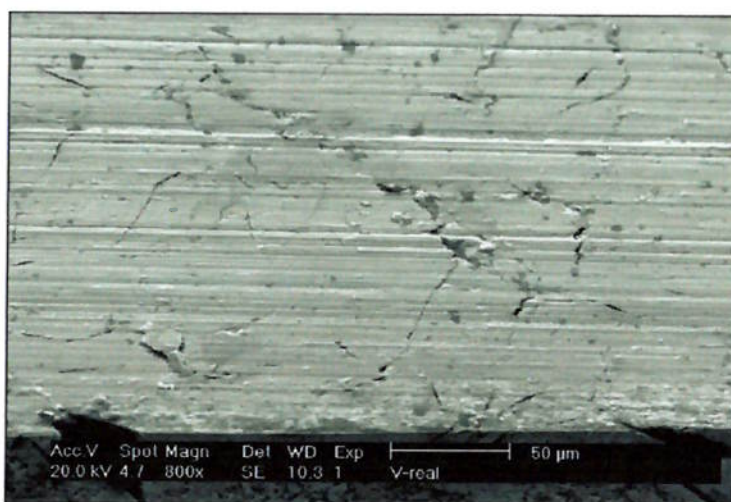


Igual à foto anterior, analisada através de elétrons retro-espalhados. Manchas escuras são óxidos e/ou detritos aderidos às superfícies.

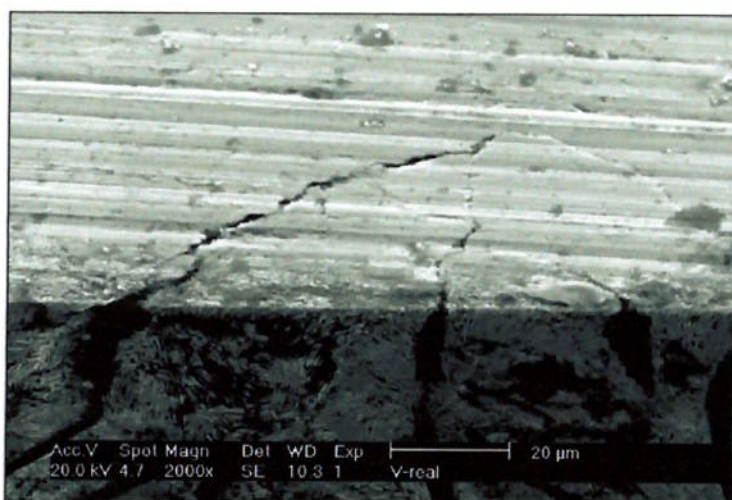
Figura 4-87. MEV - Superfícies desgastadas de um disco de freio real.

Como observado na figura 4-87, a superfície de desgaste, mostra grande deformação plástica, ficando os veios de grafita parcial ou totalmente encobertas por deformação plástica ou por detritos de desgaste (óxidos) que ficam aderidos a elas. Esses detritos, em alguns casos formaram colônias, aleatoriamente espalhadas na superfície, formando manchas escuras, que analisadas quimicamente mostraram ser em sua maior parte constituída por óxido de ferro.

As fotografias das figuras 4-88 mostram mais claramente marcas de riscos deixados por partículas abrasivos que estiveram atuando no momento da frenagem, e marcas de deformação plástica ocorrida nas superfícies de desgaste.



Grande deformação plástica e partículas de desgaste a ponto de serem removidas pelo processo de frenagem.



Marcas de riscos devidos a mecanismos de desgaste abrasivo e evidência de compressão dos veios de grafita.

Figura 4-88. MEV - Superfícies desgastadas de um disco de freio real, observadas com maiores aumentos.

Nestas fotografias podem ser vistas partículas de material a ponto de serem removidas, por mecanismos de fadiga e delaminação, observando-se também, que os veios de grafita foram comprimidos pelo material das bordas, chegando inclusive a ficarem totalmente encobertas, diminuindo desta maneira, sua capacidade de lubrificação.

O material das bordas dos veios de grafita, submetido a sucessivas deformações plásticas, sofre trincamento ao final de vários ciclos, promovendo a formação e o destaque de *debris* de desgaste.

Com o intuito de analisar as conseqüências do processo de desgaste sub-superficial, foram realizadas observações destas regiões neste disco de freio real. Foi verificado que a zona de material afetado pelo processo de desgaste é muito pequena, de aproximadamente 2 μm , semelhante às zonas afetadas pelo processo de desgaste, observadas nos ensaios de laboratório. Na figura 4-89 mostra-se a fotografia da superfície transversal à superfície de desgaste, deste disco de freio real, atacada quimicamente com Nital 2%.

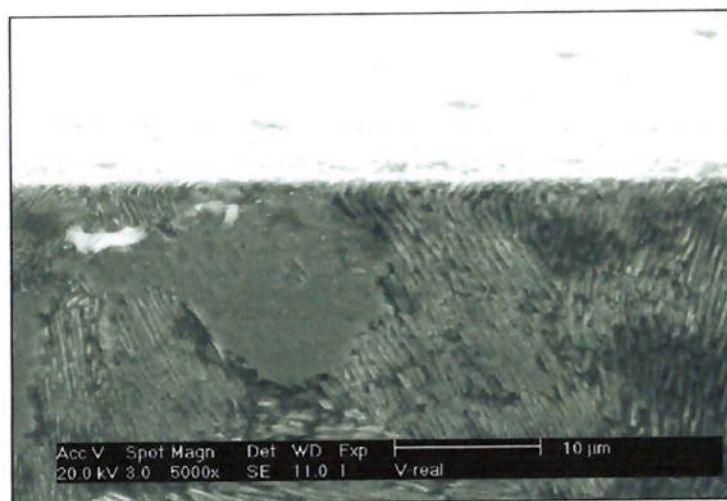


Figura 4-89. Seção transversal da superfície desgastada do disco de freio real. Matriz perlítica e borda superior deformada plasticamente, formando uma camada de aproximadamente 2 μm de espessura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando o desgaste medido nos discos estudados parece evidente que, os ferros fundidos cinzentos apresentaram um desempenho muito semelhante sob qualquer condição de ensaio realizado. Este comportamento não é difícil de entender, pois os três ferros fundidos cinzentos estudados, se mostraram microestruturalmente muito parecidos, possuindo matrizes quase 100% perlíticas e formas e tamanhos de grafita semelhantes. Além disso, suas propriedades mecânicas resultaram também, muito semelhantes.

Os ferros fundidos cinzentos, além de mostrarem comportamentos semelhantes com relação à perda de massa, também apresentaram características de resistência ao desgaste que dependem diretamente da carga de frenagem utilizada: a perda de massa aumenta com o aumento da carga de frenagem embora as diferenças sejam muito pequenas, na faixa entre 300 e 100 N, como é mostrado na figura 5-1.

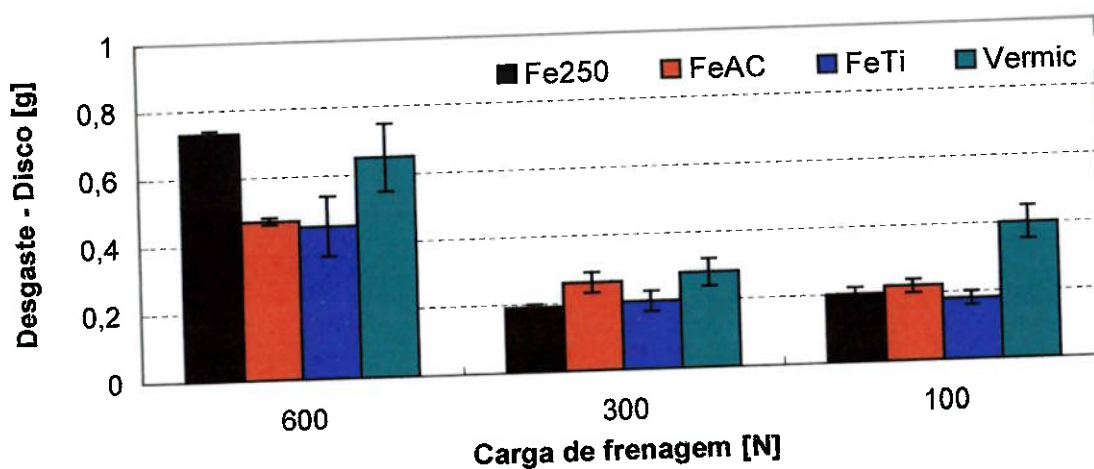


Figura 5-1 Desgaste acumulado nos discos depois de 21 horas de ensaio em função do tipo de ferro fundido e da carga de frenagem utilizada.

Constatou-se também, que o comportamento do ferro fundido vermicular foi diferente daquele observado nos ferros fundidos cinzentos, pois a resistência ao desgaste deste material é inferior.

Embora o ferro fundido vermicular apresentasse melhores propriedades mecânicas que qualquer um dos ferros fundidos cinzentos utilizados neste trabalho, sua resistência ao desgaste foi pior, ao contrario do que se esperava.

Uma das razões para este comportamento está relacionado com a quantidade de ferrita presente neste ferro fundido (aproximadamente 15% em vol.). A ferrita seria a responsável pelas maiores perdas de massa por possuir uma dureza inferior à da perlita e uma baixa resistência ao desgaste adesivo e abrasivo.

O outro motivo pelo qual o ferro fundido vermicular sofreu maior desgaste foi o fato de desenvolver forças de atrito maiores que as alcançadas pelos ferros fundidos cinzentos, o que fez com que atingisse temperaturas de frenagem muito mais altas.

Estas evidências sugerem que este material não seria o mais adequado para ser utilizado em componentes como discos de freio.

Entretanto, analisando os resultados obtidos neste trabalho, de um outro ponto de vista, percebe-se que o ferro fundido vermicular não é tão ruim como parece. A figura 5-2 relaciona a perda de massa com a temperatura atingida durante os ciclos de frenagem: observa-se que a resistência ao desgaste do ferro fundido vermicular praticamente se iguala à dos ferros fundidos cinzentos.

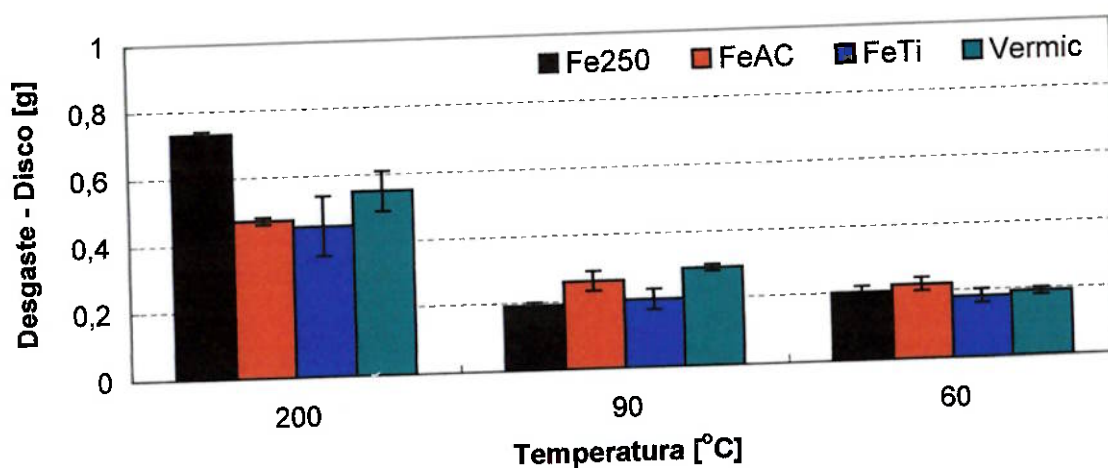


Figura 5-2 Desgaste acumulado nos discos em função do tipo de ferro fundido e da temperatura alcançada durante os ciclos de frenagem.

Fazendo uma análise do desgaste dos pinos, semelhante à realizada com os discos, nota-se também que, o desgaste dos pinos também é influenciado pela carga de frenagem utilizada, pois como se observa na figura 5-3, a perda de massa nos pinos diminui quando se diminui a carga de frenagem, independentemente do tipo de ferro fundido utilizado como disco.

Observa-se também que, em geral, os pinos que mais se desgastaram foram aqueles ensaiados com os discos de ferro fundido vermicular, independentemente da carga de frenagem utilizada. Este fato é explicável, considerando que com cada carga de frenagem utilizada, o par “disco de vermicular – pino” foi submetido a maiores forças de atrito e temperaturas, o que favoreceria a aniquilação dos platôs de contacto, criados nas superfícies dos pinos durante a frenagem, devido às maiores forças de cisalhamento atuantes.

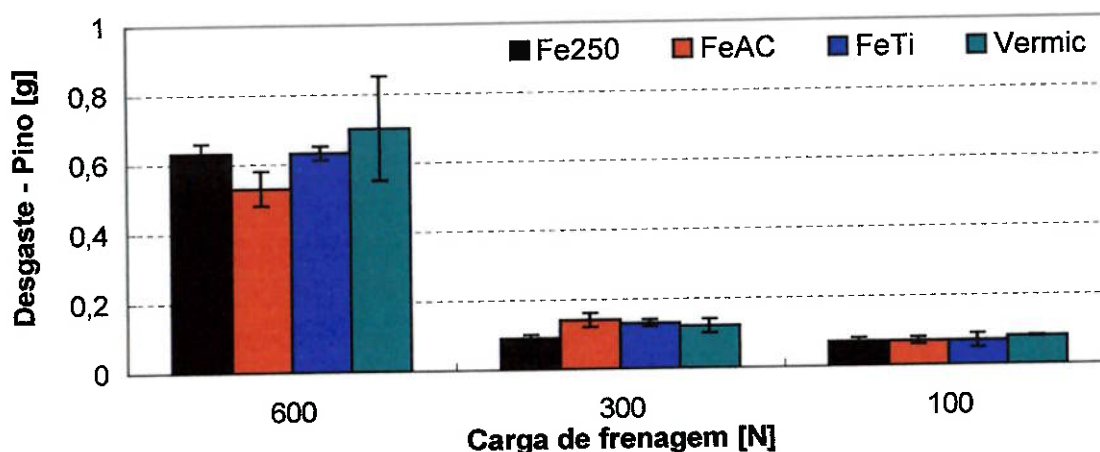


Figura 5-3 Desgaste acumulado nos pinos em função do tipo de ferro fundido utilizado como disco e da carga de frenagem aplicada.

Contudo, analisando o desgaste dos pinos, a partir da temperatura alcançada durante a frenagem se observa que, para um mesmo nível de temperatura, o desgaste dos pinos ensaiados com os discos de ferro fundido vermicular se iguala ao desgaste medido nos pinos ensaiados com os discos de ferro fundido cinzento, como pode ser observado na figura 5-4, com a ressalva de que para atingir esses

níveis de temperatura e desgaste, foram necessárias cargas de frenagem inferiores as utilizadas com os ferros fundidos cinzentos.

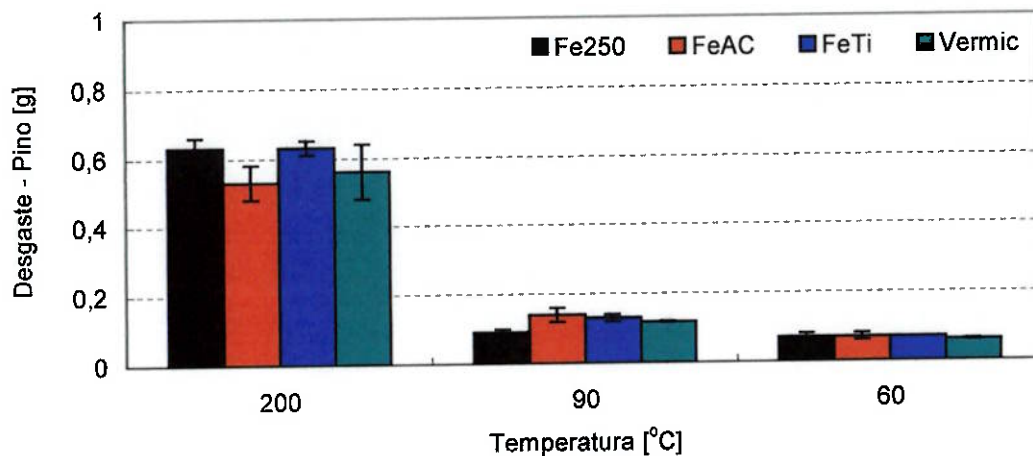


Figura 5-4 Desgaste acumulado nos pinos em função do tipo de ferro fundido usado como disco e da temperatura alcançada durante os ciclos de frenagem.

Observando os resultados apresentados nas figuras 5-2 e 5-4, e todas características que envolvem o desgaste, pode se concluir que, a utilização do ferro fundido vermicular em discos de freio de veículos automotores poderia ser uma boa opção a ser considerada para estas aplicações. Pois é evidente que com este material poderiam ser alcançados níveis de forças de frenagem e de desgaste, semelhantes aos obtidos com os ferros fundidos cinzentos, comumente utilizados, com a vantagem de utilizar cargas de frenagem inferiores.

É necessário ressaltar, porém, que uma característica muito importante observada no desgaste do ferro fundido vermicular foi que, a perda de massa não depende diretamente da carga de frenagem. Na figura 5-5, verifica-se que com 600 N de carga de frenagem o desgaste dos discos foi relativamente grande (aproximadamente 0,6 g) e diminuiu quase para a metade quando a carga foi de 300 N. Entretanto, quando a carga de frenagem foi de 100 N, observa-se que o desgaste dos discos foi maior que com 300 N.

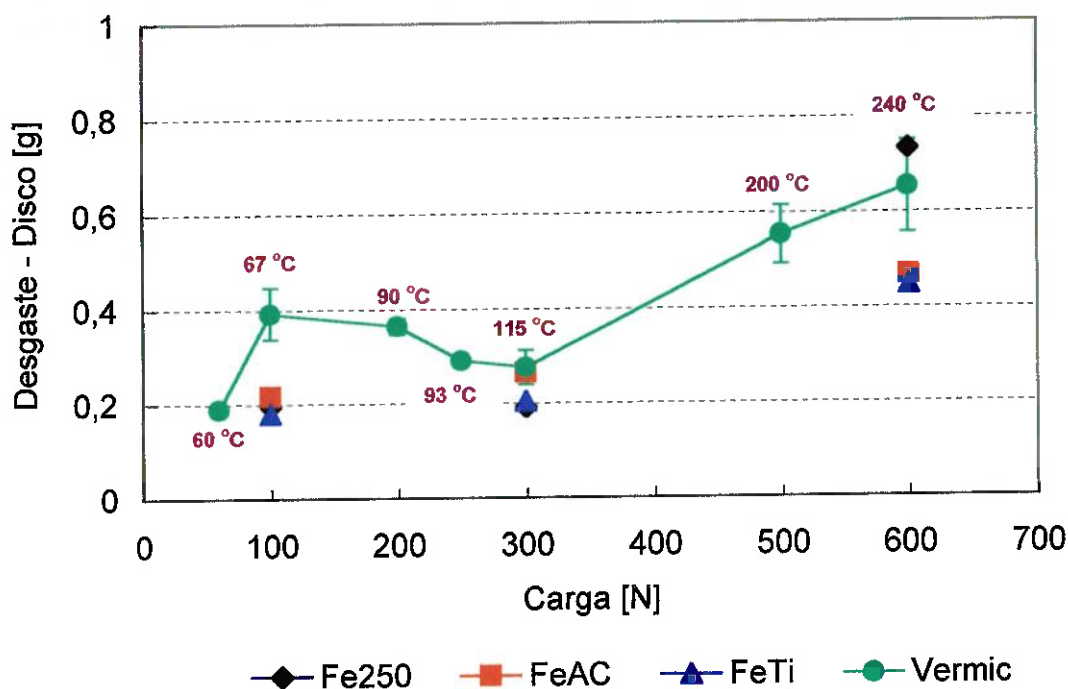


Figura 5-5. Perda de massa comparativa dos ensaios de desgaste realizados em função da carga de frenagem aplicada e da temperatura após 21 h.

Estes resultados mostram que no ponto correspondente a carga de 300 N existe uma transição do desgaste, pois cargas menores e maiores que 300 N provocam perdas de massa maiores.

A transição observada depende dos mecanismos de desgaste predominantes em cada condição de carregamento, que por sua vez, dependem da quantidade e estabilidade mecânica dos óxidos formados.

Correlacionando os valores de carga aplicada com a temperatura e o aspecto das superfícies desgastadas, verifica-se que, com a carga de 600 N, a temperatura chegou aos 240 °C e as superfícies desgastadas apresentaram-se oxidadas (figura 4-27 e 4-28), com claras evidências de acentuada deformação plástica. A deformação plástica presente, nas superfícies dos discos, sugere que a remoção de *debris* ocorreu através de micro-fadiga e micro-corte, mecanismos estes, vinculados a processos de desgaste abrasivo, cuja presença é notada pelo riscamento superficial observado. Por outro lado, a cinética de formação óxidos nesta condição de carregamento, seria favorecida pelas altas temperaturas atingidas no decorrer dos

ensaios, e a grande quantidade de óxidos formada protegeria as superfícies dos discos do desgaste. Entretanto, a alta carga aplicada promoveu o arrancamento destes óxidos formando *debris* que passariam a atuar como partículas abrasivas que tornariam o desgaste dos discos mais severo, facilitado ainda, pela grande quantidade de ferrita presente na microestrutura destes discos.

Com a carga de 500 N, atingiu-se uma temperatura de 200 °C e as superfícies desgastadas foram muito parecidas com as observadas quando a carga foi de 600 N, porém o desgaste medido nesta condição de ensaio foi um pouco inferior. Neste caso, os óxidos formados conseguiriam proteger um pouco mais as superfícies contra o desgaste e os mecanismos de remoção de *debris* seriam menos severos que com a carga de 600 N, o que levaria a uma menor taxa de desgaste.

Com a carga de 300 N foram alcançadas temperaturas médias de 115 °C e as superfícies desgastadas apresentaram-se muito oxidadas (figura 4-45 e 4-46). Sob estas condições, a cinética de formação de óxidos é mais lenta que a 240 °C, precisando-se tempos maiores para formar quantidades semelhantes de óxidos. Entretanto, os óxidos formados nestas condições protegem as superfícies de maneira mais eficaz, devido ao fato de que, as forças de atrito não são grandes o suficiente para arrancar completamente as camadas de óxido. Os mecanismos de desgaste observados nesta condição de carregamento são semelhantes aos observados nos ensaios realizados com a carga de 600 N, embora a intensidade de arrancamento seja menor.

Sob cargas menores que 300 N (250 N e 200 N) o aquecimento dos discos foi menor, atingindo temperaturas de 93 °C e 90 °C, respectivamente. E as superfícies desgastadas mostraram-se menos oxidadas que quando foram ensaiadas com a carga de 300 N. Estas evidências comprovam que a formação de camadas de óxido é prejudicada pela diminuição da temperatura. A proteção contra o desgaste que estas camadas proporcionavam às superfícies em contacto vai perdendo sua eficácia, possibilitando a ocorrência de maiores perdas de massa.

Sob carga de 100N, as temperaturas atingidas no decorrer dos ensaios foram de 67 °C, e as superfícies desgastadas apresentaram-se pouco oxidadas (figura 4-62 e 4-63). A cinética de formação de camadas de óxidos seria muito baixa devido às temperaturas mais baixas. Desta forma, não são formadas camadas de óxidos

grandes o suficiente para proteger as superfícies dos discos contra o desgaste, deixando-as mais expostas à influência dos diversos mecanismos de desgaste existentes. Isto explicaria as maiores perdas de massa observadas nesta condição de ensaio comparada com as perdas de massa medidas nos ensaios realizados com cargas de 200, 250 e 300 N. A falta de óxidos protetores facilitou a ação abrasiva dos constituintes abrasivos contidos nas pastilhas de freio, que entre outras coisas servem, justamente, para limpar os óxidos formados nas superfícies dos discos de freio com o intuito de melhorar o desempenho dos sistemas de frenagem. Os mecanismos de desgaste predominantes observados com a carga de 100 N foram adesivos e abrasivos (Fig. 4-69); sendo as bordas dos poros e dos veios de grafita os locais onde o desgaste adesivo foi mais intenso, coincidindo possivelmente com a presença de ferrita nestas regiões.

Sob carga de 60 N, a temperatura atingida foi de 60 °C e tendo sido observada menor quantidade de camadas oxidadas que nos discos ensaiados com carga de 100 N. Neste caso, o desgaste foi também, inferior àquele medido com 100 N devido ao fato de que, a deformação plástica provocada pela ação abrasiva das partículas abrasivas contidas nas pastilhas de freio provocam, predominantemente, micro-sulcamento, que não chega a remover efetivamente material da superfície dos discos. Neste caso, os mecanismos de desgaste mais importantes foram também, o adesivo e o abrasivo.

Devido ao alto teor de ferrita nos discos de ferro fundido vermicular (aproximadamente 14%), o desgaste adesivo esteve presente em todos os discos ensaiados, independentemente, da carga utilizada.

Estas evidências confirmam as afirmações de Welsh (1965) que, encontrou transições no regime de desgaste, observadas quando as cargas de frenagem eram aumentadas, transições essas, governadas principalmente pela formação de camadas de óxidos entre as superfícies em contacto. A transição do regime de desgaste, de moderado para severo, ocorre quando a camada de óxido, que protege as superfícies do desgaste, é quebrada deixando as superfícies totalmente expostas, o que provocaria um desgaste maior e mais rápido.

No caso do desgaste dos pinos, mostrado na figura 5-6, verificou-se que o aumento da carga de frenagem provocou um aumento uniforme do desgaste, sem apresentar qualquer tipo de transição. Foi observado também que, o desgaste dos pinos usados nos ensaios com os ferros fundidos vermiculares não foi muito diferente daquele medido nos pinos ensaiados com os ferros fundidos cinzentos. Portanto, pode se dizer, que a perda de massa dos pinos não foi afetada pelo material dos discos utilizados nos ensaios, e que o desgaste deles aumentou uniformemente conforme aumentou a carga de frenagem aplicada.

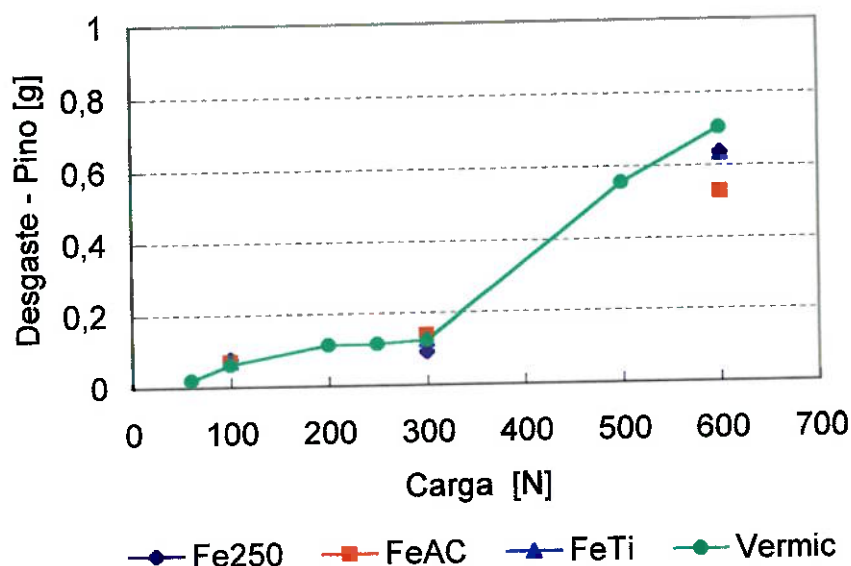


Figura 5-6. Desgaste comparativo dos pinos que foram ensaiados contra discos de ferro fundido vermicular em função da carga de frenagem e do tempo de ensaio.

Os ensaios de desgaste realizados com os discos de ferro fundido vermicular tratados termicamente mostram que, um disco com matriz ferrítica apresenta desgaste praticamente igual ao de um disco com matriz perlítico-ferrítica, não apresentando necessariamente, maiores forças de atrito. As forças de atrito desenvolvidas por este material e as temperaturas alcançadas, são de fato iguais às obtidas com os discos de matriz perlítico-ferrítica.

As menores perdas de massa foram obtidas com discos de matriz martensítica (mais austenita retida) com a desvantagem de que as forças de atrito desenvolvidas eram muito menores.

A utilização desses discos em sistemas de freio é, portanto não recomendada, dado o baixo desempenho da frenagem.

Comparando os resultados obtidos das análises realizadas com os discos de freio real, observa-se que o aspecto das superfícies desgastadas e a espessura de material que é afetada pelo processo de frenagem são praticamente iguais às obtidas nos ensaios de desgaste realizados no laboratório, utilizando uma máquina de desgaste tipo pino contra disco.

Todos os ensaios de desgaste realizados e as análises feitas permitem concluir que o ferro fundido vermicular estudado poderia ser utilizado em discos de freio de veículos automotores, com melhor desempenho no que diz respeito à conversão de energia cinética em calor, objetivo maior de um sistema de frenagem, embora com maior desgaste que o observado nos ferro fundidos cinzentos, comumente usados para estes fins. Outra vantagem do vermicular é que necessitam menores cargas de frenagem para desenvolver forças de frenagem semelhantes às dos cinzentos.

6. CONCLUSÕES

- O ferro fundido com grafita vermicular pode ser utilizado como discos de freio em veículos automotores, desenvolvendo maiores coeficientes de atrito.
- A resistência ao desgaste do ferro fundido vermicular depende fortemente da carga de frenagem utilizada, mas não é diretamente proporcional a ela, pois apresenta transições no regime de desgaste.
- Com iguais cargas de frenagem aplicadas, o desgaste dos discos de ferro fundido vermicular é superior a dos discos de ferro fundido cinzento.
- O ferro fundido vermicular desenvolve maiores forças de atrito que os ferros fundidos cinzentos, quando submetidos a iguais condições de carregamento.
- O ferro fundido vermicular desenvolve maiores temperaturas que os ferros fundidos cinzentos, quando submetidos a iguais condições de carregamento.
- Em condições iguais de força de atrito, o desgaste e as temperaturas alcançadas pelo ferro fundido vermicular são iguais as dos ferros fundidos cinzentos.
- Em geral, a resistência ao desgaste, as forças de atrito e as temperaturas medidas nos ferros fundidos cinzentos foram muito semelhantes, independentemente, das cargas de frenagem e do tipo de ferro fundido cinzento utilizado.
- O desgaste dos pinos (pastilhas de freio) ensaiados com cargas altas é maior quando estão em contacto com o ferro fundido vermicular. Em cargas intermediárias ou baixas, o desgaste dos pinos é igual independentemente do material do disco utilizado.
- O ferro fundido vermicular, com matriz ferrítica, apresentou desgaste semelhante ao vermicular com matriz perlítico-ferrítica, desenvolvendo iguais níveis de força de atrito e temperatura.
- O ferro fundido vermicular, com matriz martensítica, desgasta menos que o vermicular com matriz perlítico-ferrítica, desenvolvendo, entretanto, menores níveis de força de atrito e temperatura.
- Os principais mecanismos de desgaste observados nas superfícies dos discos foram abrasão, oxidação e fadiga. E nos pinos, abrasão, fadiga e delaminação.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- a) Para avaliar melhor o desempenho deste ferro fundido vermicular, seria importante realizar testes de frenagem reais, utilizando discos de freio fabricados com este material, submetido a condições reais de funcionamento.
- b) Seria interessante estudar a influência da microestrutura no desempenho deste material, utilizando para isto, discos de ferro fundido vermicular com matrizes 100 % perlíticas.

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). **Metals Handbook**, v. 9, 1985, p. 243.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – NORMA ASTM 247-67. Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 03.01, 1990, p. 121 – 122.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Annual Book of ASTM Standards**, Sec. 3, v. 03.01, Jul. 91, p. 197 - 212.
- ANDERSON A. E. Ho spotting in automotive friction systems. **Wear**, v.135, 1990, p. 319 – 337.
- ANDERSON A. E. Friction and wear of automotive brakes. In: **ASM Handbook, Friction, lubrication and wear technology**, 10th ed., v18, 1992, p: 569 – 577.
- ANGUS H. T., **Cast Iron: Physical and Engineering Properties**. Butterworth & Co (Publishers) Ltda. Second Edition, 1976.
- AZEVEDO, C. R. Efeito do tamanho de grão austenítico na cinética e na morfologia do produto da reação bainítica de um ferro fundido nodular austemperado. **Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1991.
- BERGMAN F., ERIKSSON, M., JACOBSON S., Influence of disc topography on generation of brake squeal. **Wear**, v. 225-229, p. 621 – 628, 1999.
- BLAU P. J. **Friction Science and Technology**. Ed. Marcel Dekker. New York. 1996.
- CHAPMAN, B. J. and MANNION G. Titanium-bearing cast iron for automotive braking applications. **Foundry Trade Journal**, v.25, 1982, p. 232 - 246
- CUEVA, E. G. Estudo das condições de ocorrência de transformação martensítica induzida por deformação em ferros fundidos nodulares austemperados. **Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997

- CULLITY, B. D. Elements of X-Ray diffraction. Adisson-Wesley Publishing Company, Inc. 2o. ed. 1977, p. 423.
- DAWSON, S. Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine VDI Conference on Materials in Powertrain (Werkstoff und Automobilantrieb), Dresden, Germany, October 1999.
- DIN 50125. Test Pieces for the Tensile Testing of Metallic Materials. April 1991.
- DUNKS C.M. & TURNER K.B. Production of compacted graphite iron casting for brake systems. *AFS Transactions*, v89, 1981, p: 575 - 586
- ELLIOTT, R. **Cast Iron Technology**. Butterworth & Co. (Publishers) Ltda. 1988.
- ERIKSSON, M., BERGMAN F., JACOBSON S., Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions. *Wear*, v. 232 p. 163 – 167. 1999.
- ERIKSSON, M. JACOBSON S., Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology International*, v. 33, 33, p. 817- 827, 2000
- ERIKSSON, M., LORD, J., JACOBSON S., Wear and contact conditions of brake pads: dynamic in situ studies of pad on glass. *Wear*, v. 249, p. 272 – 278, 2001
- ESPOSITO, A & THROWER, J. **Machine Design**. Delmar Publishers Inc. 1991
- FEEST E. A., CHURCHMAN-DAVIES J.J AND ELLIS K. Influence of ceramic reinforcement content on metal matrix composite brake rotor performance. **In: Advances in Automotive Braking Technology**. Mechanical engineering publications limited London and Bury St. Edmunds. First edition, Cap 6,1996, p: 109 – 118.
- GRIEVE, D. G et. al. Light –weight disc brake materials. **In: Advances in Automotive Braking Technology**. Mechanical engineering publications limited London and Bury St. Edmunds. First edition, Cap 5,1996, p: 89 - 105
- GRIEVE, D. G et. al. Design of lightweight automotive brake disc using finite element and Taniguchi technique. **Proceedings of Institute of Mechanical Engineering**, 1998, v.212, p: 245 – 254

- GUEDES, L. C. Fragilização por fósforo de ferros fundidos nodulares austemperados. **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996.
- GUESSER, W. L. & GUEDES L.C. Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística. **IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA**. São Paulo, Ag.1997.
- GUICCIARDI S., et. al. On data dispersion in pin-on-disk wear tests. **Wear** (accepted to publication in 12 April 2002).
- HIRT, W. & LANCASTER, J. K. Surface film formation and metallic wear. **Journal of applied physics**. v27, n. 9, 1965, p. 31 – 50.
- HOHMANN C. et al. Contact analysis for drum brakes and disk brakes using ADINA. **Computers and Structures** , 1999, v 72, p. 185 – 198.
- HUTCHINGS I. M., **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. Ed. Edward Arnold, cap. 5, p. 86-92, 1992.
- JIMBO, Y. et al. Development of high thermal conductivity cast iron for brake disk rotors. SAE Technical Paper Series. In: **International Congress and Exposition**. Detroit - Michigan. Feb 1990.
- KABAYA, T. The analysis of adhesive wear mechanism by successive observations of the wear process in SEM. **Wear**. 1979, p. 45 – 56.
- KOVACS, B. V. The effects of alloying elements and their segregation in ADI. In: **WORLD CONFERENCE ON AUSTEMPERED DUCTILE IRON**, 1991, Anais Chicago: AFS, mar. 1991. p. 241 - 270.
- LIU, P.C., et al. Observations on the graphite morphology of compact graphite cast iron. **AFS Transactions**, v89, 1981, p: 65 - 78
- LIU, Y.C., SCHISSLER J. M. and MATHIA T. G. The influence of surface oxidation on the wear resistance of cast iron. **Tribology International**. v28, n.7 Nov. 1995, p: 433 – 438.
- MACNAUGHTA, M. Cast iron brake discs – a brief history of their development and metallurgy. Technical Report. **FOUNDRYMAN**. Out. 98, p. 321 – 324.

- MILLER, R. L. A Rapid X-Ray Method for the Determination of Retained Austenite. **TRANSACTIONS OF THE ASM**, v.57, p. 893 - 899, 1964.
- MORÉ, M.C. Desgaste por deslizamento de aços inoxidáveis austeníticos. **Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.
- PARK, Y. J. et. al. Thermal fatigue resistance of gray and compact graphite irons. **AFS Transactions**, v93, 1985, p: 415 – 422.
- POWELL W. & LEVERING P. CGI: The little cast iron that could. **Engineered Casting Solutions**. Winter 2002, p. 40 – 42.
- PYE, A. M. Technical Report. Applications of Some of the News Cast Irons. **Materials & Design**. v.3. Ag 1982 p. 534 – 537.
- RHEE S. K AND DUCHARME R. T. The friction surface of gray cast iron brake rotors. **Wear**, 23, 1973, p. 271-273.
- RINEK, L. M & COWAN, C. W. U.S. passenger car brake history. **Automotive Engineering**. Jul.1995, p: 37 – 42.
- SASADA, T. The behaviour of adhered fragments interposed between sliding surfaces and the formation process of wear particles. **Wear**, 1979, p. 72 – 80.
- SHEA, M. M. Influence of composition and microstructure on thermal cracking of gray cast iron. **AFS Transactions**. 1978, p. 23 – 30.
- SHIOKAWA, T. The influences of alloying elements and heat treatment conditions on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron. In: **WORLD CONFERENCE ON AUSTEMPERED DUCTILE IRON**, 1991, Anais Chicago: AFS, mar. 1991. p. 375 - 387.
- SINTERCAST. Material Data Sheet. **Technical publications**. Disponível em: <http://www.sintercat.com>. Acesso em setembro de 2002.
- SOUZA, S. A. Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos. São Paulo, Edgar Blucher, 1982, p. 37.
- SOUSA SANTOS, A. B., CASTELLO BRANCO, C. H. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**. São Paulo, IPT, 1989, p. 2 - 3.

- SUGISHITA, J & FUJIYOSHI S. The effect of cast iron graphites on friction and wear performance. I. Graphite film formation on gray cast iron surfaces. *Wear*, v. 66, 1981, p. 209 – 221.
- SUH, N. P. An overview of the delamination theory of wear. *Wear*, v.44, 1977, p. 1 – 16.
- VÉLEZ, J. M. Efeito do silício na cinética da reação bainítica em ferro fundido nodular austemperado a 400 °C. **Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1992.
- VELEZ, J. M. Estudo da resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos nodulares austemperados e temperados e revenidos utilizando um esclerômetro pendular. **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997.
- WELSH N. C., The dry wear of steels I. The general pattern of behaviour. **Phil. Treansactions**. A v.257, p. 31-50. jan 1965.
- WELSH N. C., The dry wear of steels II. Interpretation and special features. **Phil. Treansactions**. A v.257, p. 51-70. jan 1965.
- ZHANG Y. et al. Investigation of tribological properties of brake shoe materials – phosphorous cast iron with different graphite morphologies. *Wear*, 166, 1993, p. 179 - 186.
- ZUM GAHR K. H., Microstructure and wear of materials. **Tribology Series**, v.10, Ed. Elsevier Science Publishers B. V., 1987.