

GRACILIANO PEREIRA FERNANDES

**APLICAÇÃO DA TRIBOLOGIA AO ESTUDO E
DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS PARA
EMBREAGEM AUTOMOTIVA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2007

GRACILIANO PEREIRA FERNANDES

**APLICAÇÃO DA TRIBOLOGIA AO ESTUDO E
DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS PARA
EMBREAGEM AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Tribologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

**UBERLÂNDIA – MG
2007**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- F363a Fernandes, Graciliano Pereira, 1982-
Aplicação da tribologia ao estudo e desenvolvimento de materiais para
embreagem automotiva / Graciliano Pereira Fernandes. - 2007.
142 f. : il.
- Orientador: José Daniel Biasoli de Mello.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Embreagens (Máquinas) - Teses. 2. Tribologia - Teses. 3. Engenharia mecânica - Teses. I. Mello, José Daniel Biasoli de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.83

**“Tenha sempre fé em Deus”.
“Se não duvidar
mas crer que acontecerá o que disser,
então isto será feito.
Sempre que desejar alguma coisa
creia que já a tem,
e assim tudo lhe será dado”.
(Mc: 12, 22-24)**

Aos meus pais Alair e Lúcia,
as minhas avós: Nadir e Lina,
aos tios: Boanerges, Fernando, Paulinho
e Padrinho Júnior,
as tias: Rosângela, Solange, Iolanda
e Preta,

a Ana Paula do Carmo,

a Deus, pela proteção, benção
força, sabedoria
e inspiração para vencer a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Alair Fernandes Gomes e Lúcia Helena Pereira pelos consolos, conselhos, orientações e atenção nos momentos difíceis, alegres e pelo apoio nas minhas decisões.

Ao professor Dr. José Daniel Biasoli de Mello pela preciosa e competente orientação no trabalho, e pelo fundamental apoio que tanto ajudaram a elucidar momentos decisivos deste mestrado.

A minha namorada Ana Paula do Carmo pelo incentivo, companheirismo, atenção, consolo, amor e carinho.

Ao grande amigo Juscelino Moura Americano pelos grandes momentos de incentivo, companheirismo e filosóficos.

Ao professor do LTM Alberto Arnaldo Raslan pelas inúmeras contribuições a minha formação técnica, profissional e pessoal.

A professora Henara Lillian Costa pelas numerosas ajudas.

A indispensável dedicação, atenção e companheirismo da técnica Ângela Maria da Silva Andrade.

Aos estudantes de Tribologia Leonardo Camioto, Washington, João Luís, Bozzi, Venceslau, Flávio e Júlio César pelas colaborações que vieram a enriquecer este trabalho.

A secretária Eunice Helena Nogueira pela atenção e competência.

A todos que fizeram parte do meu convívio pessoal nas repúblicas.

Aos alunos de iniciação científica Leonardo Rodrigues e Rodolfo Rodrigues, que ajudaram em algumas etapas deste trabalho.

A Empresa ZF_Sachs do Brasil pelo apoio financeiro. Em especial, aos Engenheiros Walter Haertel, Ivan Gregori e Paulo Zanotto pelas sugestões e apoio técnico para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros do LTCM, professores Gilmar Guimarães e Solidônio Rodrigues de Carvalho, e ao Msc. Valério Luiz Borges, pelo suporte técnico no desenvolvimento de algumas etapas deste trabalho.

Aos estudantes e amigos presentes no LTM que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A vovó Nadir pelas numerosas e grandiosas orações que vieram a me fortalecer espiritualmente.

A vovó Lina pelas orações, incentivo e torcida.

A todos os meus familiares tios Boanerges, Fernando, Paulinho e Padrinho Júnior e tias Rosângela, Solange, Iolanda, Preta que sempre me ajudaram, apoiaram, incentivaram e acreditam em meu potencial.

As minhas irmãs Aline, Kirlene, Monick e Laís pela torcida e incentivo.

FERNANDES, G. P., “Aplicação da Tribologia ao Estudo e Desenvolvimento de Materiais para Embreagem Automotiva”, 2007, 142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Durante o curto período de tempo de acoplamento da embreagem automotiva, contato por deslizamento ocorre entre o volante do motor, os discos de revestimento e a placa de pressão. Os materiais constituintes da embreagem têm que apresentar excelente desempenho para proporcionar um coeficiente de atrito que seja suficientemente alto e estável, proporcionando assim um movimento de transmissão de rotação regular e eficiente.

Para desenvolver um material de atrito, muitos testes são necessários para que se possa entender como uma ou várias matérias primas se comportam em relação aos aspectos tribológicos. Neste tipo de desenvolvimento, existe um alto grau de empirismo, surgindo a necessidade de várias repetições nos testes para que se façam as escolhas mais assertivas das matérias primas ou mesmo dos processos envolvidos.

Este trabalho tem como objetivo mostrar a correlação, entre os mecanismos de desgaste atuantes em condições reais de uso e os mecanismos simulados em laboratório. Mostra também a correlação da taxa de desgaste do material de atrito de embreagem automotiva a seco, existente entre testes tradicionais de durabilidade em dinamômetro (ensaios mais demorados, complexos e mais caros, devido à necessidade da confecção completa dos protótipos) e testes conduzidos em tribômetro tipo pino-disco (ensaios mais rápidos e mais simples, conseqüentemente menos complexos).

Foi constatado que, após otimização dos parâmetros tribológicos impostos, o tribômetro Pino-Disco (carga atuante contínua no tempo, amostra de 13 mm de diâmetro externo) consegue reproduzir tanto os mecanismos de desgaste quanto os resultados das taxas de desgaste apresentadas pelo dinamômetro tradicional, ainda que este último aplique a carga de forma cíclica e utilize peça padrão de teste de 215 mm de diâmetro externo.

Palavras chave:

Embreagem automotiva; Materiais de atrito; Contato por Deslizamento; Pino-sobre-disco.

FERNANDES, G. P., “**Application of Tribology the Study and Development of Materials to Automotive Clutch**”, 2007, 142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

During the clutch engagement manoeuvre, sliding contact occurs between the pair of clutch facings mounted on the friction disk and the counter faces belonging to the flywheel and the pressure plate.

The materials used in the clutch have to ensure a smooth performance and friction coefficient that is sufficiently high and stable, thus providing regular and efficient rotation transmission.

The development of friction materials requires a large number of tests to understand their tribological behaviour. Such development is highly empirical and involves a large number of repetitions between the tests. Durability tests using dynamometers are traditionally used to measure the wear life of the friction material used in automotive clutches. However, these tests are long, relatively expensive and complex, because they require the construction of prototypes. This paper aims to find a correlation between wear mechanism and wear rates for the friction materials used in dry automotive clutches measured using both durability tests and a pin-on-disk sliding tribometer. Pin-on-disk sliding tests are shorter, simpler and cheaper.

After the optimization of the tribological parameters, pin-on-disk sliding tests under constant normal load using a pin diameter of 13 mm reproduced with remarkable accuracy the traditional durability tests, although in the durability tests the load was cyclic and the diameter of the component was 200 mm.

Key words:

Automotive clutch; Friction materials; Sliding contact; Pin-on-disc.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução.....	1
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. Embreagem.....	8
2.2. Composição Típica dos Materiais Que Constituem o Conjunto Embreagem.....	10
2.3. Topografia de Superfície.....	17
2.3.1. Parâmetros Quantitativos da Topografia de Superfície.....	23
CAPÍTULO III – Mecanismos de Desgaste.....	33
3.1. Caracterização dos Mecanismos de Desgaste.....	33
3.2. Simulação Laboratorial.....	36
3.2.1. Amostras Laboratoriais.....	36
3.2.2. Caracterização Mecânica.....	37
3.2.3. Caracterização Micro-Estrutural.....	37
3.2.4. Ensaios Laboratoriais.....	39
3.3. Resultados e Discussão da Caracterização Micro-Estrutural.....	41
3.4. Resultados e Discussão da Caracterização dos Mecanismos de Desgaste Atuantes em Condições Reais e dos Reproduzidos em Laboratório.....	44
CAPÍTULO IV – Correlação Entre Testes Tribométricos e Dinamométricos.....	50
4.1. Influência da Duração do Ensaio no Comportamento Tribológico (Coeficiente de Atrito, Taxa de Desgaste e Topografia de Superfície) de Material para Embreagem.....	53
4.2. Validação dos Ensaios Laboratoriais.....	58
4.3. Correlação Entre os Resultados dos Testes no Tribômetro e Dinamômetro.....	75
4.4. Validação da Otimização do Tempo de Ensaio Para Ensaios Laboratoriais Utilizando Força Normal de 200 N.....	78
4.5. Conclusões Parciais.....	81

CAPÍTULO V - Caracterização Topográfica.....	83
5.1. Otimização dos Parâmetros Para a Caracterização	
Topográfica.....	89
5.2. Validação da Caracterização Topográfica.....	101
 CAPÍTULO VI – PRÉ-CONDICIONAMENTO SUPERFICIAL.....	104
6.1. Estudos Preliminares.....	104
6.2. Pré-Condicionamento Industrial (Retificação ZF-SACHS).....	106
6.2.1. Ensaios Laboratoriais.....	109
6.3. Pré-Condicionamento Laboratorial (Lixamento LTM).....	112
6.3.1. Ensaios Laboratoriais.....	116
 CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES.....	133
 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	136
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática de sistemas tribológicos utilizados em laboratórios. (a)- prisma esfera; (b)- roda de borracha; (c)- alternado; (d)- pino sobre disco (Samyn et al 2006).....	5
Figura 2.2: Classificação dos diferentes tipos de modelos testes propostos por Czichos (1985).....	7
Figura 2.3: Principais componentes de um conjunto de embreagem automotiva.....	8
Figura 2.4: Representação esquemática do funcionamento de uma embreagem.....	9
Figura 2.5: Estrutura física de uma amostra de revestimento apresentando seus principais constituintes. (a)- região que contém um fio metálico dentro da matriz fenólica; (b)- região da matriz fenólica; (c)- material estrutural, fios de fibras de reforço que estão agrupados e dentro da matriz fenólica.....	12
Figura 2.6: Representação esquemática do ciclo de manufatura dos discos de embreagem....	13
Figura 2.7: (a)- Representação esquemática do equipamento SAE#II; (b)- conjunto embreagem utilizado nos experimentos (Ost; Baets; Degrieck, 2001).....	14
Figura 2.8: (a)- Comportamento do coeficiente de atrito nos testes SAE#II; (b)- Comportamento do coeficiente de atrito nos testes pino disco (Ost; Baets; Degrieck, 2001).....	15
Figura 2.9: Variação da rugosidade superficial das placas de pressão utilizadas nos testes SAE#II (Ost; Baets; Degrieck, 2001).....	16
Figura 2.10: Rugosidade média dos revestimentos antes e após a realização dos ensaios nos testes pino disco (Ost; Baets; Degrieck, 2001).....	16
Figura 2.11: Correlação entre coeficiente de atrito, taxa de desgaste e rugosidade Ost; Baets; Degrieck (2001).....	17
Figura 2.12: Representação esquemática do contato entre duas superfícies (Stachowiak 2001).....	18
Figura 2.13: Exemplo de representação de um perfil de rugosidade (Dagnall, 1986).....	19

Figura 2.14: Representação esquemática de uma superfície antes e após a filtragem das componentes dos perfis rugosidade, ondulação e forma (Dagnall H., 1986).....	20
Figura 2.15: (a)- Representação de um perfil que foi decomposto em seis diferentes categorias, de acordo com o comprimento de onda (Josso; Burton; Lalor, 2002); (b)- Topografia de revestimento em 3D, contendo as principais componentes que constituem a superfície: rugosidade, ondulação e forma.....	21
Figura 2.16: Decomposição das componentes, forma, ondulação e rugosidade, da superfície primitiva. (a)- topografia obtida por fundição; (b)- topografia obtida por usinagem (Josso; Burton; Lalor, 2002).....	22
Figura 2.17: Definição da média aritmética do perfil (Ra) (Gadelmawla et al., 2002).....	24
Figura 2.18: Topografia de superfície de diferentes materiais apresentando mesmo valor de Ra e Rq (2,4 μm); (a)- superfície não desgastada; (b)- superfície desgastada (Ripa et al., 2003 e Stout et al., 1977).....	25
Figura 2.19: Topografias de superfície de aço ferramenta 700 Hv, com mesmo valor de Sq (2,8 μm), mas com diferentes aspectos topográficos. (a)- amostra submetida ao ensaio abrasivo; (b)- amostra submetida ao ensaio de simulação multieventos (Silva Jr, 2007).....	25
Figura 2.20: Perfil topográfico para o calculo do comprimento da linha de apoio (Tp) (Gadelmawla et al., 2002).....	26
Figura 2.21: Representação da área de apoio de uma superfície (Stout et al., 2000).....	27
Figura 2.22: Perfil de rugosidade. (a)- perfil topográfico; (b)- curva representativa de Abbott-Firestone (Thomas, 1982).....	27
Figura 2.23: Curva de Abbott-Firestone com o plano da rugosidade quadrática média situado em zero no eixo da escala vertical (Dong; Sullivan; Stout, 1994).....	28
Figura 2.24: Curva de Abbott-Firestone para uma superfície situada 3 μm abaixo da superfície que têm uma capacidade de apoio de 1% (MountainsMap® Software from Digital Surf).....	29
Figura 2.25: Representação do volume de material e volume de vazios (Stout et al., 2000)...	30

Figura 2.26: Amostra usinada. (a)- Topografia da superfície; (b)- Curva de Abbott-Firestone (Dong; Sullivan; Stout, 1994).....	31
Figura 2.27: Amostra submetida ao processo de brunimento. (a)- Topografia da superfície; (b)- Curva Abbott-Firestone (Dong; Sullivan; Stout, 1994).....	31
Figura 2.28: Amostra obtida por eletro-erosão (EDM). (a)- Topografia da superfície; (b)- Curva de Abbott-Firestone (Dong; Sullivan; Stout, 1994).....	31
Figura 2.29: Definição do parâmetro distância máxima entre picos e vales (Rt) Gadelmawla, 2002).....	32
Figura 3.1: (a)- Volante do conjunto A, após realização do corte da amostra; (b)- áreas na amostra onde foram realizadas as análises.....	35
Figura 3.2: (a)- Placa de pressão do conjunto A, após a realização dos cortes para retirar a amostra; (b)- áreas nas amostras onde foram feitas as análises.....	35
Figura 3.3: (a)- Revestimento lado da placa de pressão, após a realização do corte; (b)- áreas na amostra onde foram feitas as análises.....	35
Figura 3.4: Amostras utilizadas na realização dos estudos e dos ensaios tribológicos preliminares: (a)- revestimento; (b)- placa de pressão.....	36
Figura 3.5: (a)- cortes realizados na amostra laboratorial da placa de pressão para preparação metalografica; (b)- embutimento mostrando seção transversal e longitudinal da placa de pressão.....	37
Figura 3.6: (a)- Tribômetro Plint TE 67; (b)- Detalhe do equipamento mostrando a distância do centro de rotação ao pino porta-amostra.....	39
Figura 3.7: Correlação da Dureza Brinell das amostras industriais e laboratoriais de placa de pressão que foram selecionadas para a caracterização micro-estrutura. Carga = 187,5 Kgf; Identador $\varnothing = 2,5$ mm.....	42
Figura 3.8: Microestrutura típica das amostras: (a - b)- Veios de grafita do tipo A; (c - d)- Veios de grafita do tipo C; (e - f)- Matriz perlítica (ataque Nital 2%).....	43
Figura 3.9: Evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento das amostras de revestimento A e D.....	44

Figura 3.10: Comportamento do coeficiente de atrito médio.....	45
Figura 3.11: Correlação entre os mecanismos de desgaste atuantes em campo e os mecanismos reproduzidos em laboratório, revestimento A.....	46
Figura 3.12: Correlação entre os mecanismos de desgaste atuantes em campo com os mecanismos reproduzidos em laboratório no conjunto B.....	48
Figura 4.1: Taxa de desgaste dos diferentes revestimentos e placas de pressão.....	51
Figura 4.2: Vida útil das embreagens A e B utilizadas em campo (ZF_Sachs do Brasil).....	51
Figura 4.3: Topografia dos revestimentos após terem sido submetidos aos ensaios. $\varnothing = 8$ mm. (a)- revestimento A; (b)- revestimento B; (c)- revestimento C; (d)- revestimento D.....	52
Figura 4.4: Comportamento do coeficiente de atrito com a evolução do ensaio em função da distancia de deslizamento percorrida. (a): ensaio contínuo; (b-f)- ensaios interrompidos; (b)- 1º hora; (c)- 2º hora; (d)- 3º hora; (e)- 4º hora; (f)- 8º hora.....	54
Figura 4.5: Gráfico da variação do coeficiente de atrito médio em função das horas de ensaio.....	55
Figura 4.6: Taxa de desgaste do revestimento e placa de pressão, dos ensaios interrompidos.....	56
Figura 4.7: Comparativo entre a taxa de desgaste dos revestimentos e placas de pressão usados no ensaio interrompido e contínuo.....	56
Figura 4.8: Correlação do comportamento da rugosidade quadrática média e da capacidade de apoio com a taxa de desgaste, do revestimento utilizado no ensaio interrompido.....	57
Figura 4.9: Amostra laboratorial do revestimento com sua nova dimensão. (a)- revestimento A; (b)- conjunto (placa de pressão mais revestimento no pino porta amostra).....	59
Figura 4.10: (a)- Configuração utilizada no monitoramento da temperatura; (b)- posicionamento do sensor infravermelho na superfície da placa de pressão em relação ao ponto de contato entre a superfície do revestimento e a superfície da placa de pressão.....	60
Figura 4.11: Montagem experimental para calibração da emissividade da placa de pressão...	61

Figura 4.12: (a)- Montagem experimental para calibração da temperatura da superfície da placa de pressão submetidas aos ensaios; (b)- detalhe do monitoramento da superfície da placa de pressão na marca de desgaste, utilizando os termopares e o sensor infravermelho.....	62
Figura 4.13: Correlação da temperatura medida pelo sensor infravermelho e termopares.....	64
Figura 4.14: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos para força normal de 23N.....	65
Figura 4.15: Topografia de superfície dos revestimentos ($\varnothing = 13$ mm) obtida via MEV, após a realização dos ensaios, com força normal 23N: (a)- revestimento A; (b)- revestimento B.....	65
Figura 4.16: (a)- representação esquemática dinamômetro; (b)- dinamômetro inercial (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).....	67
Figura 4.17: Amostra utilizada no teste de bancada. (a)- disco de revestimento; (b)- placa de pressão (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).....	67
Figura 4.18: Gráfico mostrando a taxa de desgaste que foi obtida em função da temperatura e da energia de atrito gerada durante o acoplamento da embreagem, quando testes foram realizados no dinamômetro inercial. (a)- revestimento A; (b)- revestimento B (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).....	69
Figura 4.19: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos A e B para força normal de 70N.....	70
Figura 4.20: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos A e B para força normal de 150N.....	71
Figura 4.21: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos A e B para força normal de 200N.....	72
Figura 4.22: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos para as diferentes forças normais aplicadas.....	72
Figura 4.23: Evolução do coeficiente de atrito e da temperatura obtida pelo sensor infravermelho e da temperatura calibrada, em função do tempo de ensaio do revestimento A.....	73

Figura 4.24: Evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, para os ensaios tribológicos realizados no tribômetro por Bezzazi et al (2007).....	74
Figura 4.25: Correlação entre a taxa de desgaste dos testes tribológicos realizados no tribômetro e os testes tribológicos realizados no dinamômetro.....	76
Figura 4.26: Correlação entre o coeficiente de atrito médio dos testes tribológicos realizados no tribômetro e os testes tribológicos realizados no dinamômetro. (a)- correlação qualitativa; (b)- correlação quantitativa.....	77
Figura 4.27: Evolução da taxa de desgaste dos revestimentos e placas de pressão E e F.....	79
Figura 4.28: Correlação entre a taxa de desgaste com a rugosidade quadrática média e capacidade de apoio para força normal de 200 N. (a)- revestimento E; (b)- revestimento F.....	80
Figura 5.1: Topografia de superfície dos revestimentos submetidos a ensaios laboratoriais com força normal igual a 200 N. (a e b)- revestimento A, antes e após o ensaio; (c e d)- revestimento B, antes e após a realização do ensaio.....	84
Figura 5.2: Quantificação da rugosidade quadrática média dos revestimentos A e B antes e após a realização dos ensaios tribológicos para uma força normal de 200 N.....	85
Figura 5.3: Topografia de superfície típica observada via MEV. Revestimentos B.....	86
Figura 5.4: Quantificação da capacidade de apoio dos revestimentos A e B antes e após a realização dos ensaios tribológicos para uma força normal de 200 N.....	87
Figura 5.5: Topografia de superfície da placa de pressão. Amostra Placa de pressão A. (a)- antes da realização do ensaio laboratorial; (b)- após a realização do ensaio laboratorial.....	88
Figura 5.6: Parâmetros topográficos das amostras de placa de pressão A e B utilizadas nos ensaios laboratoriais, com força normal aplicada de 200 N.....	89
Figura 5.7: Topografia de superfície das amostras produzidas em serie. (a)- Amostra PN (superfície normal). (b)- superfície após eliminação da forma e ondulação. (c)- Amostra PP (superfície polida). (d)- superfície após eliminação da forma e ondulação.....	91

Figura 5.8: Topografia de superfície das amostras produzidas em laboratório. (a)- Amostra DN (superfície normal). (b)- superfície após eliminação da forma e ondulação. c)- Amostra DP (superfície polida). (d)- superfície após eliminação da forma e ondulação.....	91
Figura 5.9: Parâmetros topográficos das amostras produzidas na linha de produção.....	92
Figura 5.10: Parâmetros topográficos das amostras produzidas laboratorialmente.....	92
Figura 5.11: Aspecto típico de superfície das amostras produzidas laboratorialmente (Botões).....	95
Figura 5.12: Componentes de uma superfície. Amostra DN-A2.....	95
Figura 5.13: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente.....	96
Figura 5.14: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas em série.....	96
Figura 5.15: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente e em série.....	97
Figura 5.16: Efeito da profundidade da superfície ativa nos valores da capacidade de apoio das superfícies. (a)- Geral. (b)- Detalhe.....	98
Figura 5.17: Efeito da porcentagem de apoio inicial na capacidade de apoio das superfícies.....	99
Figura 5.18: Capacidade de apoio da placa de pressão em função da variação da superfície ativa e das superfícies tratadas estatisticamente.....	100
Figura 5.19: Novos valores da capacidade de apoio dos revestimentos A e B.....	101
Figura 5.20: Topografia de superfície do revestimento A. (a)- antes da realização do ensaio tribológico; (b)- após a realização do ensaio tribológico.....	102
Figura 5.21: Correlação entre os valores dos parâmetros topográficos da placa de pressão na superfície primitiva e na componente rugosidade.....	103
Figura 6.1: Parâmetros topográficos das amostras revestimento A após terem sido lixadas laboratorialmente.....	105

Figura 6.2: Amostra de revestimento tipo D utilizada para a caracterização topográfica na condição de retificação industrial.....	106
Figura 6.3: Topografias de superfície de amostras de revestimento do tipo D retificadas industrialmente: (a)- retificação 1; (b)- retificação 2; (c)- retificação 3; (d)- retificação 4; (e)- retificação 5; (f)- retificação 6; (g)- retificação 7.....	107
Figura 6.4: Parâmetros topográficos de revestimentos D retificados industrialmente.....	108
Figura 6.5: Correlação entre os parâmetros topográficos dos revestimentos A e D retificados nas condições C2, C4 e Normal.....	109
Figura 6.6: Comportamento da taxa de desgaste dos conjuntos A e D que tiveram os revestimentos retificados em diferentes processos de retificação industrial.....	111
Figura 6.7: (a)- Lapidadora LAPMASTER Modelo 15” utilizada para a realização do pré-condicionamento laboratorial da superfície dos revestimentos: (b) e (c)– detalhes.....	112
Figura 6.8: Gráfico da perda de massa do revestimento D para determinar o tempo do pré-condicionamento laboratorial.....	114
Figura 6.9: Topografias de superfície de revestimentos submetidos ao processo de lixamento laboratorial. (a)- Revestimento A Normal LTM #180. (b)- Revestimento D C4 LTM #400.....	114
Figura 6.10: Parâmetros topográficos das amostras de revestimento submetidas ao processo de lixamento laboratorial: (a)- Revestimento A; (b)- Revestimento D.....	115
Figura 6.11: Comportamento da taxa de desgaste após a realização do ensaio laboratorial do revestimento A retificado na condição dois e lixado nas lixas #180, #320 e #400.....	117
Figura 6.12: Comportamento da taxa de desgaste após a realização do ensaio laboratorial do revestimento D retificado na condição dois e lixado nas lixas #180, #320 e #400.....	117
Figura 6.13: Correlação entre os parâmetros topográficos de revestimento D submetido ao processo de lixamento com peso morto de 1 kg e 3,2 kg.....	118

- Figura 6.14: Correlação entre topografia de superfícies obtidas via MEV, do revestimento A na condição de retificação dois lixado na lixa #320, com peso morto de 1 kg e 3,2 kg.....120
- Figura 6.15: Topografia de superfície revestimento D retificado condição Normal antes de ter sido submetido ao processo de lixamento.....121
- Figura 6.16: Representação esquemática do processo de lixamento na superfície das amostras.....122
- Figura 6.17: Representação da extração dos perfis topográficos da direção Y de varredura da análise interferométrica. (a)- perfil topográfico revestimento (vista superior); (b)- único perfil topográfico extraído da direção Y de varredura da superfície do revestimento; (c)- somatória de todos os perfis topográficos extraídos da direção Y de varredura.....123
- Figura 6.18: Correlação entre a espessura usinada e o valor médio de St, das amostras de revestimento A e D retificadas na condição normal e lixadas com peso morto de 3,2 kg.....125
- Figura 6.19: Correlação entre a topografia de superfície das amostras de revestimento, que foram lixadas no processo preliminar, para estudar o efeito do pré-condicionamento na qualidade superficial do revestimento.....126
- Figura 6.20: Correlação entre a espessura usinada e o valor médio de St, das amostras de revestimento A e D lixadas manualmente para a geração de uma nova superfície.....128
- Figura 6.21: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos lixados manualmente nas lixas #180 e #600 e submetidos a ensaios no tribômetro. (a)- Revestimento A; (b)- Revestimento D.....129
- Figura 6.22: Correlação entre os valores médios de St e a Eu, das amostras de revestimento D retificadas e que foram submetidas a uma série de cinco ensaios interrompidos, no tribômetro.....130
- Figura 6.23 – Evolução do coeficiente de atrito da primeira hora de ensaio do revestimento A lixado na lixa #180, que teve uma nova superfície gerada.....131

Figura 6.24: Comportamento do coeficiente de atrito inicial da primeira hora de ensaio dos revestimentos lixados nas lixas #180 e #600, que tiveram uma nova superfície gerada. (a)– revestimento A; (b)- revestimento D.....132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Categorias de testes propostas para estudo dos materiais (Uetz; Sommer; Khosrawi, 1981).....	6
Tabela 3.1. Características dos componentes estudados.....	34
Tabela 3.2. Características das amostras laboratoriais utilizadas nos ensaios preliminares.....	36
Tabela 3.3. Parâmetros laboratoriais dos ensaios tribológicos preliminares.....	40
Tabela 4.1: Parâmetros laboratoriais utilizados na realização dos ensaios tribológicos.....	53
Tabela 4.2. Características das amostras utilizadas nos ensaios.....	59
Tabela 4.3. Parâmetros laboratoriais utilizados para a validação dos ensaios laboratoriais.....	59
Tabela 4.4. Procedimentos adotados para calibração da temperatura da superfície da placa...	63
Tabela 4.5. Condições dos parâmetros laboratoriais utilizados na realização dos ensaios com o dinamômetro inercial (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).....	67
Tabela 4.6. Correlação entre os parâmetros laboratoriais utilizados em ambos os testes.....	75
Tabela 4.7. Parâmetros laboratoriais para testes laboratoriais que simulam comportamentos tribológicos semelhantes aos da realidade, quando se utiliza um tribômetro.....	81
Tabela 5.1. Designação e características das amostras.....	90
Tabela 5.2. Parâmetros para a caracterização topográfica das amostras de revestimento e placa de pressão.....	100
Tabela 6.1. Parâmetros laboratoriais utilizados nos ensaios tribológicos.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_i : Área individual de contato (μm^2)
- R_a : Rugosidade média aritmética (μm).
- R_q : Rugosidade quadrática média (μm).
- H_v : Dureza Vickers.
- T_p : Capacidade de suporte de carga ou capacidade de apoio (%).
- $h_{m\acute{a}x}$: Altura máxima.
- $h_{m\acute{i}n}$: Altura mínima.
- $V_{m\acute{a}x}$: Volume máximo.
- $V_{m\acute{i}n}$: Volume mínimo.
- R_t : Distância máxima entre picos e vales (μm).
- HB : Dureza Brinell.
- ξ : Emissividade.
- E : Energia de atrito (J/cm^2).
- $\Delta Torque$: Variação do torque ($\text{N} \times \text{m}$).
- $F_{tangencial}$: Força tangencial (N).
- $\Delta Tempo$: Variação do tempo.
- W : Velocidade angular (RPM).
- μ : Coeficiente de atrito.
- F_{ni} : Força normal individual atuante em uma partícula abrasiva.
- E_u : Espessura usinada.
- ρ : Densidade do revestimento (g/cm^2).

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Para que um veículo automotivo se desloque, é necessário que haja transmissão do movimento de rotação do eixo primário do motor ao eixo primário da caixa de marchas. Para isso, uma embreagem automotiva é montada entre o motor e a caixa de transmissão. A embreagem tem por principal finalidade proporcionar um aumento gradual da velocidade angular do volante do motor para o eixo primário da caixa de marcha até que o eixo primário se torne solidário ao volante do motor.

Durante o curto período de tempo de acoplamento da embreagem, que varia de um segundo em condições de uso normal, até quatro segundos em condições extremamente severas como, por exemplo, um carro na sua capacidade total de carga partindo em uma rampa, contato por deslizamento ocorre entre o volante do motor, os discos de revestimento e a placa de pressão. Os materiais constituintes da embreagem têm que apresentar excelente desempenho para proporcionar um coeficiente de atrito que seja suficientemente alto e estável, proporcionando assim um movimento de transmissão de rotação regular e eficiente. Devido ao atrito, calor é gerado durante o ciclo de acoplamento na superfície de contato.

Para desenvolver um material de atrito muitos testes são necessários para que se possa entender como uma ou várias matérias primas se comportam em relação aos aspectos tribológicos. Neste tipo de desenvolvimento, surge a necessidade de várias repetições nos testes para que se façam as escolhas mais acertadas das matérias primas ou mesmo dos processos envolvidos.

O estudo em laboratório das interações tribológicas que ocorrem entre os materiais utilizados no sistema de embreagens automotivas auxilia no seu desenvolvimento tecnológico, gerando maior eficiência em trabalho (qualidade e maior vida útil dos materiais), tornando a transmissão dos veículos mais segura com custo de fabricação destes componentes reduzido.

Muitas vezes o custo da pesquisa torna-se muito elevado, devido à realização dos testes em equipamentos mais complexos, tornando os ensaios mais demorados, e caros, devido à necessidades da confecção completa dos protótipos e a grande complexidade para a realização dos testes. Com isso, busca-se produzir em laboratório, com equipamentos mais simples, menores custos e tempo de ensaio reduzido, a reprodução das interações tribológicas em condições reais.

Um teste laboratorial simplificado é vantajoso para investigações científicas por causa da alta reprodutibilidade dos parâmetros dos testes. Em um modelo de teste as condições experimentais são facilmente alteradas e os custos e tempos para a realização dos testes são muito menores.

Nesta dissertação, foi realizado um estudo experimental que objetiva utilizar um tribômetro na configuração pino sobre disco buscando reproduzir as interações tribológicas que ocorrem em condições reais nas embreagens automotivas convencionais a seco utilizadas em campo. Com este intuito, amostras retiradas dos materiais das embreagens foram caracterizadas para identificação dos mecanismos de desgaste e ensaios laboratoriais no tribômetro foram realizados. Os resultados obtidos foram correlacionados buscando identificar a similaridade das interações tribológicas e a validação do tribômetro no desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos materiais para embreagem.

No próximo Capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes a essa dissertação.

A caracterização e identificação dos mecanismos de desgaste atuantes em condições reais de uso da embreagem e a correlação destes mecanismos com os mecanismos reproduzidos em laboratório é apresentado no capítulo III. Os materiais analisados, a metodologia desenvolvida para a realização do trabalho, bem como os ensaios laboratoriais são também descritos nesta parte do trabalho. Apresentam-se também os equipamentos utilizados no trabalho.

O capítulo IV mostra a correlação entre os resultados que foram obtidos em campo com os resultados obtidos em laboratório em termos de vida útil dos materiais, bem como, a correlação dos resultados obtidos com a realização de testes no tribômetro com os resultados obtidos com testes no dinamômetro tradicional.

O capítulo V mostra os resultados da caracterização topográfica da superfície dos revestimentos e placa de pressão que foram utilizados nos ensaios laboratoriais. Neste

capítulo também está apresentado o estudo realizado para aperfeiçoar os parâmetros que são utilizados para a caracterização topográfica das amostras.

Os resultados apresentados no capítulo IV mostraram uma grande influência da natureza da topografia da superfície no transiente inicial da taxa de desgaste e no coeficiente de atrito, indicando grande potencialidade de otimização do sistema de embreagem, através do pré-condicionamento inicial da topografia de superfície dos materiais.

Desta forma, no capítulo VI são apresentados e discutidos a metodologia e os resultados relativos ao efeito do pré-condicionamento superficial no comportamento tribológicos dos materiais para embreagem.

No capítulo VII estão as principais conclusões deste trabalho.

As referências citadas e consultadas durante todo o desenvolvimento do trabalho são citadas ao final.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Jost (1966) define tribologia como “a ciência e a tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e assuntos correlacionados”. Esse conceito foi criado nos anos 60 com o intuito de combinar campos de estudos, até então distintos, que tratavam dos fenômenos do desgaste, atrito e lubrificação, de maneira interdisciplinar.

Esta área está se desenvolvendo cada vez mais, uma vez que é de grande interesse do ser humano desenvolver novas tecnologias capazes de diminuir os esforços devido ao atrito, diminuindo o desgaste dos materiais em uso e aumentando sua vida útil.

No campo da pesquisa, ter conhecimento dos princípios básicos das interações tribológicas, que ocorrem quando dois ou mais corpos estão em contato dinâmico, é de fundamental importância para o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos materiais. Muitas informações podem ser obtidas não somente pela avaliação do desempenho dos materiais que são utilizados na prática, mas também por estudos de testes que são realizados em campo e, especialmente, por testes que são simulados em laboratórios. A avaliação final de um material é, entretanto, feita através do seu desempenho na prática com um sistema tribológico específico, controlado pelas variáveis de operação e a estrutura tribológica.

Segundo Uetz; Sommer; Khosrawi (1981), mesmo o pesquisador com grandes conhecimentos e experiência fica em dúvida em relação aos resultados obtidos com o modelo e testes realizados em laboratório. Isto porque os resultados dos testes realizados em laboratórios não podem ser comparados diretamente com os resultados dos testes obtidos com sistemas operacionais na prática. O sistema tribológico é modificado e simplificado, sendo assim, as características do comportamento dos materiais também são modificadas.

Com isso, testes realizados em campo em escala real seriam preferencialmente usados para avaliar as interações tribológicas, por causa de sua representatividade, se não apresentassem as seguintes desvantagens: longos períodos de testes, alto custo e a

complexidade na elaboração dos métodos para a realização dos testes. Outro fator importante é que determinados parâmetros envolvidos não podem ser variados separadamente ou podem ser somente variados dentro de certos limites.

A variação nos produtos, o fato das condições de teste não serem constantes, a falta de conhecimento nas variáveis dos materiais e condições de operação das condições reais são alguns outros fatores que tornam os testes em campo complexos e difíceis de serem realizados.

Devido às grandes dificuldades e complexidade apresentadas para a realização dos estudos através de testes que são realizados em campo, busca-se produzir em laboratórios, com equipamentos mais simples, menores custos e tempo de ensaio reduzido, a reprodução das interações tribológicas em condições reais.

A figura 2.1 mostra uma representação esquemática de diferentes configurações de sistema tribológicos, em pequena escala, que são utilizados em laboratório para as simulações das interações tribológicas. Estes modelos de testes nas configurações prisma esfera, roda de borracha, alternado e pino sobre disco, são capazes de fornecer informações sobre o comportamento do atrito e mecanismos de desgaste, necessárias para a caracterização e determinação da vida útil dos materiais.

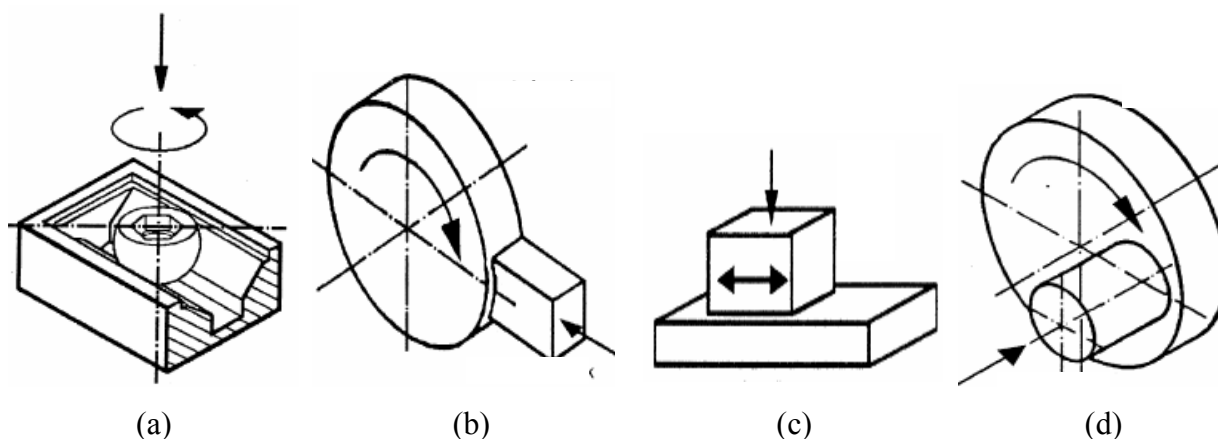


Figura 2.1: Representação esquemática de sistemas tribológicos utilizados em laboratórios. (a)- prisma esfera; (b)- roda de borracha; (c)- alternado; (d)- pino sobre disco (Samyn et al 2006).

Uetz; Sommer; Khosrawi (1981) classificaram os testes tribológicos em seis diferentes categorias, conforme está apresentado na tabela 2.1. Segundo os autores, a categoria I apresenta modelo de testes que são realizados em campo, na prática. Estes testes demandam condições muito similares às condições da vida real para a execução, tornando o custo muito

elevado, períodos de testes muito longos, dificuldades para controlar as condições de operação e a variação dos parâmetros dessas avaliações.

Quando o modelo de teste é reduzido para um teste de bancada (categoria II), a primeira simplificação é manter a configuração dos testes de campo, só que eles são realizados dentro de um laboratório. Muitas variáveis como a influência do ambiente natural e algumas etapas operacionais podem ser eliminadas. O principal objetivo destes testes é o de determinar o tempo de vida dos materiais.

Reduzindo o sistema tribológico para um teste de modelo onde os testes são realizados com apenas alguns componentes que se desejam estudar (categoria III), as condições de operações e de construção são simplificadas e vários parâmetros operacionais podem ser eliminados.

Tabela 2.1: Categorias de testes propostas para estudo dos materiais (Uetz; Sommer; Khosrawi, 1981).

CATEGORIA	MÉTODO DE TESTE	SIMPLIFICAÇÕES
I	Teste de campo	-
II	Teste de bancada	Variáveis de operação; Impurezas.
III	Componentes de teste	Variáveis de operação
IV	Componentes de teste em escala reduzida	Variáveis de operação; materiais; construção.
V	Componente de teste em escala reduzida simplificado	Variáveis de operação; materiais; construção.
VI	Teste de modelo com amostras simplificadas	Variáveis de operação; materiais; construção; geometria.

Nas categorias IV a VI, os componentes utilizados para a realização dos testes já não são mais do tamanho original, como os que são utilizados nas categorias de I a III, mas são simplificados para modelos em escala reduzida. Por esta razão, são denominados de modelos de teste. Conseqüentemente, estes modelos de testes simulam as condições de operação dos testes de campo, principalmente em relação à energia do sistema e à intensidade de desgaste.

O grande objetivo do modelo de teste (categoria VI) é simular, de forma semelhante, as interações tribológicas que ocorrem nos componentes reais, particularmente na área real de contato. Os parâmetros de testes são definidos e mantidos constantes. Amostras com geometrias mais simplificadas são testadas em máquinas e isto é possível para minimizar dispersões nos resultados.

A figura 2.2 apresenta uma representação esquemática proposta por Czichos (1985), onde os testes tribológicos que são realizados em teste de campo (categoria I) com componentes em escala de tamanho real, foram reduzidos para um teste de modelo (categoria VI) com amostra de geometrias simplificadas, que seja capaz de simular em laboratório, de forma semelhante, as interações tribológicas que ocorrem no teste de campo. Czichos (1985) assumiu que, para que seja possível simular as interações tribológicas utilizando um teste de modelo (categoria VI), a quantidade de energia gerada no sistema teria que ser igual ou equivalente à energia gerada no teste de campo (categoria I).

Czichos (1983) foi o primeiro pesquisador a usar os modelos de testes para dar início aos programas de pesquisa que estudam a vida útil das embreagens automotivas. Em seu trabalho, o referido autor investigou a influência de parâmetros importantes como a pressão de contato, a velocidade de deslizamento, o resfriamento, dentre outros, no desgaste e atrito de um material de atrito específico.

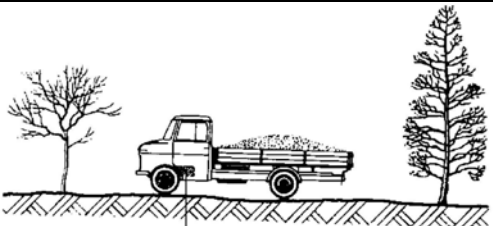
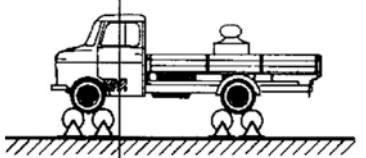
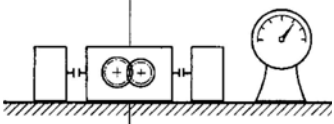
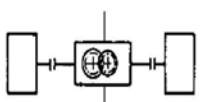
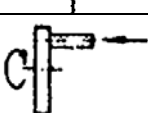
CATEGORIA		DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
I	Testes de desempenho em peças reais	Campo de teste	
II		Teste de bancada (Simulação)	
III		Teste de alguns componentes em tamanho real	
IV	Modelo de atrito e Mecanismos de desgaste	Teste de alguns componentes em escala reduzida	
V		Teste de um único componente	
VI		Modelo de teste	

Figura 2.2: Classificação dos diferentes tipos de modelos testes propostos por Czichos (1985).

2.1 – Embreagem

Definimos embreagem como um dispositivo mecânico constituído basicamente de quatro peças. O volante do motor, a placa de pressão (conhecida também como platô ou chapéu chinês) e os dois discos de revestimento, um que é acoplado à placa de pressão e o outro ao volante do motor. Estes quatro componentes estão montados entre o motor e a caixa de mudanças de marcha (câmbio). O volante do motor está fixado por meio de parafusos ao virabrequim e gira solidário a este. O revestimento encaixa, por meio de estrias, no eixo primário da caixa de câmbio e, assim, roda com este. A placa de pressão fixa os revestimentos de encontro ao volante do motor, transmitindo a rotação do volante do motor para o eixo primário da caixa de câmbio e esta transmite a rotação para o diferencial, que transmite para as rodas. A figura 2.3 mostra os principais componentes de uma embreagem automotiva.

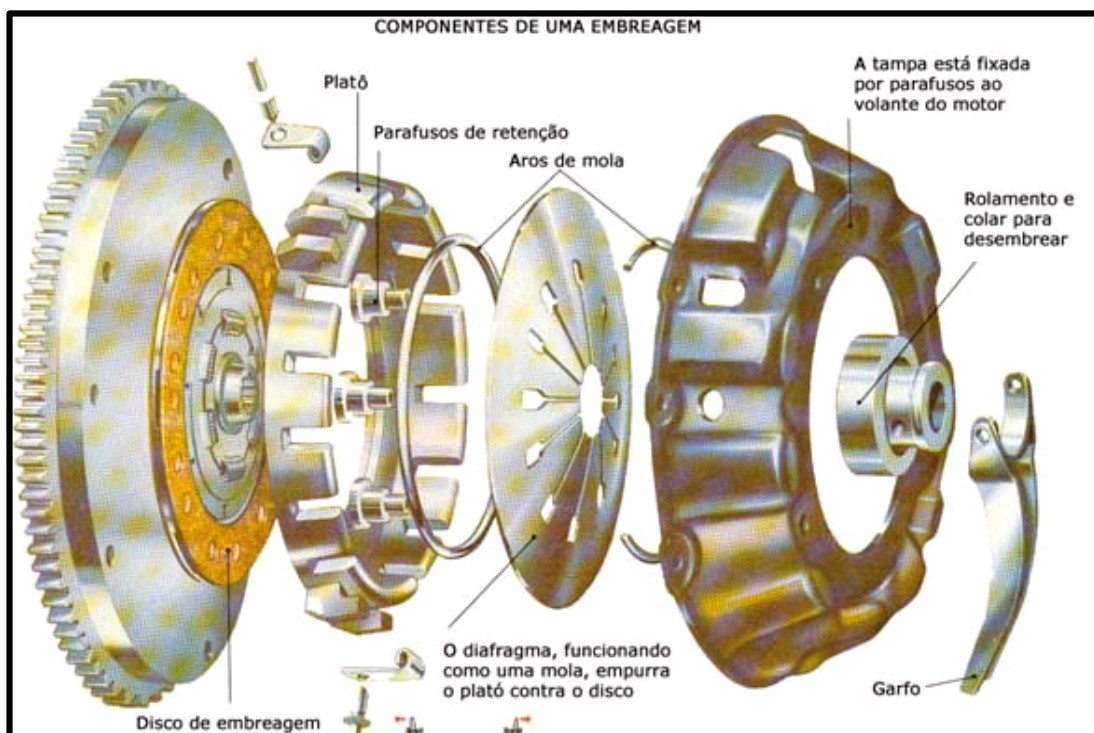


Figura 2.3: Principais componentes de um conjunto de embreagem automotiva (Costa, 2002).

A força de atrito foi definida por Hutchings (1992), como a resistência que um corpo desenvolve ao movimento relativo de outro corpo. Segundo Hutchings (1992), esta definição engloba duas importantes classes de movimento relativo: movimento relativo por deslizamento e movimento relativo por rolamento.

A embreagem faz uso do atrito para transmitir o movimento de rotação do volante do motor para o eixo primário da caixa de transmissão. Pode-se dizer, então, que o sistema de

embreagem tem por finalidade "ligar" e "desligar" a transmissão de movimentos do volante do motor para a caixa de mudanças. Além desta finalidade, a embreagem apresenta outras funções, como proteger o motor e a transmissão contra sobrecargas e também para amortecer as vibrações que ocorrem durante a transmissão. Além destas funções, a embreagem possibilita, quando o veículo estiver parado, um movimento inicial de forma suave, permitindo a passagem das marchas no câmbio de forma precisa e eficiente.

O ato de debrear separa as quatro partes do conjunto da embreagem: o volante do motor, os discos de revestimento e a placa de pressão.

Quando se diminui a pressão da placa de pressão sobre os discos de revestimento, através do acionamento do pedal da embreagem, o volante do motor e o eixo primário da caixa de câmbio passam a ter movimentos independentes. À medida que o pedal da embreagem é liberado, a placa de pressão vai de encontro aos discos de revestimento, comprimindo-os contra o volante do motor, e os mesmos se tornam solidários. Quando os discos de revestimento estão pressionados contra o volante do motor por meio da placa de pressão, a força de aperto deverá ser suficientemente grande para evitar qualquer deslizamento, termo também conhecido como patinagem ou patinação da embreagem. Isto se deve para que se tenha uma máxima transmissão, suave e eficiente do movimento de rotação do volante do motor para o eixo primário da caixa de câmbio (Subaru, 2002; ZF_Sachs, 2007; ZF_Sachs, 2007a). A figura 2.4 mostra uma representação esquemática do seu princípio de funcionamento.

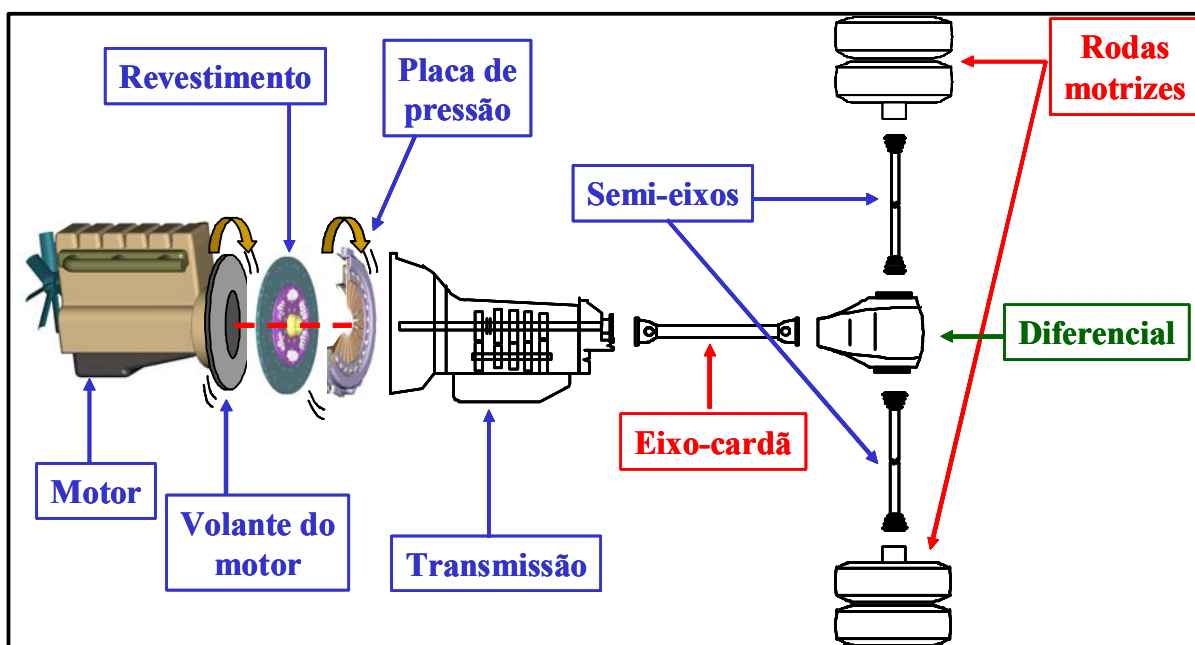


Figura 2.4: Representação esquemática do funcionamento de uma embreagem.

2.2 – Composição Típica dos Materiais Que Constituem o Conjunto Embreagem

Na década de 60, com o início das pesquisas com materiais de embreagens, os discos de revestimento eram de papel, cortiça, metais sinterizados, amianto, dentre outros, dependendo das propriedades requeridas conforme foi apresentado por Ost; Baets; Degrieck, (2001). Com o passar dos anos e com o aprofundamento das pesquisas científicas nesta área, novos materiais de atrito foram sendo desenvolvidos.

Os discos de revestimento, também conhecidos como discos de atrito, são materiais compósitos formados por compactação a quente de pós de materiais poliméricos, incluindo outros diversos componentes, juntamente com os fios que constituem o material estrutural. Atualmente os materiais de atrito têm a sua matriz constituída de resina fenólica, devido aos seus melhores desempenhos de acordo com Kim; Jang, 2000; Ho et al., (2005).

De acordo com Ho et al (2005a), a resina fenólica, além de apresentar excelentes resultados ao desgaste, apresenta também comportamento desejável quando submetidos a meios com temperaturas elevadas.

Além de apresentar excelente comportamento ao desgaste, a matriz fenólica atua como uma barreira, não permitindo a propagação de trincas, e também liga os fios de fibras (material estrutural) uns aos outros, protegendo também esses fios contra os danos superficiais. Além de apresentar as propriedades descritas anteriormente, a matriz fenólica forma um núcleo tenaz, o que proporciona um melhor amortecimento e absorção das vibrações que são geradas pelos choques e impacto que ocorrem quando se usa a embreagem de forma inadequada (Eriksson; Jacobson, 2000; Eriksson; Bergman; Jacobson, 2002; Ho et al., 2005; Ho et al., 2005a; Kim; Jang, 2000; Mutlu; Eldogan; Findik, 2006; Uyyuru; Surappa; Brusethaug, 2006).

Os materiais estruturais são fios de fibras que são compactados juntamente com os materiais que constituem a matriz para proporcionar aos discos de revestimento maior resistência mecânica. Atualmente são utilizados como fios de fibras, materiais como a arâmida, a celulose, o polietileno, o carbono, o boro (Eriksson, Jacobson, 2000; Eriksson, Bergman, Jacobson, 2002; Ho et al., 2005; Ho et al., 2005a; Ho et al., 2005b; Kim; Jang, 2000; Mutlu; Eldogan; Findik, 2006; Uyyuru; Surappa; Brusethaug, 2006), e até mesmo os materiais cerâmicos, como o vidro como demonstrado por Boz; Kurt, 2007.

Os fios metálicos também conhecidos como material estrutural, são adicionados com a principal finalidade de dissipar o calor que é gerado devido ao atrito durante o contato dos

materiais. São conhecidos como fios metálicos o aço de baixo carbono, o aço de alta resistência, o bronze, o cobre, o molibdênio, o tungstênio, dentre outros (Eriksson; Jacobson, 2000; Eriksson; Bergman; Jacobson, 2002; Ho et al., 2005; Ho et al., 2005a; Ho et al., 2005b; Kim; Jang, 2000; Jang et al., 2004; Mutlu; Eldogan; Findik, 2006; Uyyuru; Surappa; Brusethaug, 2006).

Juntamente com os materiais que dão origem à matriz fenólica, são adicionados outros tipos de materiais. Dentre esses materiais, pode-se citar o sulfato de bário e a mica. Estes materiais têm como principal finalidade melhorar e reduzir o custo de manufaturabilidade dos discos de atrito. Além destes materiais, são adicionados outros, conhecidos como aditivos. Lubrificantes sólidos, como a grafita e os sulfetos metálicos, são adicionados com o objetivo de estabilizar o coeficiente de atrito, principalmente em temperaturas elevadas. Partículas abrasivas como a alumina e a sílica aumentam tanto o coeficiente de atrito, como o desgaste do contra-corpo, controlando a rugosidade superficial e removendo as camadas de óxidos e outras camadas que se formam sobre a superfície do contra-corpo, devido às reações triboquímicas (Eriksson; Jacobson, 2000; Eriksson; Bergman; Jacobson, 2002; Ho et al., 2005; Ho et al., 2005a; Kim; Jang, 2000; Mutlu; Eldogan; Findik, 2006; Uyyuru; Surappa; Brusethaug, 2006).

A figura 2.5 apresenta a superfície de uma amostra que foi retirada de um disco de revestimento submetido ao uso em campo. Esta amostra foi observada via microscopia eletrônica de varredura (MEV), para a caracterização e identificação dos mecanismos de desgaste. Nesta figura podem ser observadas as diferentes regiões, contendo os diferentes tipos de materiais que constituem a estrutura física do disco de revestimento.

Os discos de revestimento se diferenciam um dos outros por sua composição química. Os materiais que são utilizados na produção dos discos de revestimento dependem das propriedades que se desejam obter, que por sua vez dependem da aplicabilidade da embreagem.

O ciclo se inicia através da mistura a seco dos pós que irão constituir a matriz de resina fenólica. Os materiais são misturados em proporção, através de uma fórmula balanceada. Em seguida, esta mistura é colocada dentro de um recipiente e aquecida, para esta mistura sólida se tornar líquida e que haja ligação química entre os materiais, formando uma solução de impregnação. Fios de fibras e fios metálicos são entrelaçados uns aos outros. Esse conjunto de fios entrelaçados é mergulhado dentro do tanque contendo a solução, para que haja a impregnação da solução nos fios. Após este processo, os fios são tramados para

formarem a estrutura física dos discos de revestimento. Logo, são compactados e moldados, dando forma ao disco de revestimento. Então os discos são colocados dentro de um forno em temperatura estabelecida, para o processo de cozimento e cura dos discos de revestimento. Finalmente, são retificados para retirar as rebarbas e dar acabamento final na superfície dos discos de revestimento. A figura 2.6 mostra uma representação esquemática do ciclo de manufatura dos discos de embreagem.

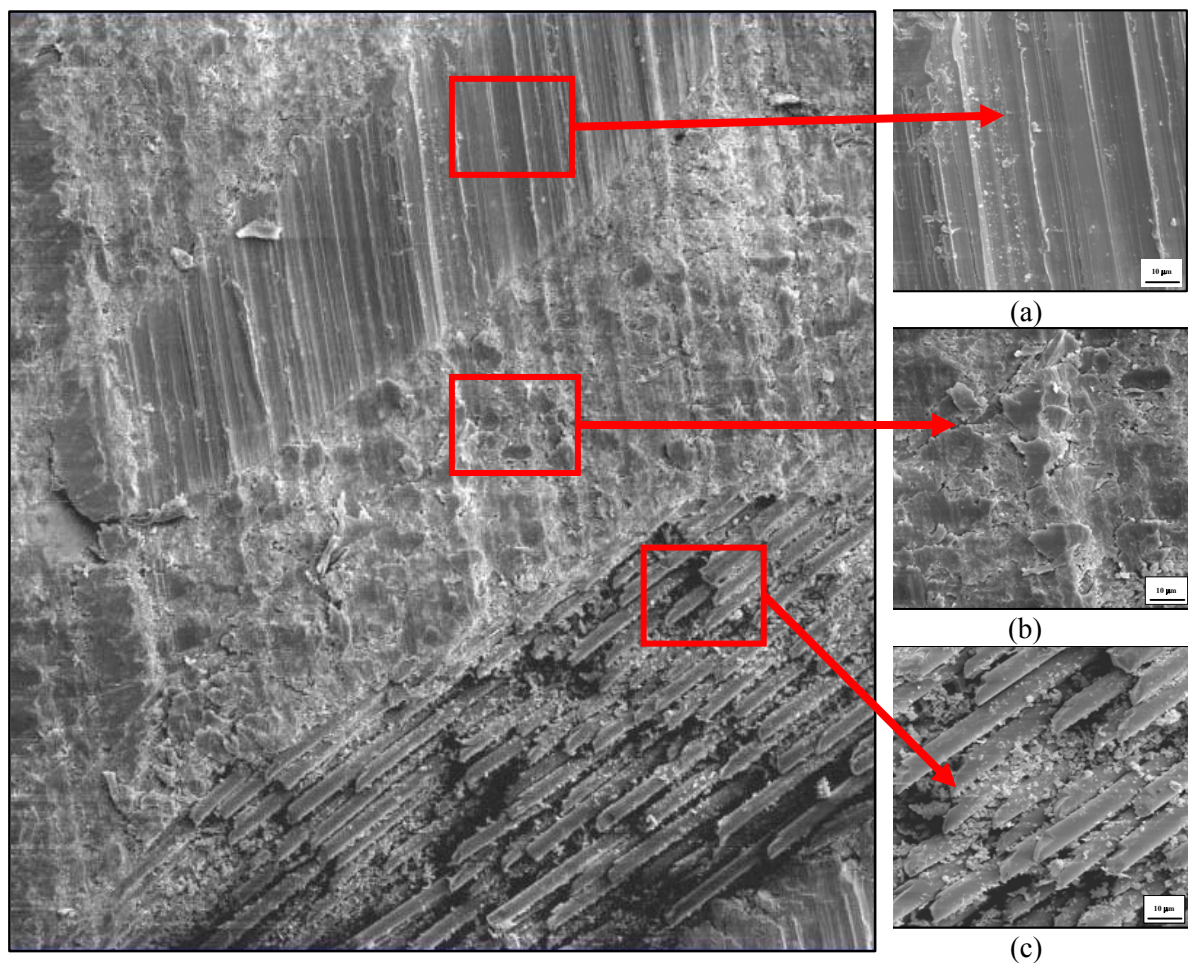


Figura 2.5: Estrutura física de uma amostra de revestimento apresentando seus principais constituintes. (a)- região que contém um fio metálico dentro da matriz fenólica; (b)- região da matriz fenólica; (c)- material estrutural, fios de fibras de reforço que estão agrupados e dentro da matriz fenólica.

Os materiais do volante do motor e da placa de pressão são atualmente constituídos de ferro fundido cinzento perlítico, contendo de 3 a 4% de carbono. Estes materiais contêm carbono livre na forma de veios de grafita na matriz perlítica. Além de apresentar propriedades térmicas desejáveis, ferros fundidos cinzentos apresentam boa resistência

mecânica, resistência ao desgaste satisfatória, boa capacidade de amortecimento de vibrações, além de baixo custo e fácil manufacturabilidade conforme foram demonstrados por (Eriksson; Jacobson, 2000; Eriksson; Bergman; Jacobson, 2002; Mutlu; Eldogan; Findik, 2006).

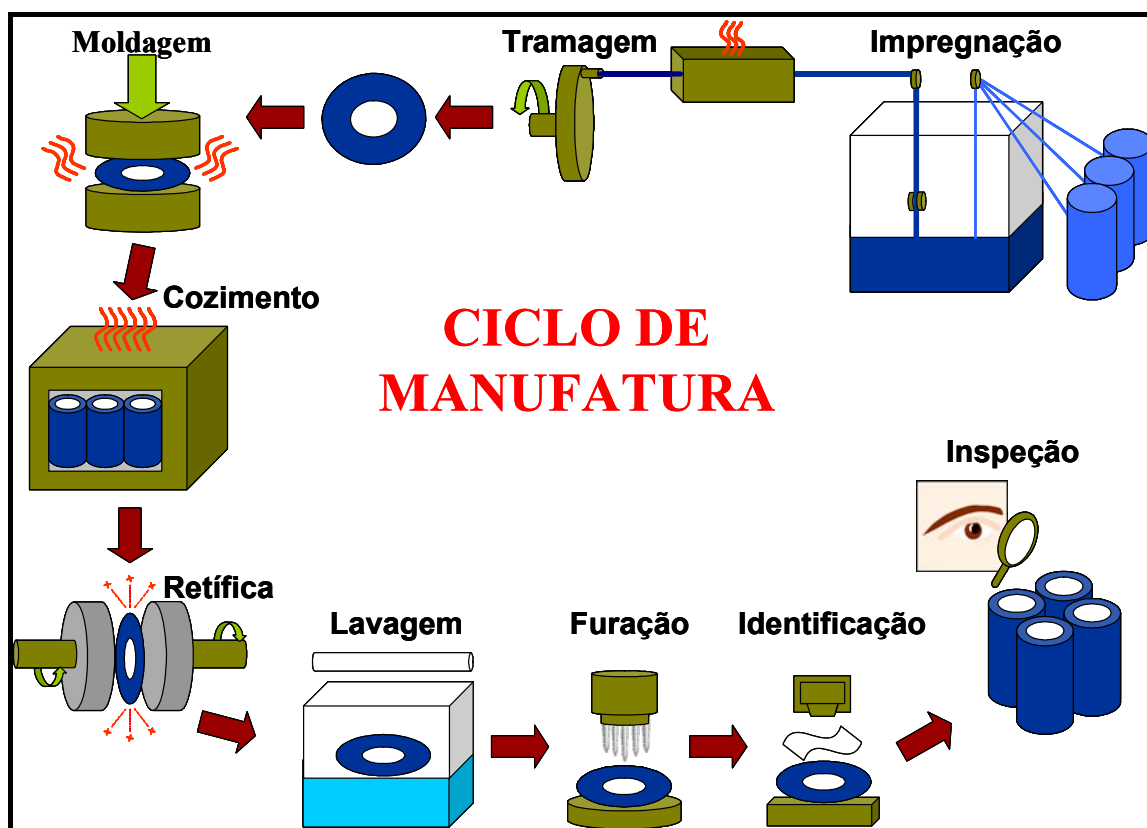


Figura 2.6: Representação esquemática do ciclo de manufatura dos discos de embreagem.

Em trabalho recente (Ost; Baets; Degrieck, 2001) utilizaram os modelos de teste proposto por Czichos (1985) para investigar as características dos discos de revestimentos de embreagens. Ost; Baets; Degrieck (2001) utilizaram dois equipamentos: SAE#II (categoria III) e pino sobre disco (categoria VI). O equipamento de teste SAE#II (figura 2.7-a) consiste de um volante inercial (1) que é acionado por um motor elétrico (2) de corrente alternada (AC). Após um período de tempo determinado, este motor é desligado. O sistema de embreagem (3) está ligado a este volante inercial por um eixo. Após o desligamento do motor, a embreagem é acionada atuando como um sistema de freio do volante inercial. O torque é medido com o auxílio de um transdutor de torque. A embreagem é lubrificada, e resfriada com óleo. O óleo é filtrado, passando por um trocador de calor e retornando a embreagem com o auxílio de uma bomba hidráulica. A pressão, a temperatura do óleo e a temperatura da embreagem também são monitoradas. Todos os sinais medidos são amplificados e armazenados em um computador.

A figura 2.7-b mostra a embreagem (item 3 da figura 2.7-a). Esta embreagem consiste de 9 discos de revestimentos (1), que estão ligados por um eixo ao volante inercial. Entre os discos de revestimentos encontram-se as placas de pressão (3), que pressionam os discos de revestimentos por pressão hidráulica (8), para transmitirem um determinado torque, freando então o volante de massa inercial.

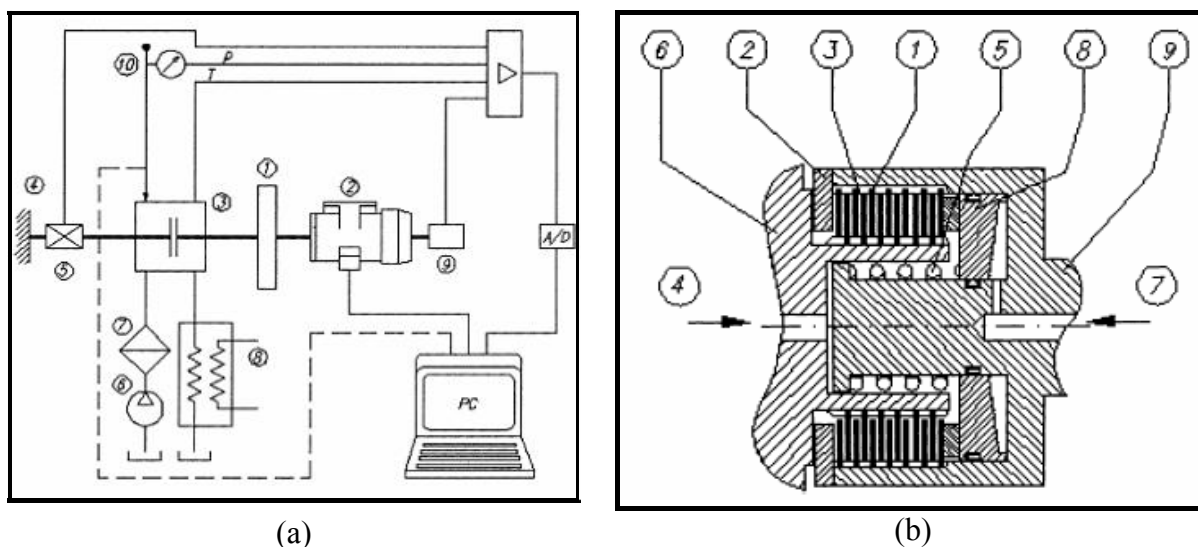
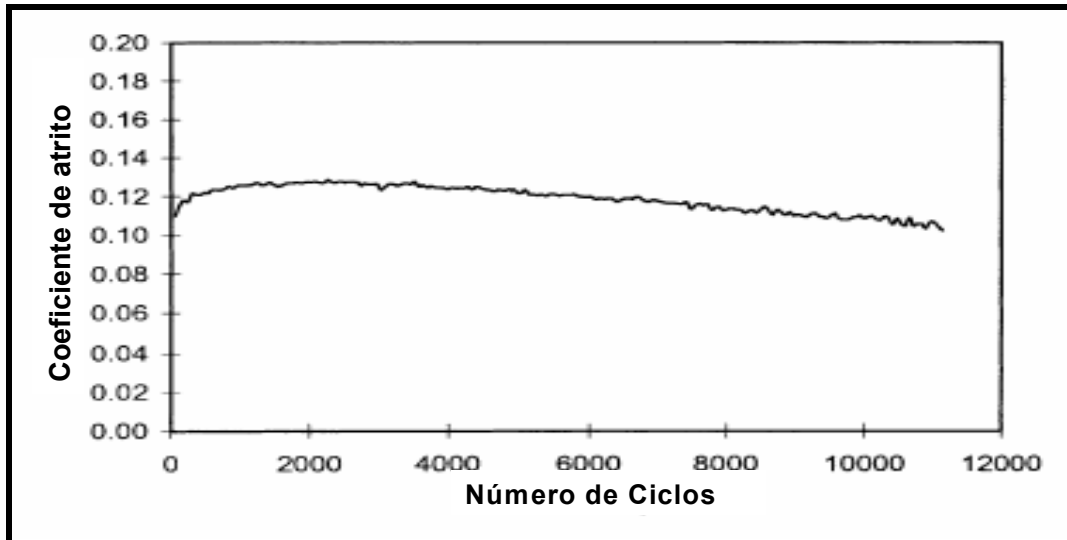


Figura 2.7: (a)- Representação esquemática do equipamento SAE#II; (b)- conjunto embreagem utilizado nos experimentos (Ost; Baets; Degrieck, 2001).

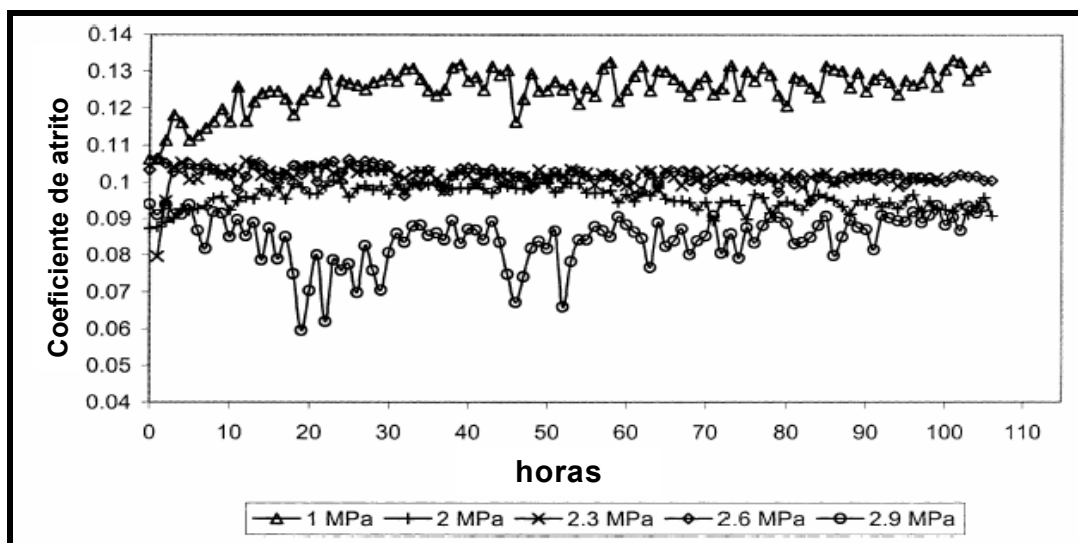
A figura 2.8 mostra a evolução dos coeficientes de atrito que foram obtidos em ambos os testes. A figura 2.8-a mostra a evolução do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos, em um dos testes realizado no equipamento SAE#II, e a figura 2.8-b, apresenta o comportamento do coeficiente de atrito para as diferentes pressões que foram utilizadas nos testes pino sobre disco, em função do tempo. Observa-se na figura 2.8 que em ambos os testes os coeficientes de atrito apresentam comportamentos semelhantes, onde se pode observar que os coeficientes de atrito crescem rapidamente no início dos ensaios e tendem a estabilização com a evolução dos ensaios. Ost; Baets; Degrieck (2001) também observaram que o coeficiente de atrito obtido no equipamento pino-sobre-disco, em uma determinada pressão de contato tende a diminuir com a evolução do ensaio, e que em outra pressão de contato o coeficiente de atrito tende a aumentar com a evolução do ensaio.

A figura 2.9 mostra a variação da rugosidade, devido o desgaste, das diferentes placas de pressão que foram utilizadas nos ensaios SAE#II. A rugosidade foi medida antes e após a realização dos ensaios. Em cada face da amostra, a rugosidade foi medida em dois diferentes pontos ($Ra1$ e $Ra2$), como mostrado na figura 2.9. Ost; Baets; Degrieck (2001) observaram

que a rugosidade das placas diminui com o decorrer dos testes. É importante observar que a rugosidade final somente é influenciada pela rugosidade inicial.



(a)



(b)

Figura 2.8: (a)- Comportamento do coeficiente de atrito nos testes SAE#II; (b)- Comportamento do coeficiente de atrito nos testes pino disco (Ost; Baets; Degrieck, 2001).

A figura 2.10 mostra a rugosidade média dos revestimentos utilizados nos testes pino sobre disco, antes e após a realização dos ensaios. Ost; Baets; Degrieck (2001) compararam esses resultados aos resultados obtidos nos ensaios SAE#II. Eles notaram que a variação da rugosidade é menor nos testes pino-sobre-disco, especialmente nos testes com pressão igual a 2.3 e 2.6 MPa. Observaram que, na pressão de 2.3 MPa, houve um aumento da rugosidade

superficial após o fim do teste. As amostras utilizadas nos dois tipos de equipamentos são do mesmo material e foram fabricadas nas mesmas especificações, mas não são do mesmo lote. As amostras utilizadas nos testes pino-sobre-disco apresentaram uma menor rugosidade superficial antes do início do teste, quando comparadas com as utilizadas nos ensaios SAE#II.

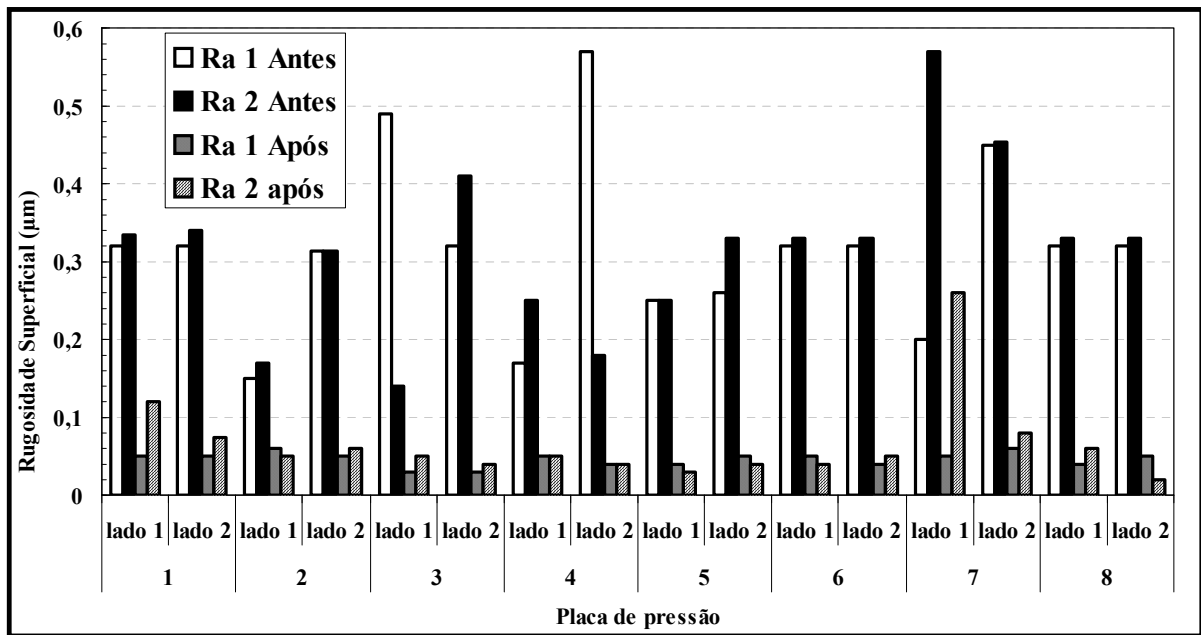


Figura 2.9: Variação da rugosidade superficial das placas de pressão utilizadas nos testes SAE#II (Ost; Baets; Degrieck, 2001).

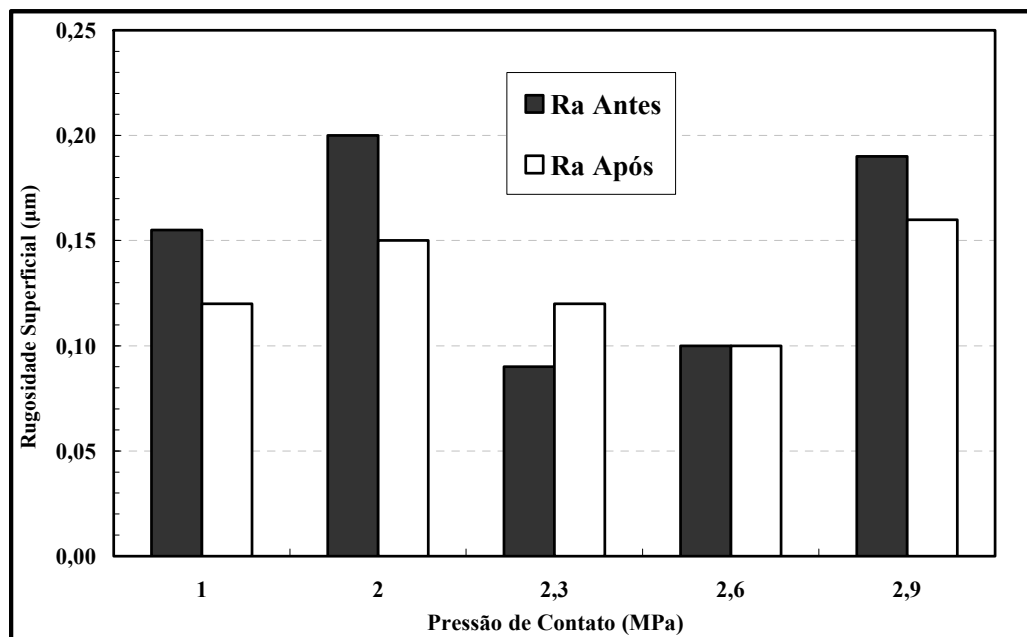


Figura 2.10: Rugosidade média dos revestimentos antes e após a realização dos ensaios nos testes pino disco (Ost; Baets; Degrieck, 2001).

A figura 2.11 mostra uma correlação entre o atrito, a taxa de desgaste e a rugosidade. Ost; Baets; Degrieck (2001) fizeram uma correlação entre o desgaste do revestimento e o decréscimo da rugosidade da placa de pressão. Notaram que, quando a placa de pressão apresenta uma baixa rugosidade, o revestimento apresenta menor variação de espessura. Ou seja, a variação da espessura do revestimento está relacionada com a rugosidade da placa de pressão. Uma das possíveis explicações para o desgaste do revestimento está associada com as variações da rugosidade no início dos testes. A figura 2.11 também mostra que o coeficiente de atrito apresenta um comportamento oposto ao da rugosidade. Ost; Baets; Degrieck (2001) observaram que para uma pressão de 1 MPa a rugosidade é baixa e o coeficiente de atrito é alto. Quando a rugosidade aumenta (2 MPa) o coeficiente diminui, e quando a rugosidade novamente diminui (2,3 MPa) o coeficiente de atrito aumenta e com o aumento da rugosidade nas pressões subseqüentes o coeficiente diminui. Isto pode ser explicado pelo fato de que quando se tem uma menor rugosidade haverá uma maior área real de contato entre as superfícies, aumentando o atrito.

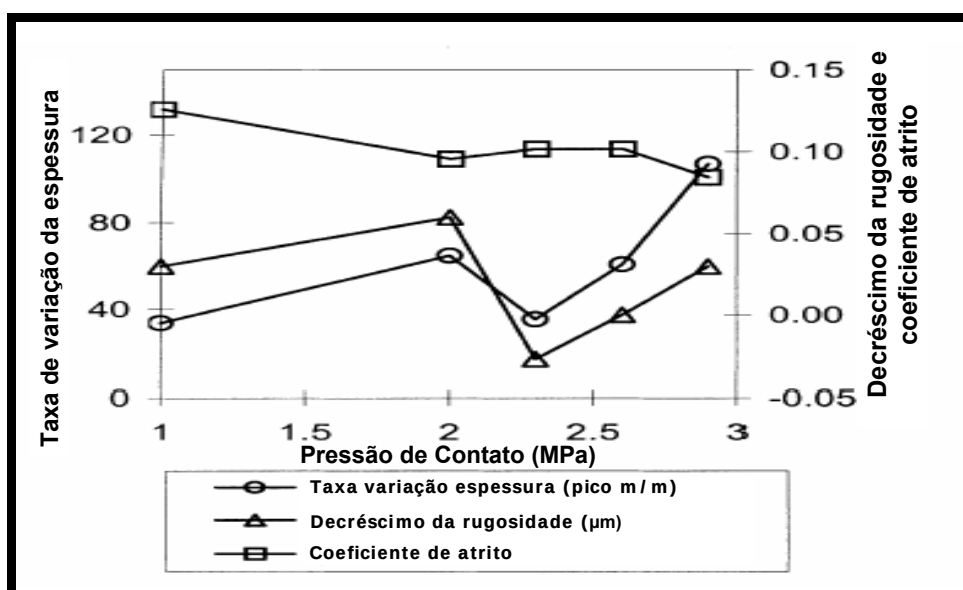


Figura 2.11: Correlação entre coeficiente de atrito, taxa de desgaste e rugosidade (Ost; Baets; Degrieck, 2001).

2.3 – Topografia de Superfície

Quando se observa a superfície de um sólido, por melhor que seja o acabamento atribuído, dificilmente a superfície será perfeitamente lisa e plana. Haverá na superfície uma variedade de imperfeições. Essas irregularidades presentes na superfície exercem uma forte

influência no comportamento tribológico (atrito, desgaste, entre outros), do material em estudo.

Quando duas superfícies estão em contato, o contato real deve ser relacionado ao contato microscópico. É de se esperar que a área real de contato seja muito menor que a área nominal, devido à existência das irregularidades ou imperfeições na topografia da superfície. O contato real entre duas superfícies inicialmente ocorrerá somente em alguns pontos. As áreas reais de contato aumentam proporcionalmente com a aplicação de uma força externa no sentido normal à superfície, devido à deformação dos picos das heterogeneidades superficiais ou asperezas conforme foi abordado por Hutchings (1992) e Stachowiak (2001). Uma representação esquemática do contato entre duas superfícies sólidas está representada na figura 2.12, onde pode se ver que o contato ocorre em algumas pequenas áreas isoladas como demonstrado na figura por A_i (área individual de contato), sendo que a verdadeira área total real de contato é a somatória de todas as áreas A_i .

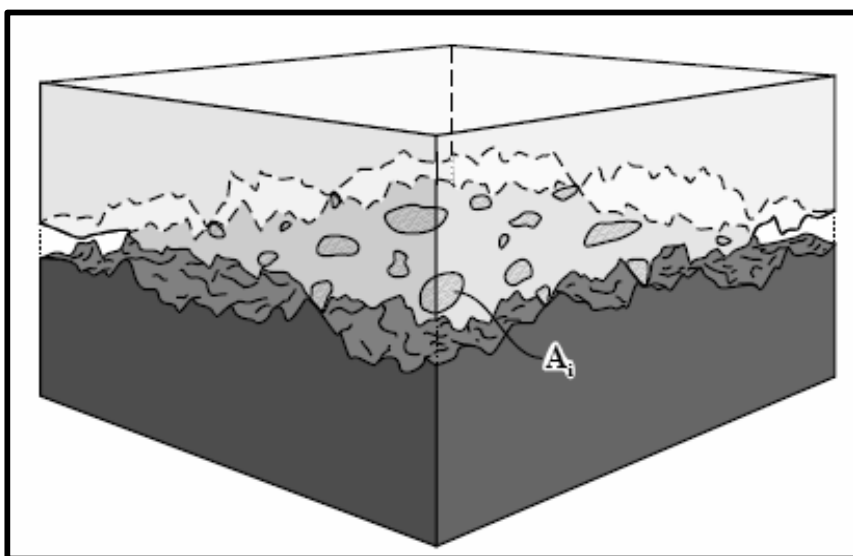


Figura 2.12: Representação esquemática do contato entre duas superfícies (Stachowiak 2001).

É importante destacar que Hutchings (1992) definiu as imperfeições ou irregularidades de pequena escala de uma superfície, como rugosidade.

Na maioria das vezes a representação gráfica de um perfil topográfico que são obtidos pelos equipamentos de medição, difere do perfil topográfico real. Geralmente mantém-se a escala na direção vertical constante e varia-se a escala na direção horizontal, comprimindo assim o perfil gerado pelo equipamento, para que seja possível obter pelo equipamento de medição todo o perfil topográfico da superfície em análise. Para um melhor entendimento, a figura 2.13 mostra uma representação, onde se tem um perfil topográfico com as escalas nas

direções x e y, iguais, e que a escala na direção x foi reduzida em 10 e 50 vezes em relação ao perfil original.

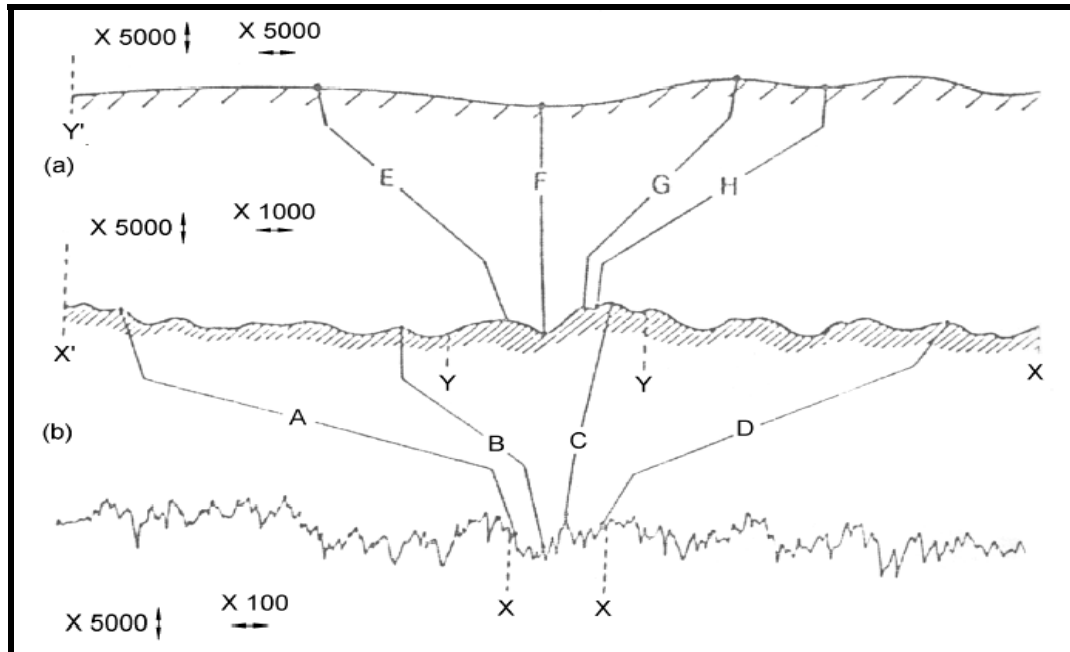


Figura 2.13: Exemplo de representação de um perfil de rugosidade (Dagnall, 1986).

É relevante esclarecer a diferença entre o conceito de rugosidade em relação aos erros de forma. Segundo Hutchings (1992), o erro de forma é uma medida do desvio de forma de uma superfície de sua forma ideal (por exemplo, plana, cilíndrica ou esférica). Este mesmo autor admite que a distinção entre estes dois conceitos é arbitrária.

Ainda, segundo Hutchings (1992), aliado a estes dois termos pode-se estabelecer o termo de ondulação de uma superfície. Sua definição é entendida como toda ondulação periódica que esteja em uma escala intermediária entre a rugosidade e o erro de forma.

Stout; Blunt (1995) e Stout et al (2000) definiram topografia de superfície como a forma geométrica composta pelos três principais componentes que são a forma, ondulação e a rugosidade. De acordo com Stout; Blunt (1995), geralmente, quando se caracteriza quantitativamente a topografia de superfície, convencionalmente somente a componente rugosidade é medida. As componentes forma e ondulação são eliminadas da topografia original, por métodos de filtragem.

A figura 2.14 mostra uma representação esquemática de um perfil topográfico original (primitivo) e os perfis das componentes, rugosidade, ondulação e forma, que foram extraídos do perfil primitivo, através da filtragem.

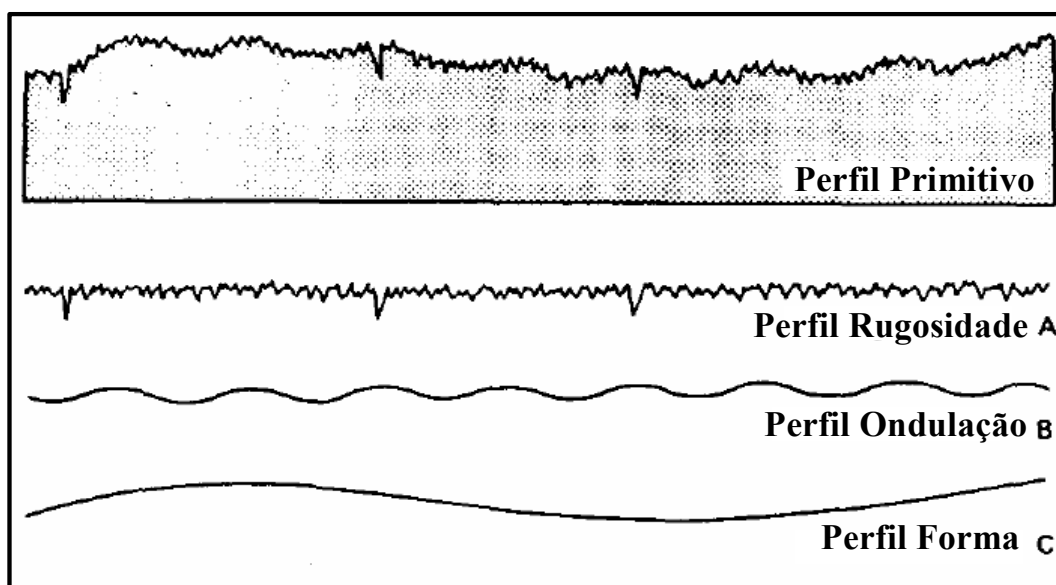


Figura 2.14: Representação esquemática de uma superfície antes e após a filtragem das componentes dos perfis rugosidade, ondulação e forma (Dagnall, 1986).

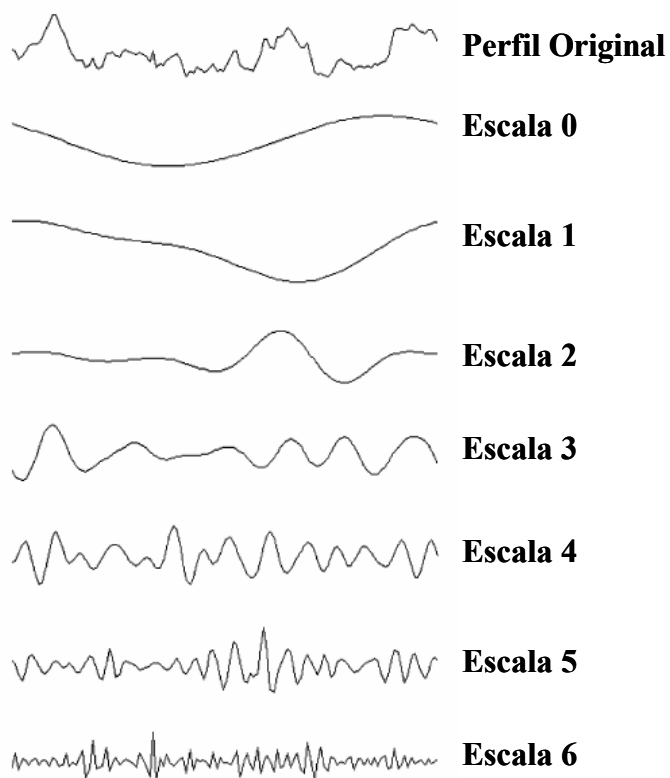
De acordo com Stout; Blunt (1995) e Raja; Muralikrishnan; Fu (2002), o que difere as componentes, rugosidade, ondulação e forma são os comprimentos de onda ou os espaçamentos entre os picos das irregularidades. Stout; Blunt (1995) afirmaram que o maior problema com esta definição é que o ponto onde a componente de rugosidade se torna componente ondulação é arbitrário, ou seja, depende da aplicabilidade do material. A componente rugosidade em uma determinada aplicabilidade pode ser componente ondulação para outro tipo de aplicação.

Ainda segundo Stout; Blunt (1995), algumas normas classificam a topografia de superfície em seis diferentes categorias. Essas classificações estão em função do tamanho do comprimento de onda, e as componentes, forma, ondulação e rugosidade são classificadas como primeira, segunda e terceira ordem.

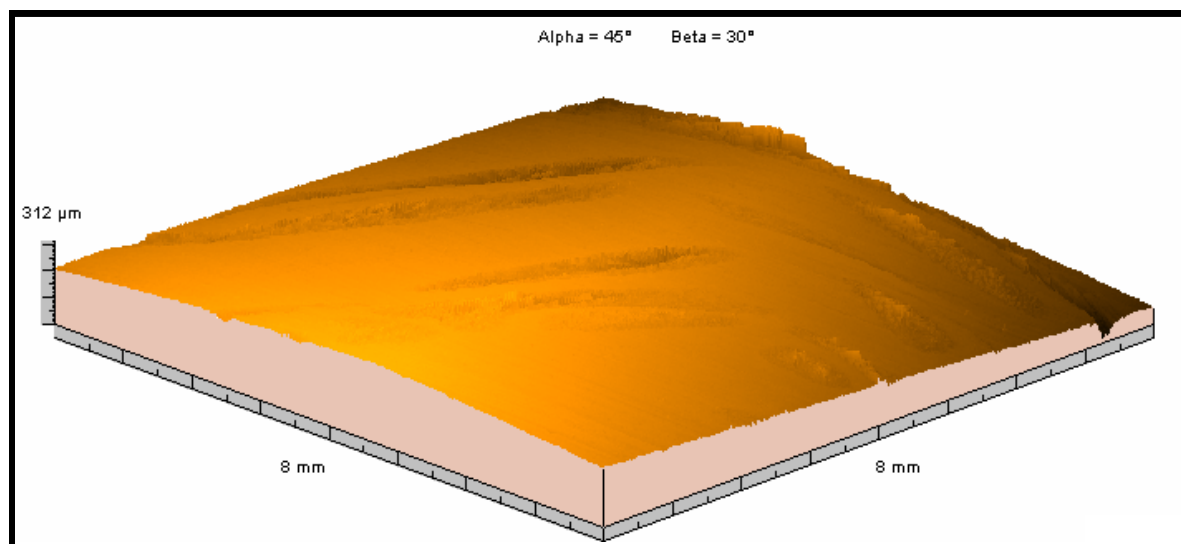
A figura 2.15-a apresenta um perfil topográfico de uma superfície, obtido por fundição, e que foi decomposto em seis diferentes categorias. A figura 2.15-b, mostra uma superfície em 3D de uma amostra de revestimento, obtida por interferometria a laser, contendo as três principais componentes que constituem a topografia de superfície.

Muitos trabalhos têm sido realizados para desenvolver novas técnicas e metodologias capazes de filtrar e extrair da topografia original as componentes, forma, ondulação e rugosidade, para que as mesmas possam ser estudadas e avaliadas individualmente (Bennett, 1992; Chen; Yang; Li, 1999; Dong; Mainsah; Stout, 1995; Hanada, 2007; Jiang; Blunt; Stout, 2001; Josso; Burton; Lalor, 2002; Lingadurai; Shunmugam, 2006; Pfeifer; Kurokawa; Meyer,

2001; Raja; Muralikrishnan; Fu, 2002; Stout; Blunt, 1995; Stout et al., 2000; Whitehouse, 2003).



(a)



(b)

Figura 2.15: (a)- Representação de um perfil que foi decomposto em seis diferentes categorias, de acordo com o comprimento de onda (Josso; Burton; Lalor, 2002); (b)- Topografia de revestimento em 3D, contendo as principais componentes que constituem a superfície: rugosidade, ondulação e forma.

A figura 2.16 mostra a topografia de duas superfícies diferentes, e as respectivas componentes de forma, ondulação e rugosidade que foram extraídas da superfície primitiva.

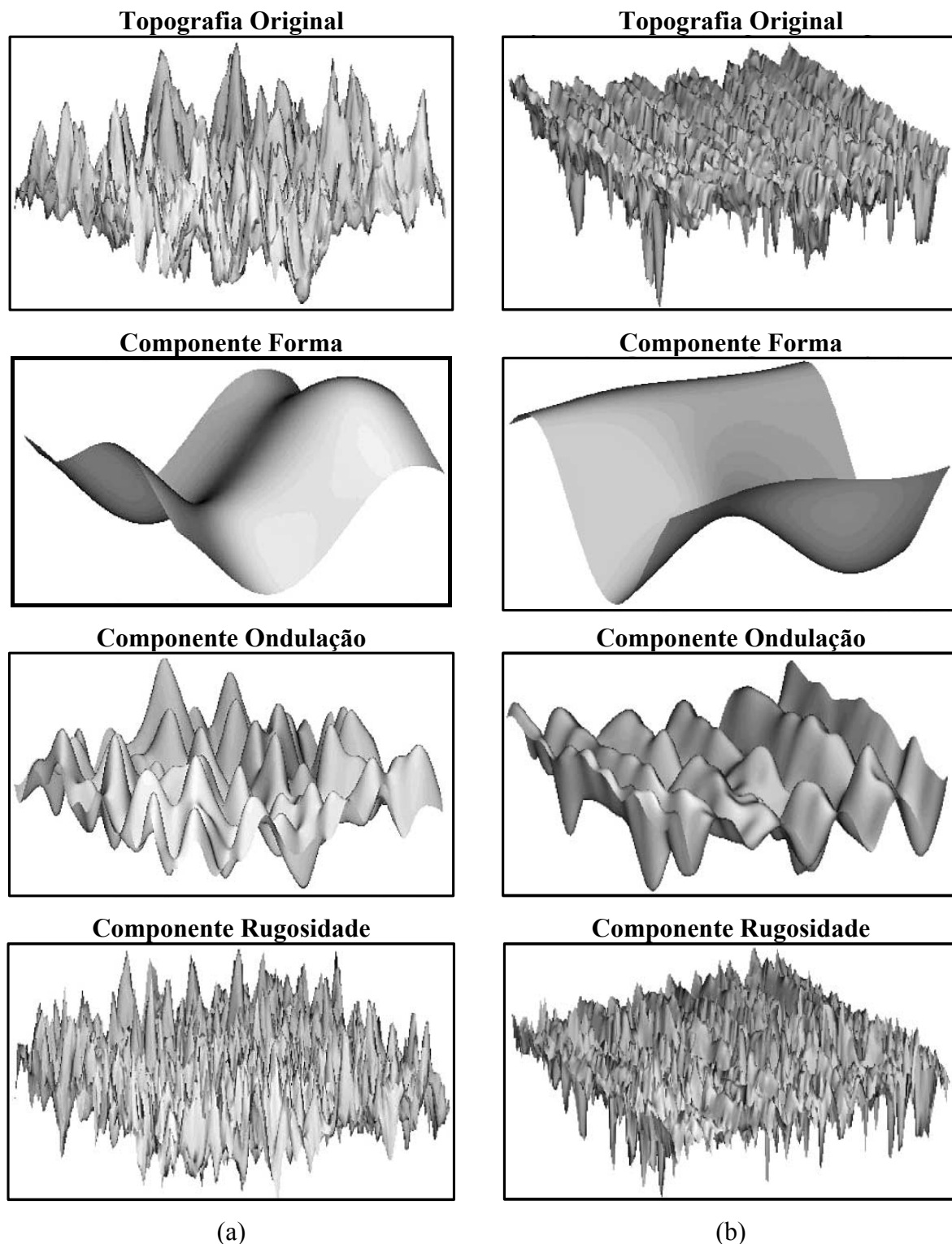


Figura 2.16: Decomposição das componentes, forma, ondulação e rugosidade, da superfície primitiva. (a)- topografia obtida por fundição; (b)- topografia obtida por usinagem (Josso; Burton; Lalor, 2002).

De acordo com Whitehouse (2003), a rugosidade é causada por diversos fatores, dentre eles, as marcas do processo produzidas pela ação da ferramenta cortante e o processo de manufatura. Os erros de ondulação são geralmente causados pela instabilidade do equipamento, tal como desbalanceamento, que conseqüentemente causa vibrações. E as divergências do erro de forma, em relação à forma ideal, podem ser causadas por diversos fatores, dentre eles a rigidez do equipamento.

2.3.1 – Parâmetros Quantitativos da Topografia de Superfície

A quantificação das irregularidades existentes na superfície é de grande importância para o entendimento de muitos fenômenos como o coeficiente de atrito e o desgaste do material. Por esta razão, a caracterização da rugosidade superficial tem sido o sujeito de diversos estudos teóricos e experimentais por muitas décadas.

Sua praticidade é inegável. É extremamente útil dispor de valores numéricos para a comparação e análise de superfície, seja para resumir diversas informações contidas em uma superfície tridimensional, ou mesmo para separar e classificar superfícies distintas, geradas por diferentes processos de fabricação, conforme foi apresentado.

Para a caracterização da topografia da superfície, muitos dos perfis de rugosidade analisados são obtidos por contato direto. Os métodos mais utilizados são através de um apalpador. No contato, usa-se um apalpador de diamante que descreve um perfil linear da topografia da amostra. Dois grandes efeitos podem modificar a aquisição do perfil analisado, e conseqüentemente fornecer através destes aparelhos, perfis de superfície que não retratem a realidade. Estes dois grandes efeitos são: a carga aplicada ao apalpador de leitura e o raio da ponta do apalpador.

Existem outros métodos para obter tais perfis sem o contato físico, através da interferometria ótica. Na caracterização da topografia por interferometria ótica não há contato com a superfície que está sendo avaliada. Um sensor ótico é responsável pela medição da posição da superfície durante o movimento linear da amostra.

A quantificação da topografia é feita utilizando métodos estatísticos. Segundo Gadelmawla et al (2002), a média aritmética do perfil, também conhecido como linha média central (CLA), é um dos parâmetros de rugosidade mais utilizado para caracterização e quantificação da topografia de superfície. Esse parâmetro pode ser definido como a média absoluta das alturas das irregularidades ao longo do perfil, e pode ser representado como a linha média de todo o perfil, como mostrado na figura 2.17, apresentada a seguir.

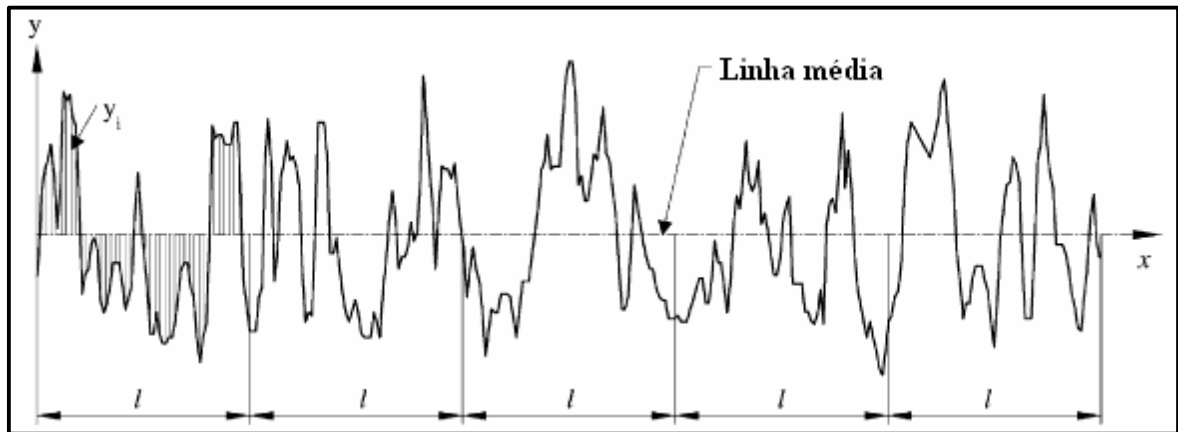


Figura 2.17: Definição da média aritmética do perfil (Ra) (Gadelmawla et al., 2002).

A definição matemática do parâmetro rugosidade média está apresentada na seguinte Eq. (2.1) (Hutchings, 1992).

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L [y(x)] dx \quad (2.1)$$

onde y é a altura do perfil, e L é o comprimento total do perfil que está sendo analisado.

O RMS (*Root Mean Square*) representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície (Gadelmawla et al., 2002). A Equação (2.2) mostra a definição matemática da rugosidade quadrática média (Rq) (Hutchings, 1992):

$$Rq = \frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx \quad (2.2)$$

Para muitas superfícies, os valores de Ra e Rq são similares. Para uma distribuição Gaussiana das alturas da superfície Rq é igual a 1,25 Ra (Hutchings 1992).

De acordo com Dong; Sullivan; Stout (1994) tradicionalmente os parâmetros de rugosidade como Ra e Rq são vistos como parâmetros que estão somente focados com os desvios relativos à linha média na direção vertical. Esses parâmetros não fornecem informações sobre a geometria, inclinação, tamanhos das irregularidades ou sobre a frequência de ocorrência dessas irregularidades. Segundo esses mesmos autores, é possível ter para diferentes materiais e perfis de superfície, os mesmos valores de Ra e Rq .

A figura 2.18 apresenta um exemplo de topografia de superfície com diferentes perfis, mas com o mesmo valor de Ra e Rq .

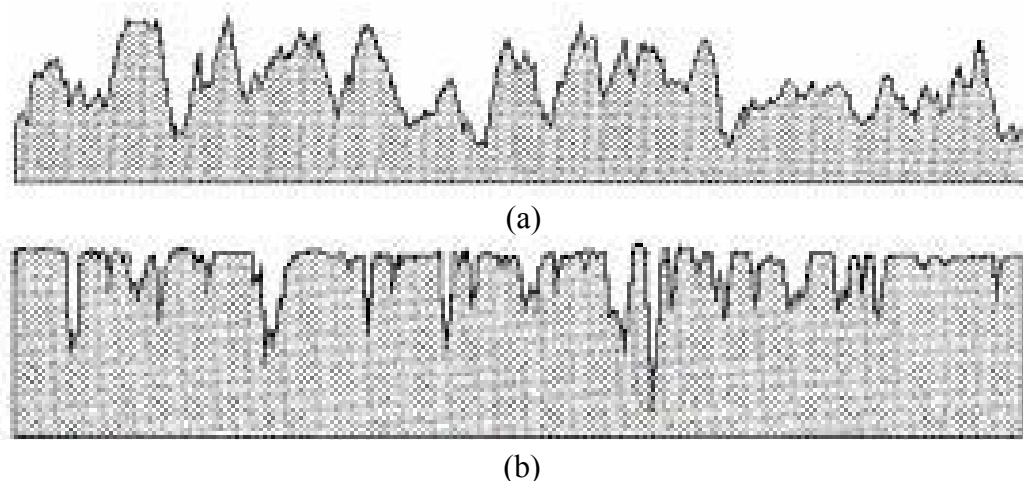


Figura 2.18: Topografia de superfície de diferentes materiais apresentando mesmo valor de R_a e R_q ($2,4 \mu\text{m}$); (a)- superfície não desgastada; (b)- superfície desgastada (Ripa et al., 2003 e Stout et al., 1977).

A figura 2.19 apresenta topografias de superfície obtidas via MEV, com o mesmo valor de R_q ($2,8 \mu\text{m}$), mas com aspectos topográficos bastante distintos. A figura 2.19-a mostra a topografia da superfície de uma amostra de aço ferramenta 700 Hv, que foi submetida a um ensaio abrasivo a três corpos. A figura 2.19-b apresenta também a topografia de superfície de um aço ferramenta 700 Hv, mas que foi submetido a um ensaio denominado de simulação multi-eventos, que faz simulação de desgaste abrasivo, onde foi utilizado um indentador Vickers, com uma carga aplicada de 37 gf, em uma área de $500 \times 500 \mu\text{m}$, com 5000 identações (Silva Jr, 2007).

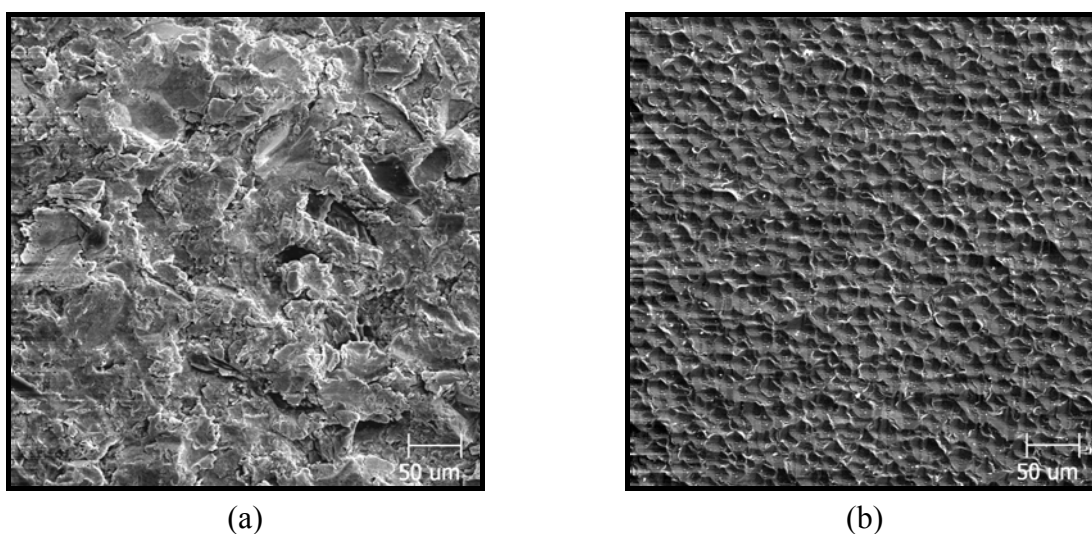


Figura 2.19: Topografias de superfície de aço ferramenta 700 Hv, com mesmo valor de S_q ($2,8 \mu\text{m}$), mas com diferentes aspectos topográficos. (a)- amostra submetida ao ensaio abrasivo; (b)- amostra submetida ao ensaio de simulação multi-eventos (Silva Jr, 2007).

Por esta e outras razões, vários outros parâmetros são utilizados para caracterizar a topografia da superfície. Quanto mais parâmetros forem utilizados, maior será a quantidade de informações obtidas da topografia, com uma caracterização mais precisa (Dong; Sullivan; Stout, 1994).

O parâmetro derivado da Curva de Abbott-Firestone, denominado de capacidade de suporte de carga ou capacidade de apoio (expresso pelo parâmetro T_p), é um parâmetro muito utilizado para obter informações da topografia de superfície.

A capacidade de apoio foi definida por Stout et al (2000) como: a proporção da área de contato que é obtida pelo truncamento ou corte dos picos de irregularidades por uma linha que está situada a uma determinada altura em relação à linha média. Para um melhor entendimento, a figura 2.20 ilustra esta definição.

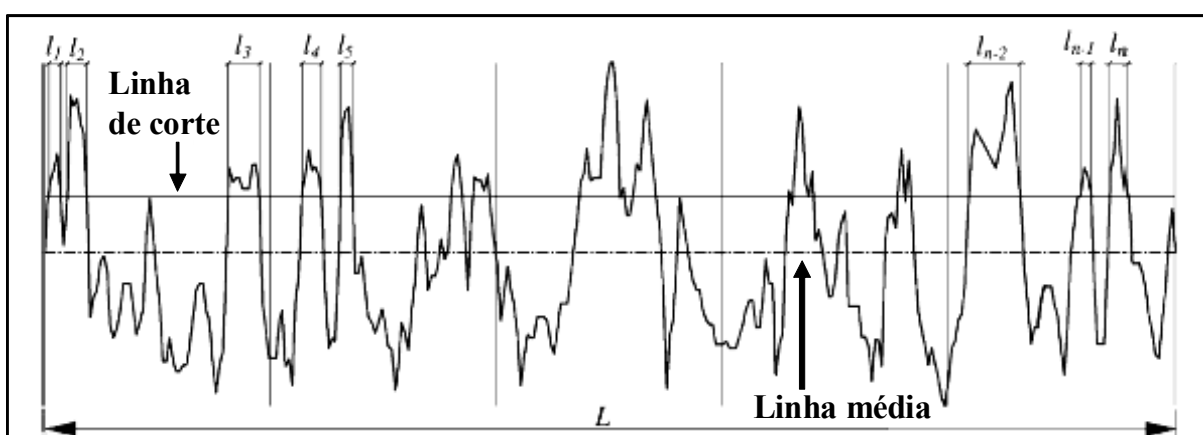


Figura 2.20: Perfil topográfico para o cálculo do comprimento da linha de apoio (T_p) (Gadelmawla et al., 2002).

Através da Equação (2.3), é possível determinar o comprimento da linha de apoio de um perfil que está situado a uma determinada altura, acima da linha média.

$$tp = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i \quad (2.3)$$

onde L é o comprimento do perfil avaliado (Gadelmawla et al., 2002).

Desta forma, para obter a área total de apoio, basta somar as linhas de apoio de cada perfil individual que constituem a topografia de superfície. A figura 2.21 mostra uma superfície que teve os picos das irregularidades arrancados devido às interações tribológicas, formando, então, uma nova superfície com uma determinada área de apoio.

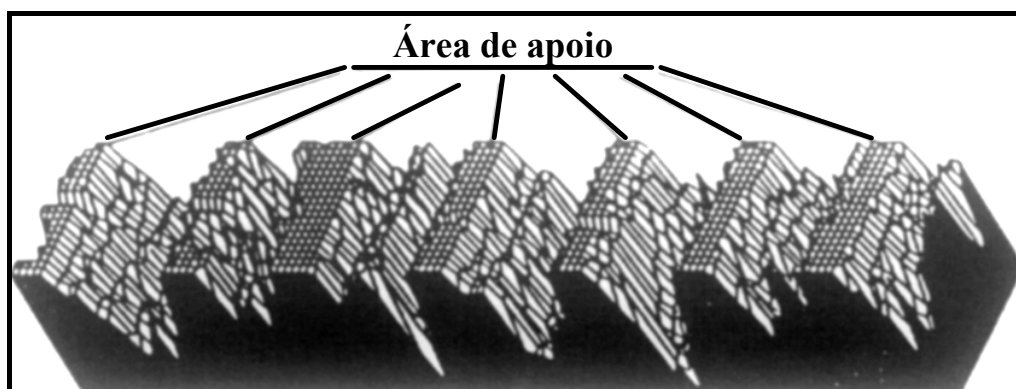


Figura 2.21: Representação da área de apoio de uma superfície (Stout et al., 2000).

A figura 2.22-a apresenta um perfil de rugosidade, com sua respectiva curva de Abbott-Firestone (figura 2.22-b) utilizada para determinar a capacidade de apoio da superfície. Nessa figura, z representa a distância perpendicular ao plano da superfície, e h é a altura da linha média do perfil.

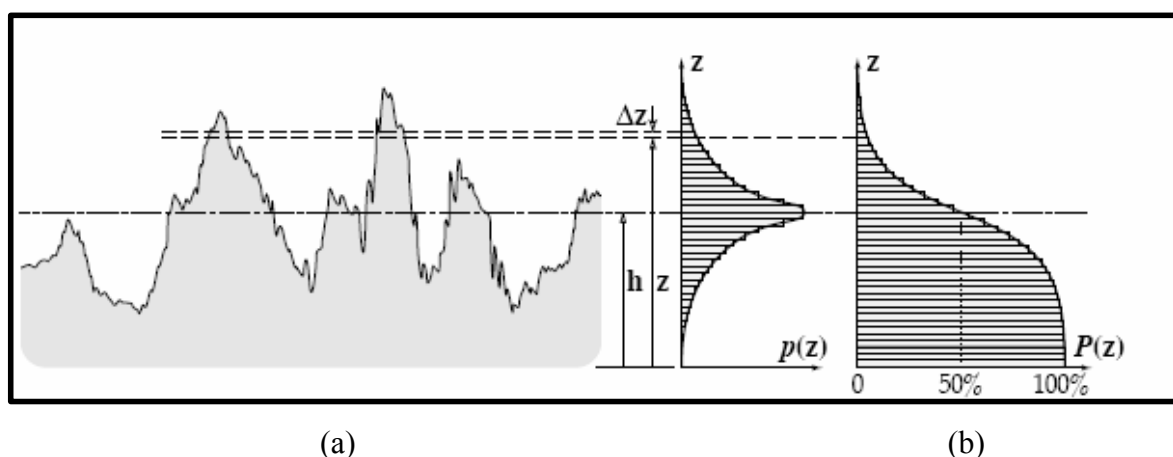


Figura 2.22: Perfil de rugosidade. (a)- perfil topográfico; (b)- curva representativa de Abbott-Firestone (Thomas, 1982).

Segundo Dong; Sullivan; Stout (1994), a curva de Abbott-Firestone é função da topografia da superfície e do nível considerado. Convencionalmente o eixo vertical do comprimento da curva de apoio está normalizado em conformidade com o pico máximo ao vale mais profundo (de 0 a 100%), e a origem está fixada no ponto onde o pico da irregularidade é máximo.

Para um perfil que está situado a uma determinada altura h , conforme está apresentado na figura 2.22-a, através da figura 2.22-b, a capacidade de apoio deste perfil é de aproximadamente 50%. Um perfil que estiver situado acima do perfil h apresentará capacidade de apoio menor do que 50%. Conseqüentemente um outro perfil qualquer que estiver situado abaixo do perfil de altura h , terá uma capacidade de apoio maior do que 50%.

De acordo com Stout et al (2000) e Dong; Sullivan; Stout (1994), há alguns problemas que estão associados com esta definição. A escala vertical do comprimento da curva de apoio é sensível aos dois pontos extremos, no qual apresenta as suas próprias vulnerabilidades, devido às variações da topografia de superfície. Ainda, segundo os autores, seria difícil obter os valores da capacidade de apoio dos planos da rugosidade quadrática média. Então para se ter uma melhor identificação do plano da rugosidade quadrática média, foi definido que o eixo vertical da curva de apoio teria a sua origem no plano da rugosidade quadrática média. O plano que estiver acima deste plano é escalado no eixo positivo, e o plano que estiver abaixo é escalado no eixo negativo.

Para um melhor entendimento, a figura 2.23 apresenta a curva de Abbott-Firestone com esta definição. O plano que está situado em zero no eixo vertical é a linha da rugosidade quadrática média (S_q).

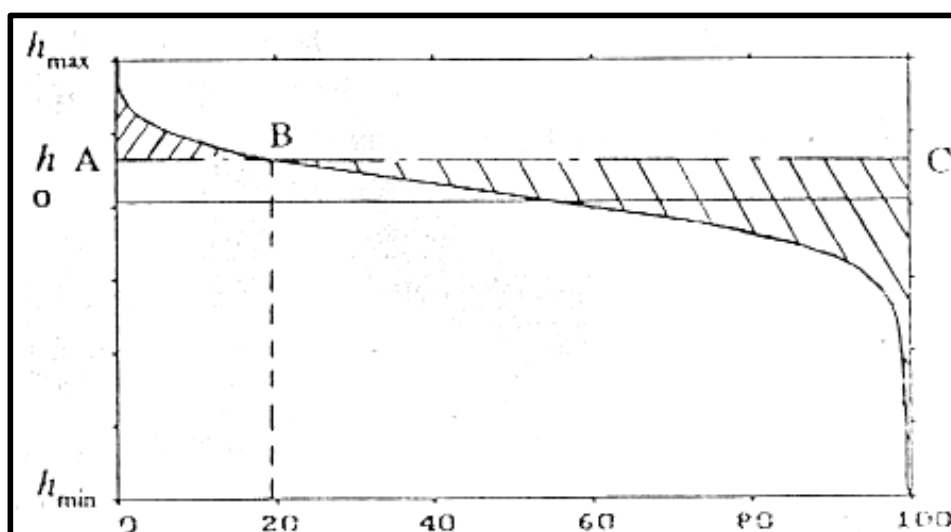


Figura 2.23: Curva de Abbott-Firestone com o plano da rugosidade quadrática média situado em zero no eixo da escala vertical (Dong; Sullivan; Stout, 1994).

A figura 2.24 expressa a variação da porcentagem de apoio entre uma superfície que tem 1% de capacidade de apoio (plano de referência) e a superfície situada três micrômetros abaixo dela (plano desgastado). Como estes valores não são normatizados, eles podem ser definidos pelo usuário de acordo com as aplicações.

Uma outra grande vantagem em estudar a superfície com a ajuda da curva de Abbott-Firestone é a possibilidade de simular o efeito do desgaste e o processo de regime transiente. Além disto, esta curva fornece informações sobre o volume de material e volume de vazios, caracterizando ainda mais a topografia da superfície.

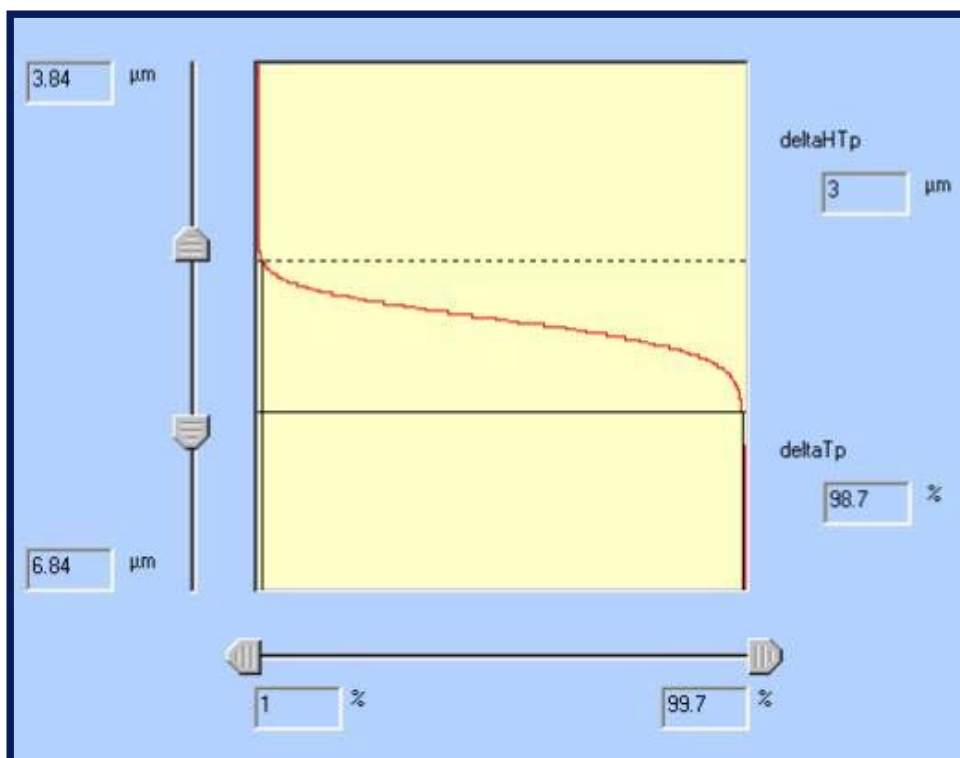


Figura 2.24: Curva de Abbott-Firestone para uma superfície situada 3 μm abaixo da superfície que têm uma capacidade de apoio de 1% (MountainsMap[®] Software from Digital Surf).

A figura 2.25 mostra uma seção do volume de material, V_m , e o volume de vazio, V_v . Os volumes estão em função da profundidade do plano de corte, a uma determinada altura h . No ponto mais alto, quando h é igual a $h_{\text{máx}}$, o volume de material é zero e o volume de vazio é máximo. Da mesma forma, no ponto mais baixo quando h é igual a $h_{\text{mín}}$ o volume de material é máximo e o volume de vazio é zero.

O volume de material é definido como a porção de material existente entre o plano de truncamento ou plano de corte, que é paralelo ao plano médio, e a superfície interfacial acima do plano de truncamento. O volume de vazio é uma função complementar do volume de material, isto é, o volume de ar existente entre o plano de corte em um dado nível paralelo ao plano médio, e a superfície interfacial inferior ao plano médio.

Como foi visto na figura 2.23, o plano de corte a uma determinada altura h em relação ao plano de referência, intercepta a curva da área de apoio no ponto B, para uma capacidade de apoio igual a 20%. O comprimento AB é, portanto, a porção da área da superfície de apoio para este plano. A área contida entre a linha AB e a curva da área da superfície de apoio acima da linha AB é o volume de material. Da mesma forma, o volume de vazio é a área existente entre a linha BC e a curva da área da superfície de apoio abaixo da linha BC.

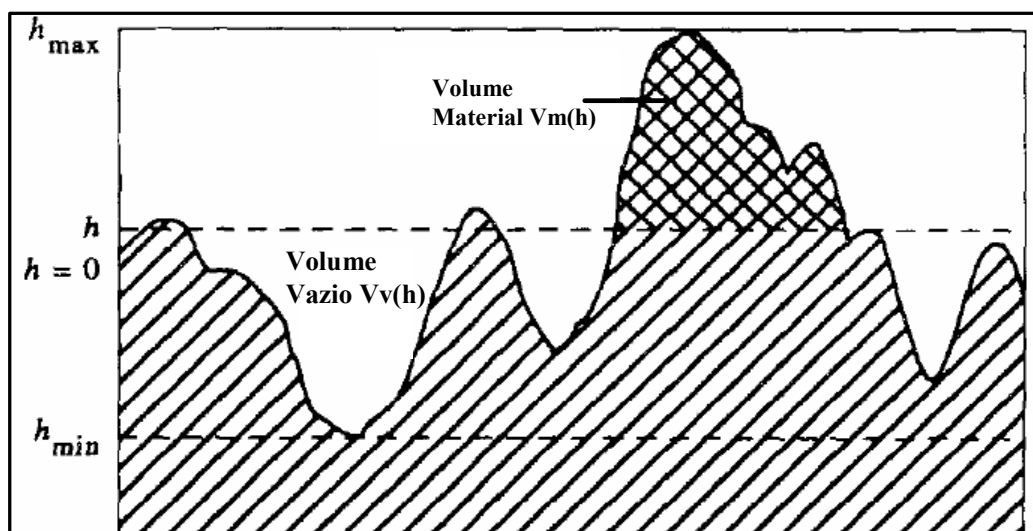


Figura 2.25: Representação do volume de material e volume de vazios (Stout et al., 2000).

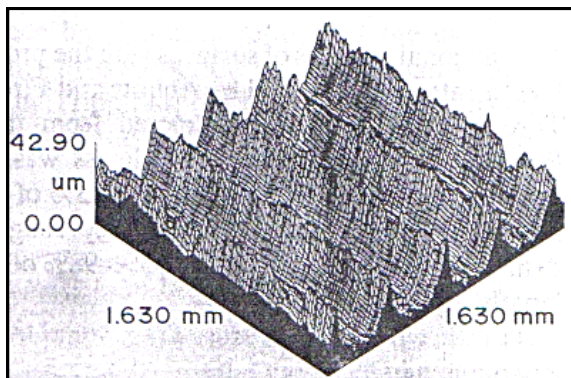
Análise de superfícies usando o parâmetro capacidade de suporte de carga teve início em 1933, por Abbott e Firestone. Três zonas foram extraídas da curva de Abbott-Firestone. A primeira constituída de picos rugosos definidos como variação das alturas de 2% a 25% do comprimento da superfície de apoio. A segunda zona definida como rugosidade média, fixada entre 25-75% da superfície de apoio, e a terceira zona definida como rugosidade de vales fixada entre 75-98% da superfície de apoio (Dong; Sullivan; Stout, 1994).

Nos trabalhos realizados por Kjeldsteen (1994; 1997), as zonas da curva de Abbott-Firestone tiveram cinco intervalos: $\leq 5\%$, 5-10%, 50-95% e $\geq 95\%$.

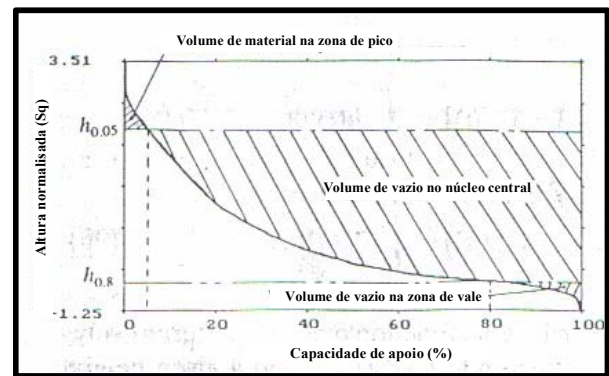
As figuras 2.26 a 2.28 mostram topografia de superfícies típicas de engenharia, e as suas respectivas curvas de Abbott-Firestone.

Na figura 2.26-a a topografia é de uma superfície usinada por furação, cujo aspecto topográfico pode representar também uma superfície torneada ou conformada. Observa-se nesta figura que a superfície apresenta arestas pontiagudas e um grande volume de vazio, mostrado na figura 2.26-b pela grande curvatura côncava na parte média da curva de Abbott-Firestone. Através desta análise pode-se concluir que a capacidade de apoio desta superfície é muito baixa.

A figura 2.27-a, por sua vez, apresenta um outro tipo de superfície. Uma superfície que foi submetida ao processo de brunimento e que é composta de platôs na qual tem-se um achatamento superior e sulcos significativos. Observando a figura 2.27-b, obviamente este tipo de superfície pode apresentar uma grande capacidade de apoio, que pode ser refletido pelo declive negativo relativamente pequeno, na parte média da curva de Abbott-Firestone.

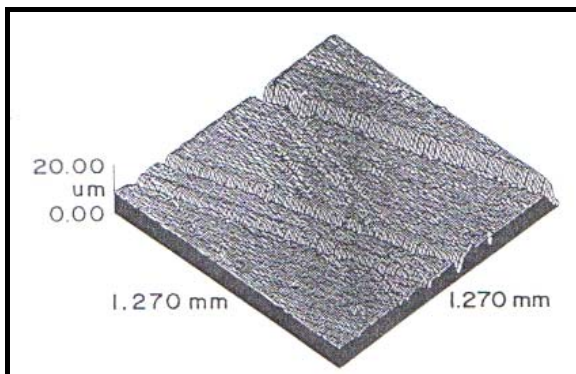


(a)

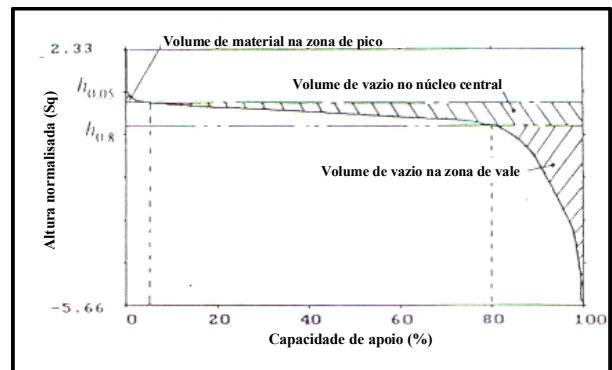


(b)

Figura 2.26: Amostra usinada. (a)- Topografia da superfície; (b)- Curva de Abbott-Firestone (Dong; Sullivan; Stout, 1994).



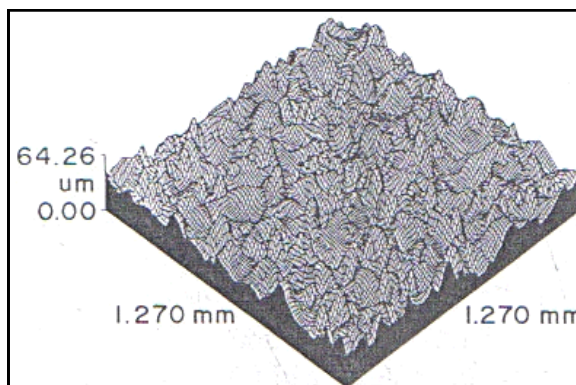
(a)



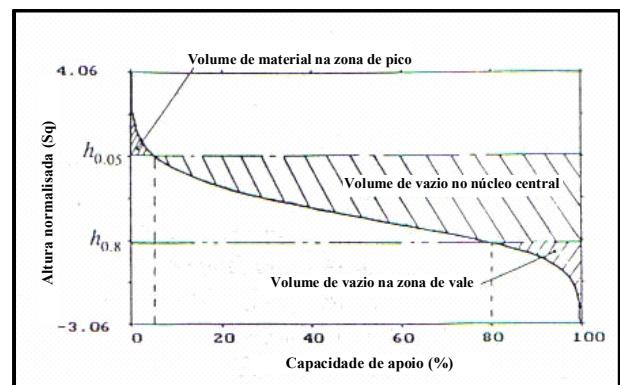
(b)

Figura 2.27: Amostra submetida ao processo de brunimento. (a)- Topografia da superfície; (b)- Curva Abbott-Firestone (Dong; Sullivan; Stout, 1994).

A figura 2.28, por sua vez, apresenta uma topografia de superfície típica de uma amostra que foi usinada por eletro-erosão ou jateadas com areia.



(a)



(b)

Figura 2.28: Amostra obtida por eletro-erosão (EDM). (a)- Topografia da superfície; (b)- Curva de Abbott-Firestone (Dong; Sullivan; Stout, 1994).

Observa-se na figura 2.28 que a capacidade de apoio desta superfície apresenta um valor intermediário ao apresentado pela topografia usinada por furação e a superfície brunida.

Estes resultados mostram que a capacidade de apoio de uma superfície é dependente da topografia de superfície do material.

O R_t é outro parâmetro muito utilizado para caracterizar topograficamente a superfície em análise. O R_t é definido como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade (Gadelmawla, 2002). A figura 2.29 mostra essa definição.

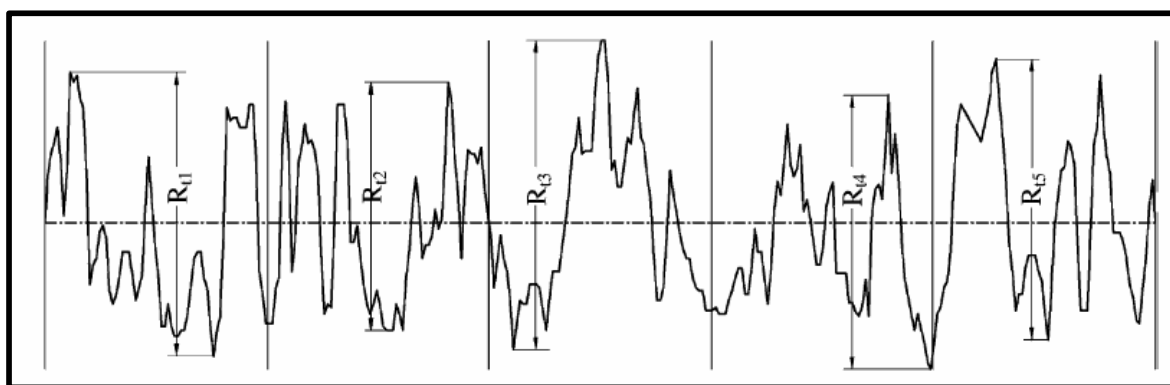


Figura 2.29: Definição do parâmetro distância máxima entre picos e vales (R_t) (Gadelmawla, 2002).

O comprimento do perfil topográfico padrão para os cálculos dos parâmetros topográficos, é dividido em cinco seções. Em cada seção é calculada a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo, compondo, assim, cinco valores de distância, por comprimento do perfil ($R_1...R_5$). O R_t é então calculado como a média dessas distâncias adquiridas ao longo do perfil de rugosidade (Gadelmawla, 2002).

CAPÍTULO III

MECANISMOS DE DESGASTE

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

A primeira etapa do trabalho consistiu em caracterizar os mecanismos de desgaste atuantes nas embreagens utilizadas em condições reais. Após esta etapa, deu-se início à caracterização mecânica e micro-estrutural das amostras industriais e laboratoriais, buscando obter uma similaridade entre as amostras. Então, após esta fase, houve a realização dos primeiros ensaios laboratoriais, buscando simular o sistema tribológico de uma embreagem.

Para a realização destas atividades foram enviados ao Laboratório de Tribologia e Materiais alguns conjuntos de embreagens utilizados em campo. As amostras obtidas dessas peças, para caracterização topográfica, micro estrutural, propriedades mecânicas e dos mecanismos de desgastes, foram denominadas neste trabalho de amostras industriais.

Uma outra série de amostras utilizadas para a realização dos ensaios laboratoriais é denominada neste trabalho de amostras laboratoriais. Tanto o fornecimento das amostras industriais quanto a produção de todas as amostras laboratoriais utilizadas neste trabalho, foram realizadas pela empresa ZF_SACHS do Brasil.

3.1 – Caracterização dos Mecanismos de Desgaste

Os conjuntos de embreagens utilizados foram classificados em quatro tipos diferentes. A tabela 3.1 apresenta a nomenclatura e as principais características dos componentes estudados. Os conjuntos pequenos utilizados na linha leve como carros de passeio têm dimensões de 215 mm de diâmetro externo. O conjunto grande utilizado geralmente na linha pesada, como caminhões e ônibus têm dimensões de 430 mm de diâmetro externo. Devido às suas grandes dimensões, foram retiradas amostras das peças enviadas. Para a realização dos

cortes das amostras da placa de pressão e dos revestimentos, utilizou-se o equipamento discotom (Struers) e o disco abrasivo de corte AA2 (Struers). As amostras do volante do motor foram obtidas através do processo de eletro-erosão (Engemac NC 40A).

Tabela 3.1: Características dos componentes estudados.

Conjunto	Geometria	Aplicação	Material Analisado
A	Conjunto pequeno $\varnothing = 215$ mm	Radio Táxi	a - Revestimento placa pressão b - Revestimento do volante c - Placa de pressão d - volante
B	Conjunto pequeno $\varnothing = 215$ mm	Radio Táxi	a - Revestimento placa pressão b - Revestimento do volante c - Placa de pressão d - Volante
C	Conjunto pequeno $\varnothing = 215$ mm	Radio Táxi	a - Revestimento placa pressão b - Revestimento do volante c - Placa de pressão d - Volante
D	Conjunto grande $\varnothing = 430$ mm	Ônibus da Empresa Passaro Marrom	a - Revestimento placa pressão b - Revestimento do volante c - Placa de pressão d - Volante

As figuras 3.1 a 3.3 mostram os principais componentes de uma embreagem, e as amostras retiradas destes componentes, e as áreas que foram analisadas nessas amostras.

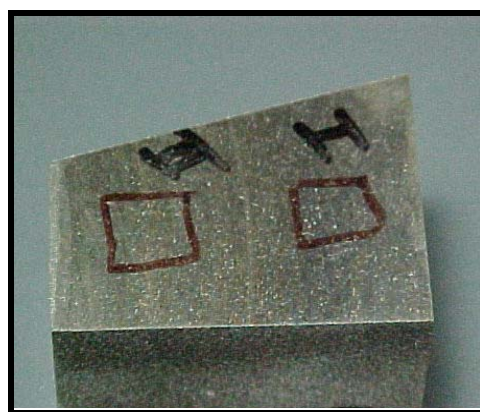
Após a realização do corte das amostras, as amostras metálicas retiradas da placa de pressão e volante foram limpas com solução de acetona e álcool em ultra-som por um período de dez minutos em cada processo. Os revestimentos foram limpos com o auxílio de um jato de ar comprimido, por serem um material de fácil absorção de líquido, não havendo a possibilidade dos mesmos serem limpos pelo processo utilizado na limpeza das amostras metálicas.

Após a etapa de limpeza, a superfície dos revestimentos foi coberta por uma camada de ouro utilizando o equipamento EMITECH K550, com a finalidade de aumentar a refletividade das superfícies quando submetidas a análises interferométricas, e para que as mesmas pudessem também ser analisada via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As amostras foram avaliadas topograficamente em um interferômetro a laser tridimensional da UBM MESSTECHNIK GmbH, modelo Microfocus Expert IV. Todas as áreas analisadas tiveram dimensões de 5 x 5 mm. A densidade de pontos adotada foi de 1000 (x) x 50 (y), no modo contínuo.

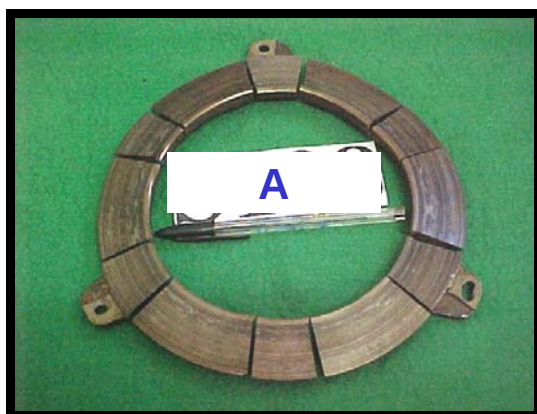


(a)

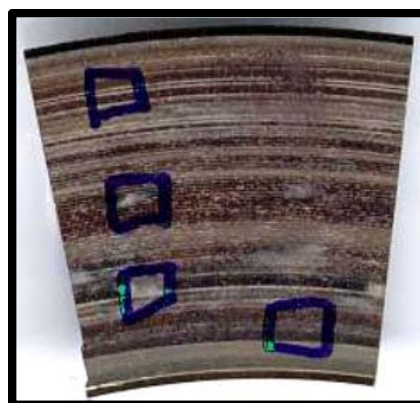


(b)

Figura 3.1: (a)- Volante do conjunto A, após realização do corte da amostra; (b)- áreas na amostra onde foram realizadas as análises.

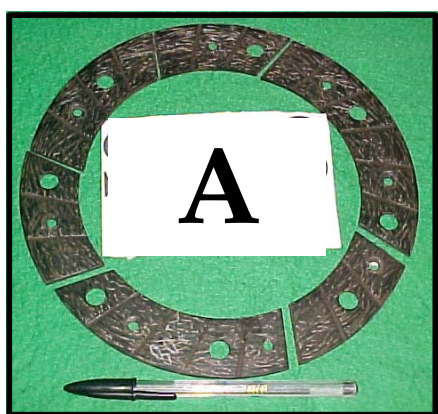


(a)



(b)

Figura 3.2: (a)- Placa de pressão do conjunto A, após a realização dos cortes para retirar a amostra; (b)- áreas nas amostras onde foram feitas as análises.



(a)



(b)

Figura 3.3: (a)- Revestimento lado da placa de pressão, após a realização do corte; (b)- áreas na amostra onde foram feitas as análises.

Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura – MEV (Modelo Leo 940 A, fabricante Zeiss), para caracterizar os mecanismos de desgaste atuantes. Todas as fotos, obtidas no MEV, foram realizadas com as amostras inclinadas de 35° em relação ao plano horizontal.

3.2 – Simulação Laboratorial

3.2.1 - Amostras Laboratoriais

A produção das amostras laboratoriais foi realizada após uma análise dos mecanismos de desgaste que atuam nos conjuntos de embreagens submetidos às condições reais de uso, afim de que fossem produzidas amostras capazes de simular em laboratório estes mesmos mecanismos de desgaste. Para a realização dos estudos tribológicos, foram confeccionadas amostras laboratoriais de revestimento (corpo) e amostras de placa de pressão (contra-corpo). A tabela 3.2 traz as características destas amostras e a figura 3.4 apresenta estas amostras.

Tabela 3.2: Características das amostras laboratoriais utilizadas nos ensaios preliminares.

Amostra	Tipo de Material	Geometria	Quantidade
Revestimento (Corpo)	A B C D	$\varnothing = 8 \text{ mm}$	5 de cada tipo de revestimento
Placa de Pressão (Contra-Corpo)	Ferro Fundido Cinzento	$\varnothing_{\text{ext}} = 76 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{int}} = 8 \text{ mm}$	20



(a)



(b)

Figura 3.4: Amostras utilizadas na realização dos estudos e dos ensaios tribológicos preliminares: (a)- revestimento; (b)- placa de pressão.

3.2.2 – Caracterização Mecânica

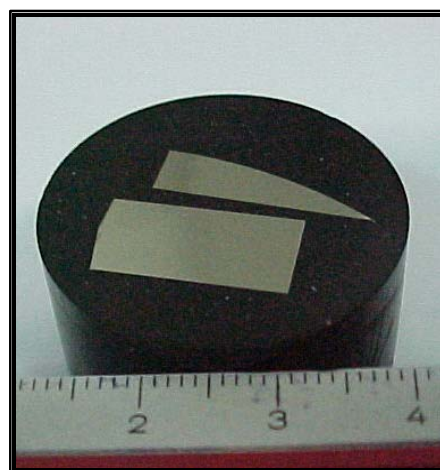
As amostras metálicas industriais e laboratoriais foram caracterizadas mecanicamente quanto à dureza. Os ensaios de dureza foram realizados na superfície ativa, ou seja, na superfície desgastada das amostras industriais e na superfície a ser desgastada, nas amostras laboratoriais. Para a medição do teste de dureza utilizou-se um Durômetro Universal da marca Wolpert. O método utilizado foi o Brinell. Utilizou-se um identador esférico de diâmetro 2,5 mm. A carga aplicada foi de 187,5 kg. Foram realizados cinco identificações em cada amostra, com o tempo de trinta segundos na aplicação da carga para cada identificação.

3.2.3 - Caracterização Micro-Estrutural

A análise micro-estrutural foi realizada através de análise metalográfica por microscopia ótica. Para analisar a microestrutura das amostras laboratoriais da placa de pressão, selecionaram-se aleatoriamente dez amostras, das cem amostras que foram enviadas. Após a seleção, as superfícies das placas de pressão que seriam submetidas aos ensaios de deslizamento foram protegidas com uma camada de laquê, com a finalidade de evitar quaisquer danos que pudessem alterar as topografias de superfície. As amostras foram cortadas em duas partes, obtendo-se duas amostras, conforme figura 3.5-a. Para a realização do corte das amostras laboratoriais, utilizou-se o equipamento discotom (Struers), e o disco abrasivo de corte AA2 (Struers). As amostras cortadas foram embutidas a quente em resina epóxi com fibra mineral utilizando o equipamento Tempopress 2 (Struers), figura 3.5-b.



(a)



(b)

Figura 3.5: (a)- cortes realizados na amostra laboratorial da placa de pressão para preparação metalográfica; (b)- embutimento mostrando seção transversal e longitudinal da placa de pressão.

A figura 3.5-b mostra que as amostras foram embutidas de tal forma que possibilitasse a preparação metalográfica das seções transversal e longitudinal. Após o embutimento, as amostras foram lixadas com lixas abrasivas de SiC a prova d'água com granulometrias de #80, #120, #220, #320, #400, #600, #1200 mesh. Em seguida, as superfícies foram polidas com pasta diamantada Struers de $3\mu\text{m}$ (DP $3\mu\text{m}$), durante o tempo de dez minutos no equipamento politriz (Struers Dap-7), utilizando um pano duro Struers. Foi utilizado o óleo de lapidação (lap-oil-c), com a finalidade de refrigerar e lubrificar as superfícies das amostras. Depois de polidas, as amostras foram lavadas com algodão e detergente em água corrente, para retirar todo o óleo e qualquer impureza que pudesse existir na superfície. Na sequência, as amostras foram polidas com solução de alumina de $0,06\mu\text{m}$ (Al_2O_3 - $0,06\mu\text{m}$), durante o tempo de cinco minutos e sempre lubrificando com óleo de lapidação (lap-oil-c). Após este processo, as amostras foram novamente lavadas em água corrente e secadas com o auxílio de um jato de ar quente.

Vale ressaltar que foi adotado o mesmo procedimento descrito anteriormente na preparação metalográfica das amostras industriais.

Após o polimento, para a caracterização da morfologia da grafita (forma, tipo e tamanho) foram feitas fotomicrografias dos veios de grafita, em um sistema de processamento de imagens utilizando o programa Image-Pro Plus TM da Media Cybernetics, versão 2.0, acoplado a um microscópio Neophot 21 da CarlZeiss – Jena.

A porcentagem volumétrica de grafita e os parâmetros morfológicos das amostras foram obtidos através do programa de análise de imagens ImageTool for Windows 3.0 (UTHSCSA ImageTool). Foram realizadas fotomicrografias em cada amostra, perfazendo um total de 100 fotomicrografias para as amostras laboratoriais. Para as amostras industriais, foram realizadas 5 fotomicrografias, perfazendo um total de 40 fotomicrografias para as amostras industriais.

Para a caracterização da micro-estrutura das amostras, após a realização das fotomicrografias dos veios de grafita, as superfícies foram atacadas com uma solução de Nital de 2%. As fotomicrografias das superfícies das amostras atacadas com Nital 2% foram realizadas no mesmo equipamento onde foram realizadas as fotomicrografias dos veios de grafita. Foram realizados 3 fotomicrografias para análise micro-estrutural das amostras industrial e laboratorial.

3.2.4 – Ensaios Laboratoriais

Os ensaios tribológicos de deslizamento foram realizados em um tribômetro universal da Plint & Partners, modelo TE 67, com controles computadorizados, conforme figura 3.6. Este tribômetro possibilita a realização de ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino-sobre-disco e alternado, com cargas variando desde 2 N, utilizando um sistema de peso morto, até 1000 N, utilizando um sistema de aplicação de carga pneumático. O equipamento é interligado a um microcomputador que armazena os dados colhidos na forma de uma planilha, com uma taxa de aquisição de dados de até 10 Hz.

Foram realizados ensaios na configuração pino sobre disco, sem lubrificação, mantendo constantes os parâmetros tribológicos como carga, velocidade de rotação da placa de pressão e distância do centro de rotação da placa de pressão ao pino porta-amostra contendo a amostra do revestimento (figura 3.6-b). Esta configuração está classificada na categoria VI, de acordo com as classificações dos sistemas tribológicos propostos por Uetz; Sommer; Khosrawi (1981) e Czichos (1985).

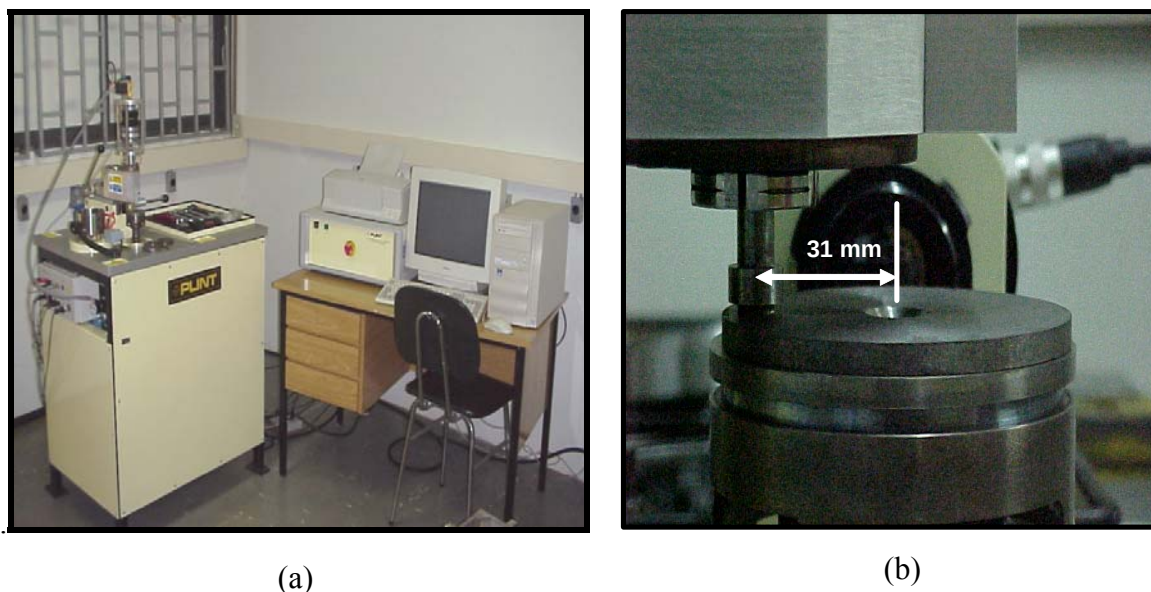


Figura 3.6: (a)- Tribômetro Plint TE 67; (b)- Detalhe do equipamento mostrando a distância do centro de rotação ao pino porta-amostra.

Nestes ensaios, amostra de revestimento devidamente limpa, é mantida em uma montagem fixa que não se move no plano horizontal. Esta amostra está apoiada sobre a superfície da amostras da placa de pressão, sob uma carga conhecida aplicada. Durante os ensaios, como a amostra da placa de pressão gira com uma velocidade de rotação constante, e

sendo à distância do centro da placa de pressão a amostra do revestimento constante, tem-se uma velocidade de deslizamento constante.

Os parâmetros medidos e monitorados ao longo dos ensaios foram a força tangencial e a temperatura da superfície da placa de pressão, todos adquiridos com uma taxa de aquisição de 1 Hz. O coeficiente de atrito é calculado pelo próprio tribômetro, através da razão entre a força tangencial, que é medida através de uma célula de carga e a força normal.

As condições tribológicas usadas nos ensaios para validação dos mesmos utilizando o tribômetro são mostradas na tabela 3.3. Os ensaios foram realizados com a finalidade de tentar reproduzir no laboratório os mecanismos que atuam em condições reais.

Tabela 3.3: Parâmetros laboratoriais dos ensaios tribológicos preliminares.

PARÂMETROS	VALORES
Velocidade de rotação (RPM)	750
Força Normal (N)	8,8
Tempo de Teste (h)	1
Raio (mm)	21
Meio	Ar Ambiente
Lubrificação	Sem

A taxa de desgaste do par de amostras (revestimento e placa de pressão) foi determinada através de pesagem. Os pares de amostra foram limpos antes e após a realização dos ensaios. As placas de pressão foram limpas com acetona em ultra-som por um tempo de dez minutos. Após a limpeza, as placas de pressão foram secas com o auxílio de um jato de ar quente.

Os revestimentos foram limpos por um jato de ar comprimido sob sua superfície, devido como já mencionado anteriormente serem materiais de fácil absorção de líquido. O tempo de aplicação deste jato de ar comprimido foi em torno de 30 segundos. Após serem limpas, as amostras foram pesadas três vezes, fazendo-se, então, uma média dos valores. As amostras de revestimentos foram pesadas na balança Sartorius modelo MC 210 S, que tem uma precisão de 10^{-5} g e capacidade máxima de pesagem de 200 gf e as amostras das placas de pressão foram pesadas na balança OHAUS Analytical Standard modelo AS1205, que tem precisão de 10^{-2} , devido a massa das amostras da placa de pressão serem superiores a 200 gf.

As superfícies das amostras foram analisadas antes e após a realização de cada ensaio por interferometria a laser para a caracterização topográfica. Nas amostras laboratoriais das placas de pressão, foram analisadas três áreas defasadas de 120°. Na análise da topografia das amostras de placa de pressão no seu estado virgem, as dimensões de cada área são 5 x 5 mm e estão localizadas no meio raio da placa de pressão. As dimensões das áreas da placa de pressão após terem sido submetidas aos ensaios tribológicos, foram de 3 x 8 mm na direção X e Y, respectivamente. Para avaliar as superfícies das amostras laboratoriais dos revestimentos, as dimensões utilizadas foram de 2 x 2 mm, antes e após a realização dos ensaios.

Foram utilizadas as resoluções de 1000 x 50 pontos nas direções X e Y, respectivamente para cada processo descrito anteriormente.

Os parâmetros topográficos avaliados foram: a rugosidade quadrática média (S_q) e o parâmetro derivado da curva de Abbott-Firestone, a capacidade de apoio das superfícies (T_p). Para determinar a capacidade de apoio utilizou-se uma porcentagem inicial de apoio igual a 1% e uma profundidade de superfície ativa de 3 μm , parâmetros que são tradicionalmente utilizados pelo laboratório. Os parâmetros topográficos foram obtidos com o uso do programa Mountains Map Universal 3.0 Version Demo.

Após os ensaios, algumas amostras de revestimento foram submetidas à análise por MEV para caracterizar e identificar os mecanismos de desgaste atuantes durante o ensaio, ou seja, que foram reproduzidos no laboratório, para verificar se houve uma similaridade com os mecanismos presentes nas amostras utilizadas no campo.

3.3 – Resultados e Discussão da Caracterização Micro-Estrutural

A figura 3.7 apresenta os valores de dureza das amostras industriais, e o valor médio da dureza das amostras laboratoriais. Através da figura 3.7 pode-se observar que as amostras industriais apresentam, estatisticamente, valores de dureza igual, e que a dureza das amostras laboratoriais são estatisticamente equivalentes à dureza das amostras industriais.

As figuras 3.8-a a 3.8-f mostram estruturas típicas representativas das amostras analisadas.

Segundo as normas da ASTM (Chiaverini, 1996), que classificam o aspecto e a forma de apresentação da grafita, as figuras (3.8-a e 3.8-b) apresentam grafitas classificadas como tipo A, que têm forma características de veios curvos, as vezes bifurcados, com orientação a esmo. As figuras (3.8-c e 3.8-d) mostram as grafitas classificadas como tipo C, que têm como

características veios grandes e quase retos e, entre eles, veios pequenos comuns. Através dos resultados obtidos pelo analisador de imagem computadorizado, as áreas de grafita contidas nas amostras laboratoriais foram de 16 a 24% em relação à superfície total. Por outro lado, as figuras (3.8-c) e (3.8-f) apresentam a microestrutura da superfície das amostras industriais e laboratoriais, após o ataque com Nital 2%. Nota-se a morfologia e distribuição da grafita com matriz perlítica. As fases, encontradas no material, são típicas para o produto em questão, e estão coerentes com as propriedades mecânicas apresentadas na figura 3.7.

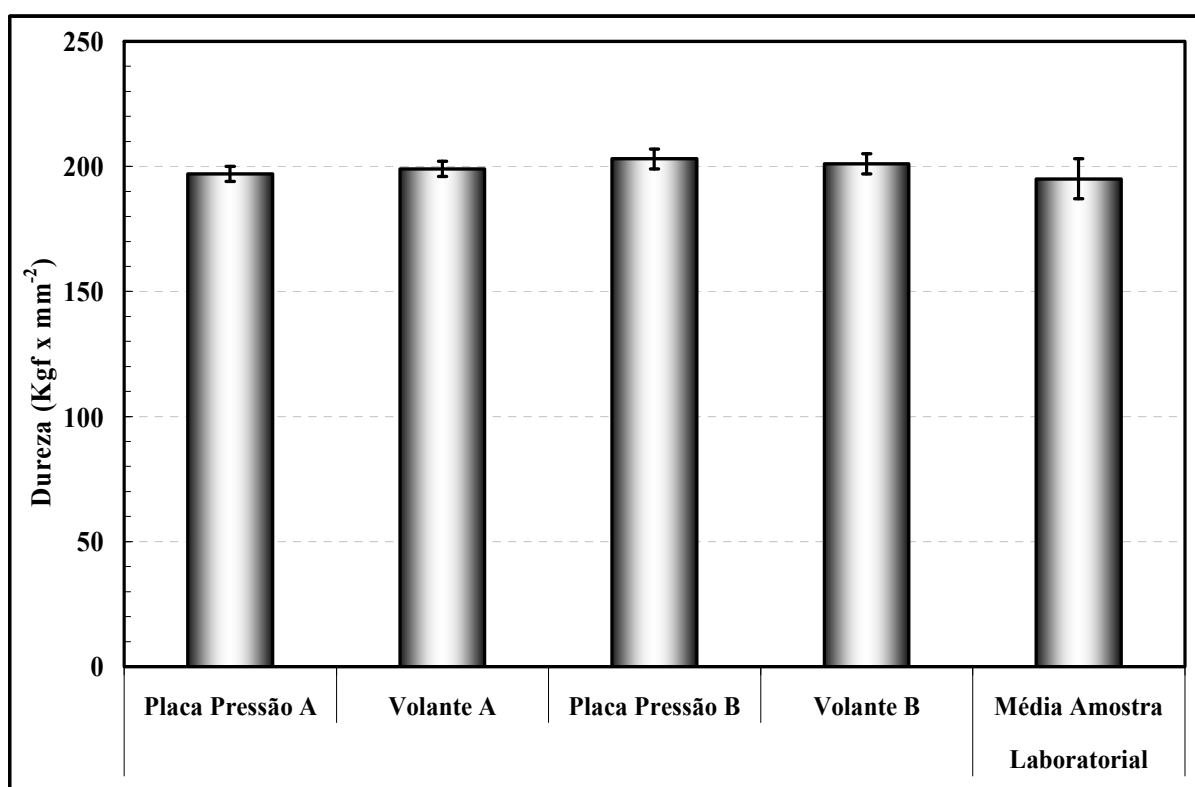


Figura 3.7: Correlação da Dureza Brinell das amostras industriais e laboratoriais de placa de pressão que foram selecionadas para a caracterização micro-estrutura. Carga = 187,5 Kgf; Identador Ø = 2,5 mm.

Com isso, concluiu-se que não foram encontradas diferenças significativas entre a morfologia dos veios de grafita, porcentagem volumétrica de grafita e microestrutura da matriz das amostras industriais e das amostras laboratoriais. Esta análise mostra que as amostras laboratoriais da placa de pressão apresentaram propriedades mecânicas e micro-estrutura similares às amostras industriais, podendo, então, serem utilizadas para a realização dos ensaios laboratoriais.

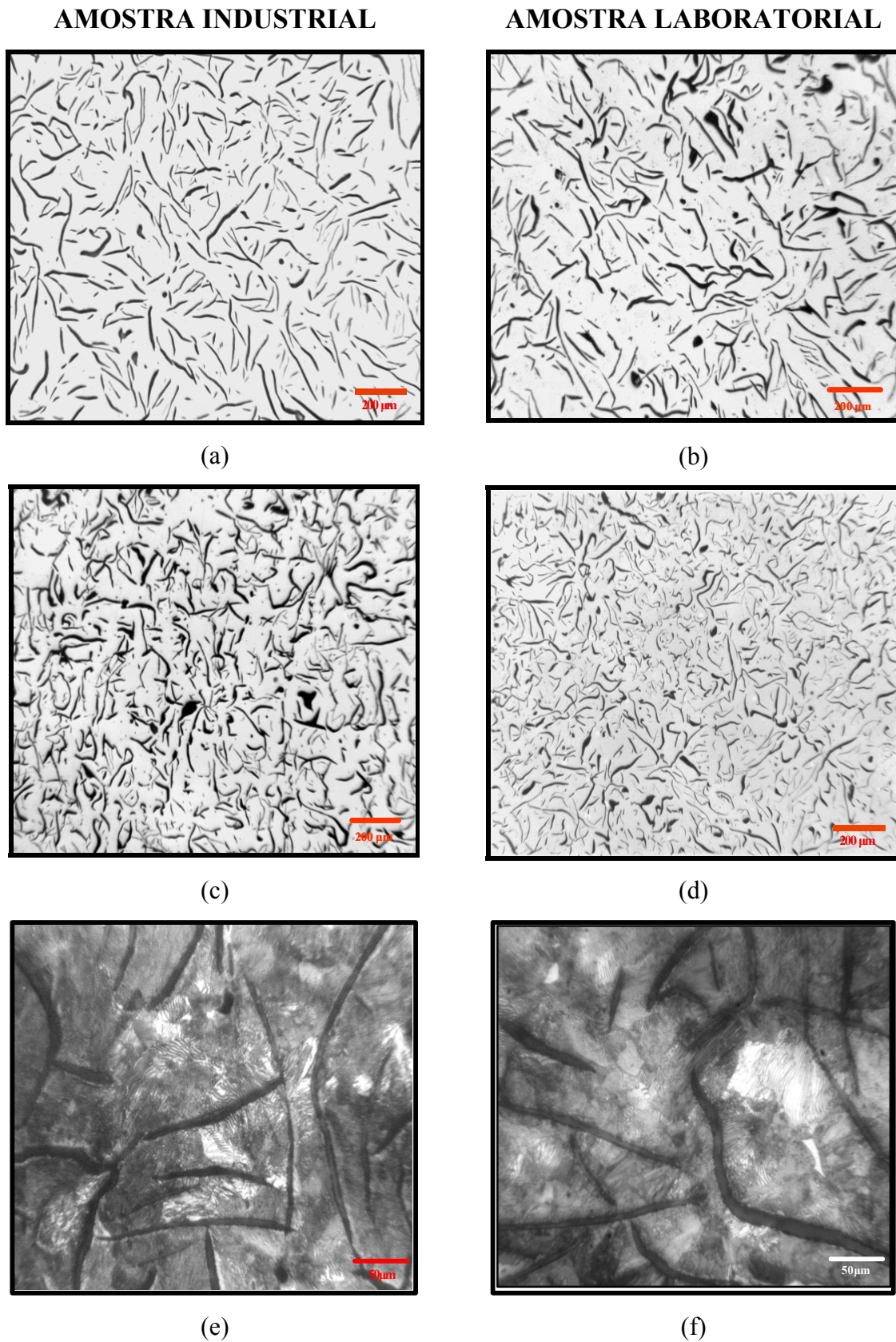


Figura 3.8: Microestrutura típica das amostras: (a - b)- Veios de grafita do tipo A; (c - d)- Veios de grafita do tipo C; (e - f)- Matriz perlítica (ataque Nital 2%).

3.4 – Resultados e Discussão da Caracterização dos Mecanismos de Desgaste Atuantes em Condições Reais e dos Reproduzidos em Laboratório.

A figura 3.9 apresenta, graficamente, a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento. A evolução do coeficiente de atrito dos diferentes conjuntos A, B e C (conjunto pequeno) apresentaram comportamentos similares. Desta forma, será apresentado para o conjunto pequeno somente o comportamento do conjunto A. A mesma figura apresenta também a evolução do coeficiente de atrito do conjunto D (conjunto grande). Observa-se que o coeficiente de atrito cresce rapidamente, atingindo um regime permanente após o início do ensaio. Após atingir este regime permanente, o coeficiente de atrito apresenta oscilações com a evolução do ensaio. Pode-se observar este comportamento tanto para o conjunto A, quanto para o conjunto D.

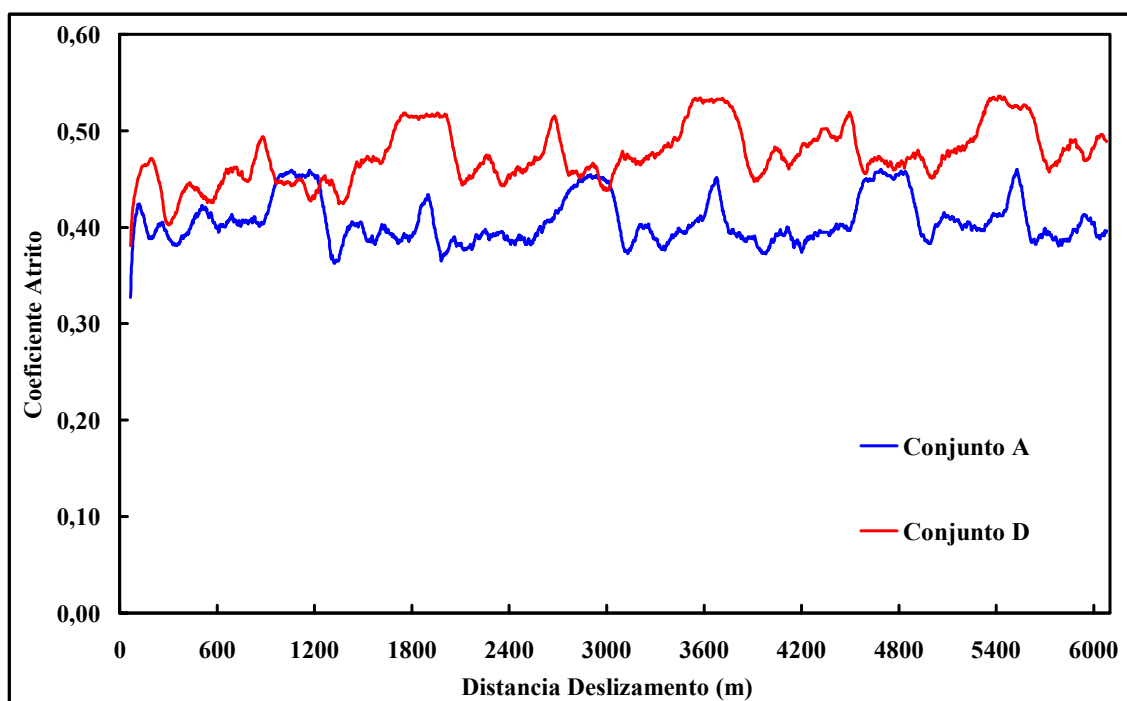


Figura 3.9: Evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento das amostras de revestimento A e D.

A figura 3.10 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito médio dos diferentes tipos de materiais utilizados. Observa-se que o coeficiente de atrito médio foi, estatisticamente, maior nos ensaios utilizando revestimento B. Os valores do coeficiente de atrito médio dos ensaios utilizando os outros tipos de revestimento são, estatisticamente, iguais.

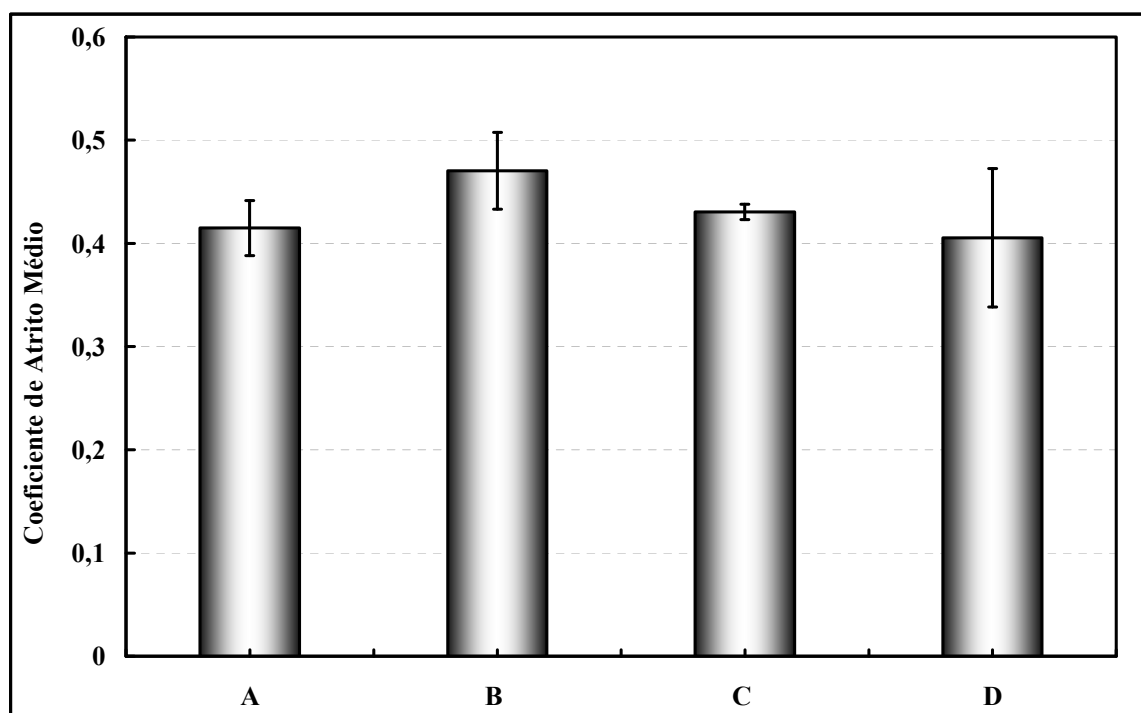


Figura 3.10: Comportamento do coeficiente de atrito médio.

As figuras 3.11-a - 3.11-c apresentam aspectos típicos das superfícies (mecanismos de desgastes) que foram observados nas amostras utilizadas em campo, e as figuras 3.11-d - 3.11-f apresentam os mecanismos de desgastes que foram reproduzidos em laboratório, para o revestimento A.

Observando em menores aumentos, figura 3.11-a e 3.11-d, as superfícies apresentam aspectos bastante equivalentes, ou seja, há uma similaridade nos mecanismos de desgaste produzidos em laboratório quando comparados com os mecanismos de desgaste que foram observados nas condições reais. Observa-se nestas figuras que houve um desgaste na superfície, arrancamento de material da matriz polimérica, aparecimento das fibras. Essas mesmas fibras desgastadas e sulcos na matriz polimérica indicam que, de fato, houve arrancamento de fibras. Com aumentos intermediários, fica ainda mais claro que há similaridade dos mecanismos de desgaste observados em campo, figura 3.11-b, com os mecanismos de desgaste reproduzidos no laboratório, figura 3.11-e. Com os maiores aumentos, figura 3.11-c e 3.11-f, observa-se claramente, de forma semelhante, tanto no campo quanto no laboratório, o aparecimento de trincas na superfície da matriz polimérica, bem como arrancamento de material e partículas desgastadas, devido a severidade do uso.

De forma semelhante, a figura 3.12, apresenta os aspectos típicos (mecanismos de desgaste) das superfícies que foram observadas nas amostras do revestimento B.

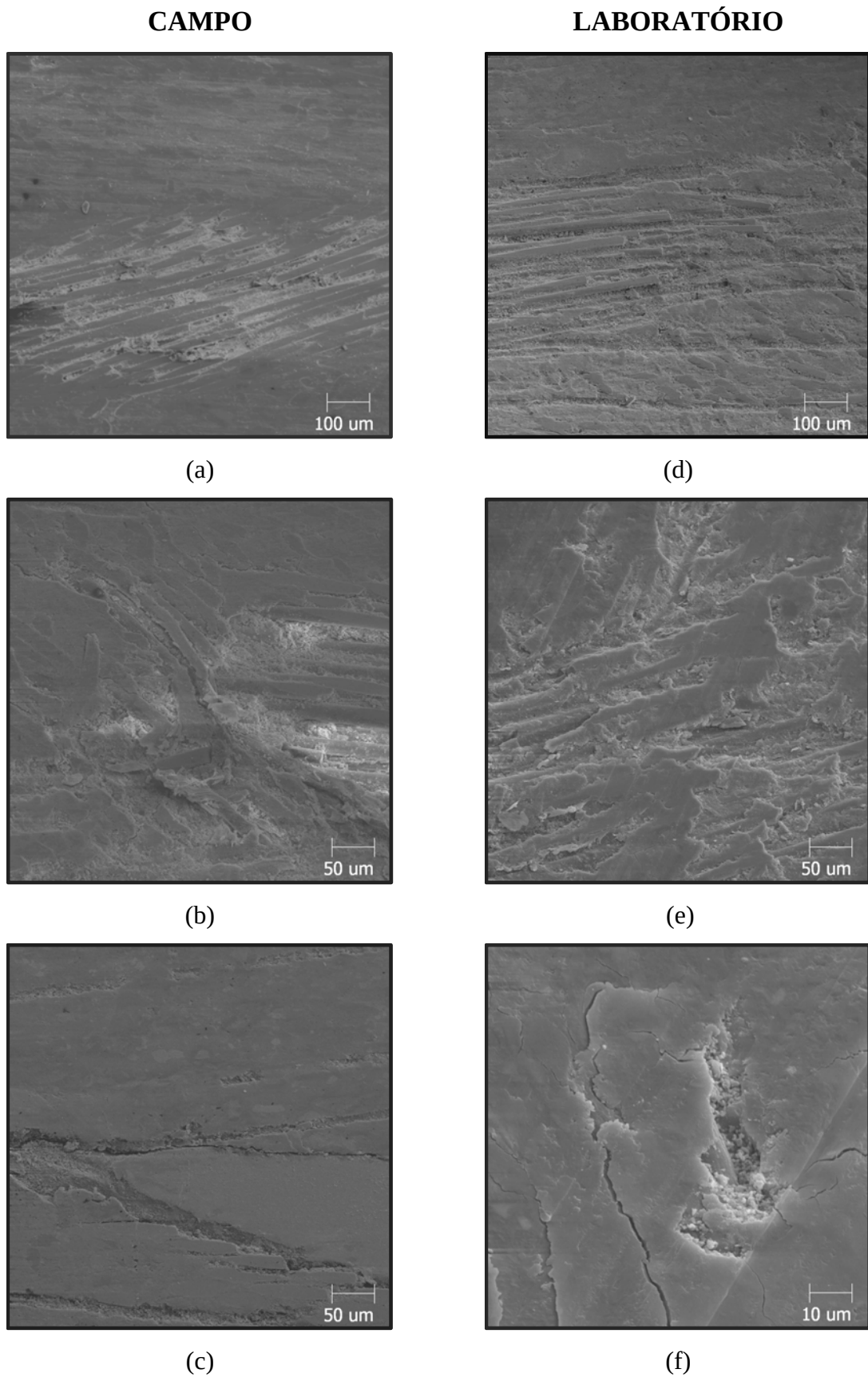
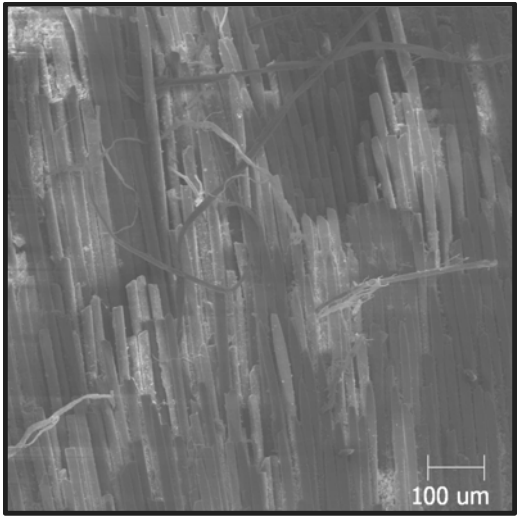
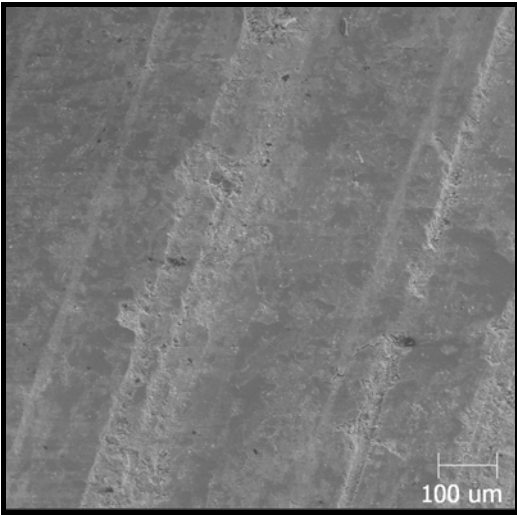


Figura 3.11: Correlação entre os mecanismos de desgaste atuantes em campo e os mecanismos reproduzidos em laboratório, revestimento A.

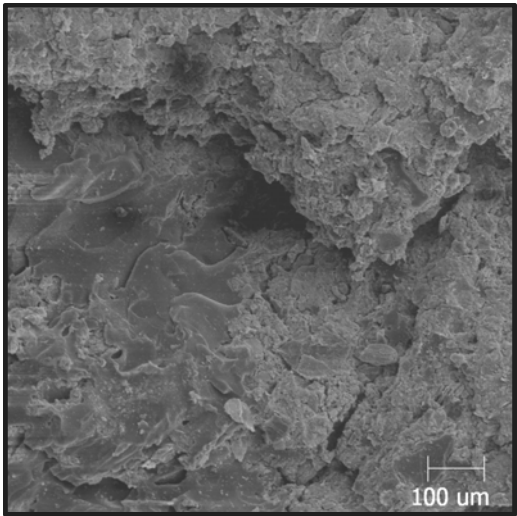
CAMPO



(a)

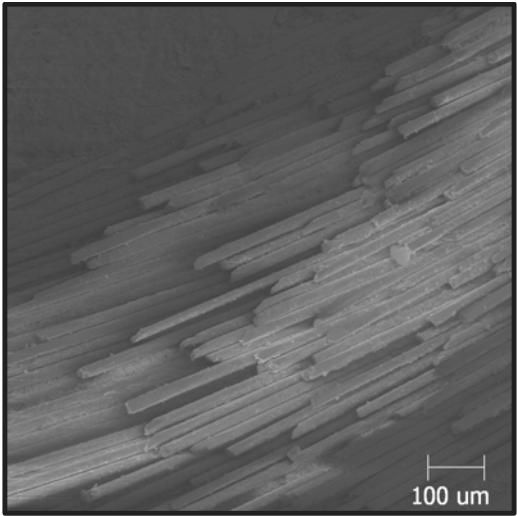


(b)

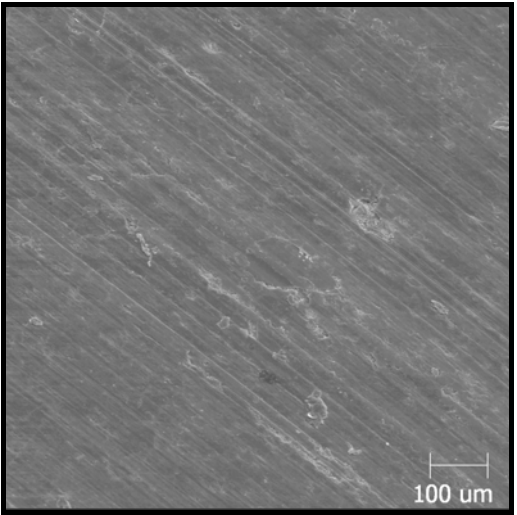


(c)

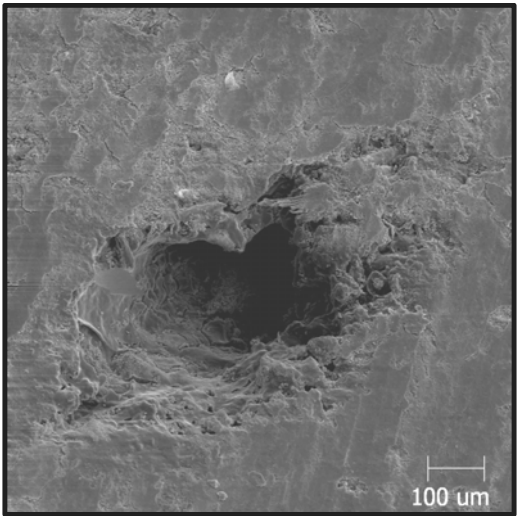
LABORATÓRIO



(e)



(f)



(g)

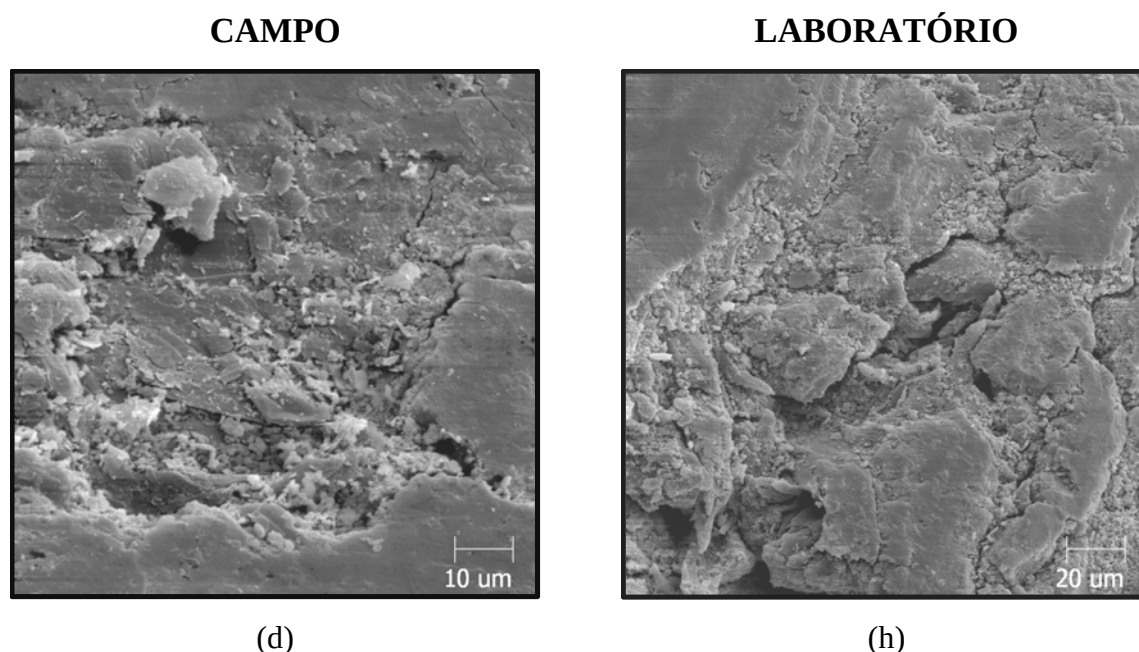


Figura 3.12: Correlação entre os mecanismos de desgaste atuantes em campo com os mecanismos reproduzidos em laboratório no conjunto B.

As figuras 3.12-a e 3.12-d apresentam os mecanismos de desgastes atuantes em condições reais, enquanto que as figuras 3.12-e a 3.12-h mostram os mecanismos de desgastes reproduzidos em laboratório, para as amostras de revestimento B.

A figura 3.12-a e 3.12-e mostram uma região onde há o aparecimento de fibras na superfície das amostras. Este aparecimento de fibras pode estar relacionado ao fato das amostras terem sido submetidas aos ensaios, havendo o arrancamento de material matriz polimérica que protege estas fibras, ocorrendo, então, o desprendimento das fibras.

Na figura 3.12-b e 3.12-f pode-se ver uma região considerada plana, e observa-se que esta região sofreu desgaste abrasivo, conforme pode ser visto pelo riscamento da superfície da amostra, causado por partículas abrasivas que podem ter sido geradas durante o funcionamento da embreagem.

Na figura 3.12-c e 3.12-g observa o aparecimento de “buracos” na superfície das amostras. Estes “buracos” podem ter sido gerados devido à degradação do material da matriz, causada pela severidade do uso e o aquecimento que é oriundo da energia de atrito gerada durante o funcionamento da embreagem.

Em aumentos maiores, figuras 3.12-d e 3.12-h, pode-se observar a geração de trincas e degradação do material do revestimento, fazendo com que haja arrancamento de material e geração de partículas de desgaste. Pode-se ver claramente nestas figuras que há uma grande

similaridade entre os mecanismos de desgaste observados em campo (figura 3.12-d) com os mecanismos reproduzidos em laboratório (figura 3.12-h).

Através da correlação feita entre os mecanismos de desgastes observados nas amostras utilizadas em ensaios de campo com os mecanismos de desgastes que foram simulados em laboratório, concluiu-se que é possível reproduzir em laboratório, de forma semelhante, os mecanismos de desgaste atuantes em campo.

Apesar dos ensaios laboratoriais terem sido satisfatórios na reprodução dos mecanismos de desgaste, estes resultados não foram totalmente satisfatórios na simulação da taxa de desgaste dos revestimentos, como será abordado no próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

CORRELAÇÃO ENTRE TESTES TRIBOMÉTRICOS E DINAMOMÉTRICOS

Esta etapa teve como objetivo correlacionar os desempenhos obtidos em laboratório com os desempenhos que foram obtidos em campo, para reproduzir em laboratório, comportamento semelhantes aos que foram obtidos em campo, em termos de durabilidade dos materiais.

A figura 4.1 mostra a taxa de desgaste dos quatro tipos diferentes de revestimentos e das placas de pressão que foram utilizados nos ensaios preliminares. Pode-se observar que o revestimento B apresentou, estatisticamente, a maior taxa de desgaste e a placa de pressão B apresentou, estatisticamente, menor taxa de desgaste. Os revestimentos A, C e D apresentaram, estatisticamente, a mesma taxa de desgaste. De forma semelhante, as placas de pressão A, C e D, também apresentaram, estatisticamente, igual taxa de desgaste.

Os desvios padrão da taxa de desgaste das placas de pressão estão elevados pelo fato das amostras nestes ensaios terem sido pesadas em uma balança que tem precisão de 10^{-2} g.

Fazendo-se uma correlação entre a taxa de desgaste do revestimento e da placa de pressão, constata-se que o revestimento B apresentou a maior taxa de desgaste e, de forma oposta, a placa de pressão B apresentou a menor taxa de desgaste.

A taxa de desgaste apresentada na figura 4.1 do revestimento B ser maior que a do revestimento A, indica que o revestimento B teve um pior desempenho em relação ao revestimento A no laboratório, contradizendo os resultados obtidos para os mesmos tipos de revestimentos que foram utilizados em campo, conforme está apresentado na figura 4.2.

A figura 4.2 mostra o comportamento da vida útil média das embreagens A e B que foram utilizadas em carros rádio táxi na cidade de São Paulo. A vida útil da embreagem é medida quando a mesma já não trabalha mais eficientemente e precisa ser substituída. A figura 4.2 mostra que a embreagem B apresentou, estatisticamente, um melhor desempenho, pois apresenta uma média de 146.200 ± 48.950 km rodados, enquanto a embreagem A

apresentou uma média de 82.800 ± 14.580 km rodados, ou seja, a embreagem B teve uma maior vida útil em relação a embreagem A.

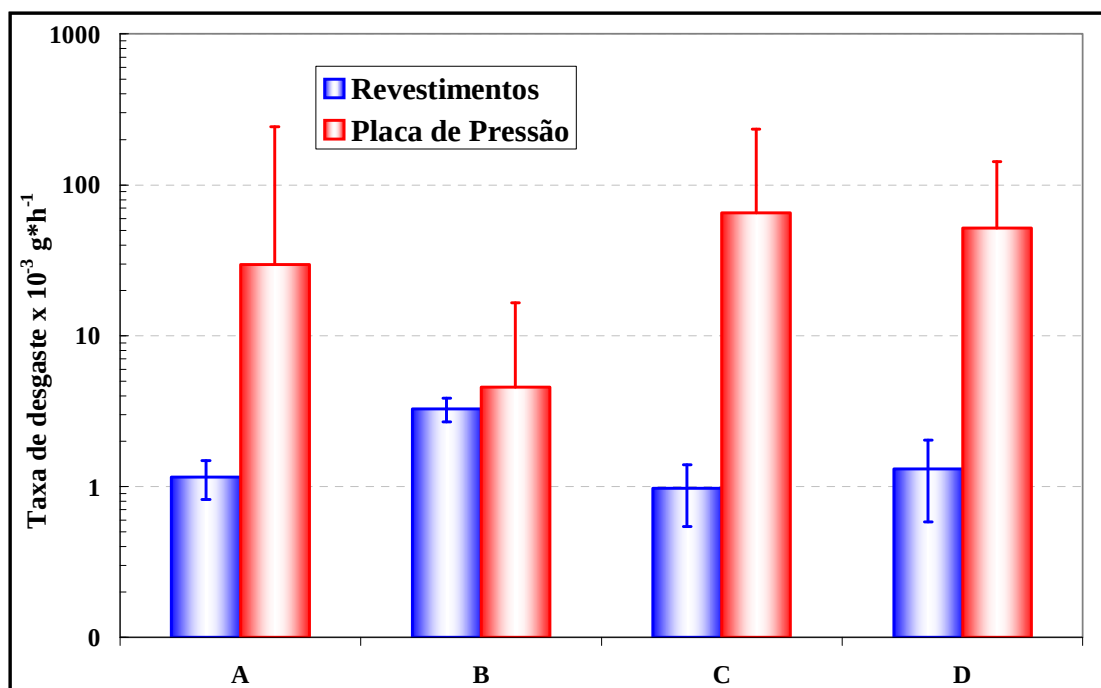


Figura 4.1: Taxa de desgaste dos diferentes revestimentos e placas de pressão.

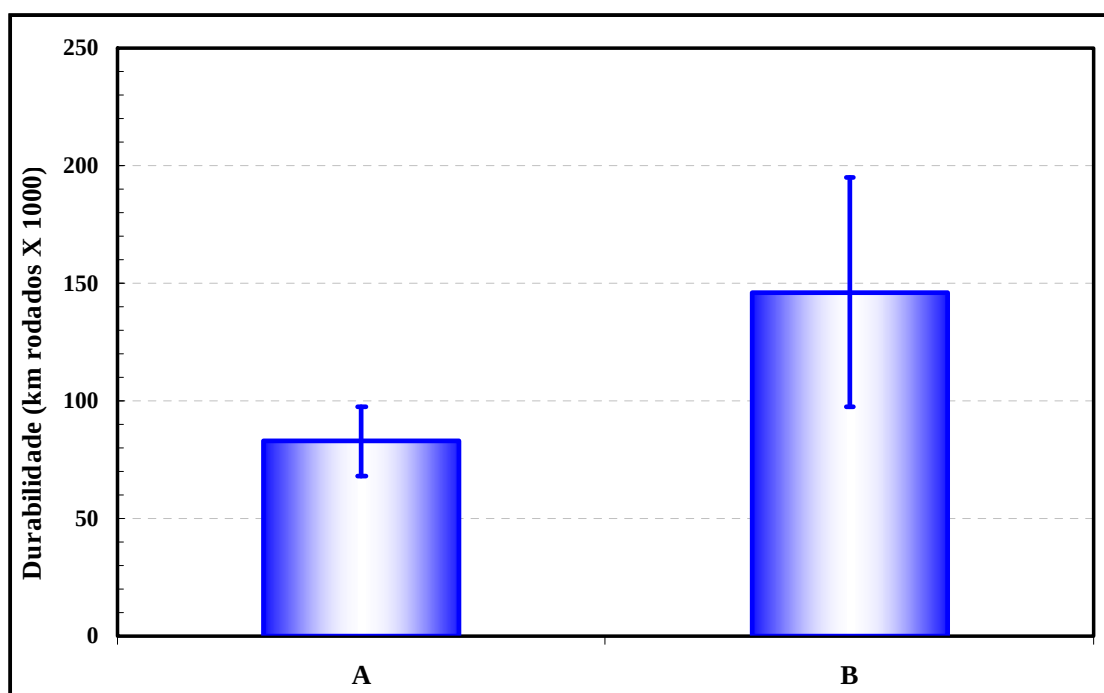


Figura 4.2: Vida útil das embreagens A e B utilizadas em campo (ZF_Sachs do Brasil).

Desta forma, inicialmente buscou-se uma justificativa que pudesse explicar esta contradição entre os resultados.

A figura 4.3 mostra superfícies das amostras de revestimentos após a realização dos ensaios laboratoriais, observadas no MEV, onde se pode ver a área total aparente de contato dos revestimentos A, B, C e D. As superfícies dos revestimentos apresentam regiões, principalmente nas bordas das amostras, onde houve arrancamento de material de forma bastante severa. Observa-se a presença de buracos na superfície das amostras (setas vermelhas figura 4.3) que foram gerados devido ao arrancamento das fibras de reforço. A princípio, acreditou-se que este fenômeno físico influenciou, de forma muito forte, os resultados das taxas de desgastes dos revestimentos utilizados nestes ensaios laboratoriais preliminares. Como os revestimentos apresentam uma estrutura física muito complexa, acreditou-se que o diâmetro das amostras era pequeno, sendo assim, contribuindo significativamente para que houvesse arrancamento de material de forma severa, conforme foi observado.

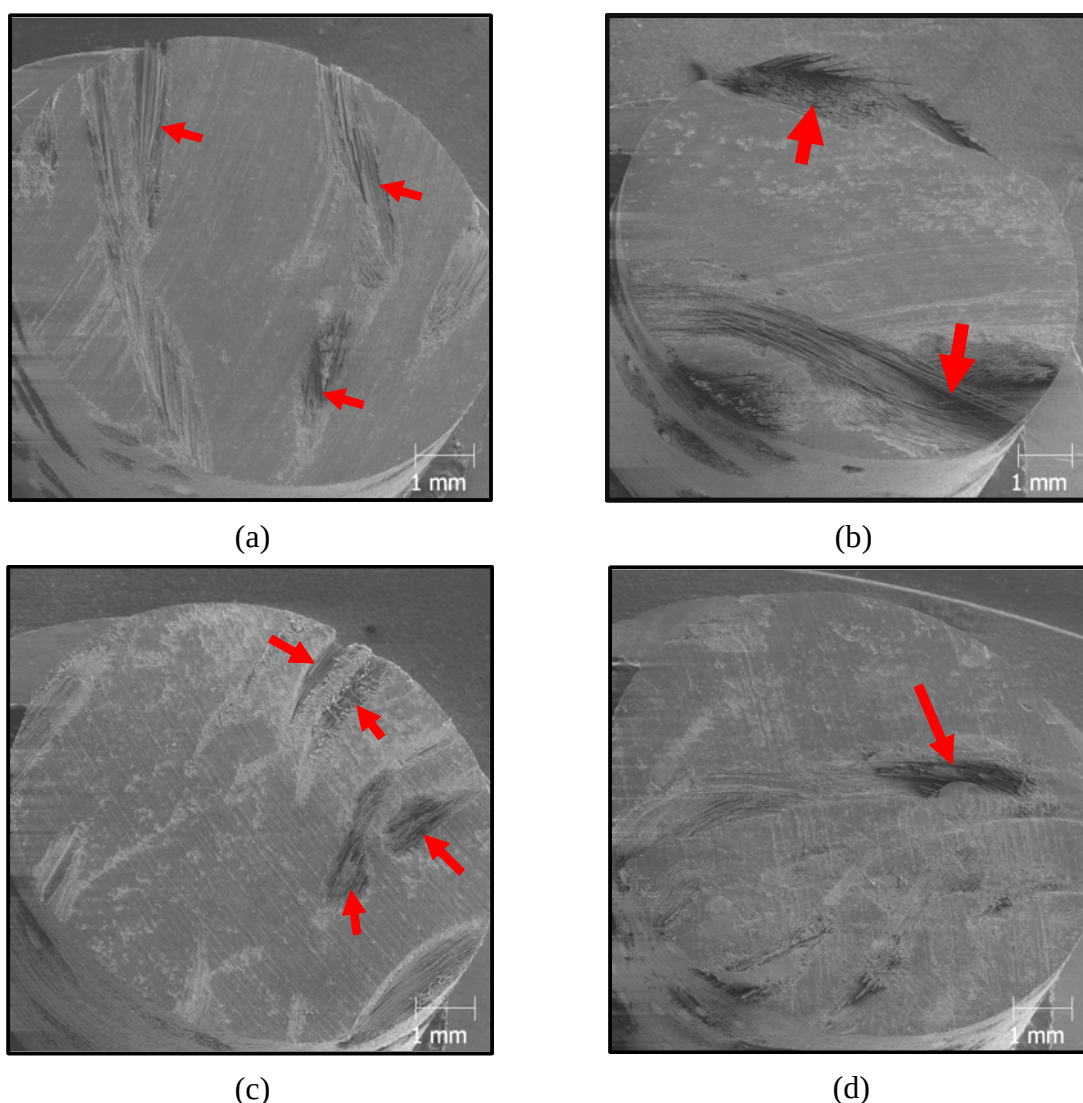


Figura 4.3: Topografia dos revestimentos após terem sido submetidos aos ensaios. $\varnothing = 8$ mm. (a)- revestimento A; (b)- revestimento B; (c)- revestimento C; (d)- revestimento D.

4.1 – Influência da Duração do Ensaio no Comportamento Tribológico (Coeficiente de Atrito, Taxa de Desgaste e Topografia de Superfície) de Material para Embreagem.

Esta etapa teve como objetivo avaliar a influência da duração do ensaio no comportamento do coeficiente de atrito, taxa de desgaste e topografia de superfície nos materiais utilizados em embreagem. Foram realizadas duas séries de ensaios. A primeira série consistiu em fazer um ensaio contínuo com oito horas de duração. Na realização deste ensaio utilizou-se um par de amostras. A segunda série consistiu em fazer oito ensaios, sendo uma hora o tempo de duração de cada ensaio. Utilizou-se o mesmo par de amostras para a realização dos oito ensaios. O diâmetro das amostras de revestimento foi o mesmo utilizado nos ensaios preliminares e os parâmetros laboratoriais estão apresentados na tabela 4.1.

Como as placas de pressão apresentaram desvio padrão da taxa de desgaste elevado, figura 4.1, por terem sido pesadas na balança com precisão de 10^{-2} , novas amostras de placas de pressão com menor espessura foram confeccionadas, para diminuir a massa. Desta forma, essas novas amostras de placas de pressão puderam ser pesadas utilizando a balança com precisão de 10^{-5} g, minimizando assim o erro de medição.

Tabela 4.1: Parâmetros laboratoriais utilizados na realização dos ensaios tribológicos.

PARÂMETROS	VALORES
Velocidade de rotação (RPM)	750
Força Normal (N)	8,8
Tempo de Teste (h)	1º série de: 8 horas 2º série de: 8 ensaios de 1 hora
Raio (mm)	31

A figura 4.4-a mostra a evolução do comportamento do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, no ensaio realizado no modo contínuo, e as figuras 4.4 (b, c, d, e e f) mostram o comportamento do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento dos ensaios interrompidos. Como o ensaio no modo contínuo teve um maior tempo de duração, a escala da distância de deslizamento no gráfico está diferente em relação aos outros gráficos.

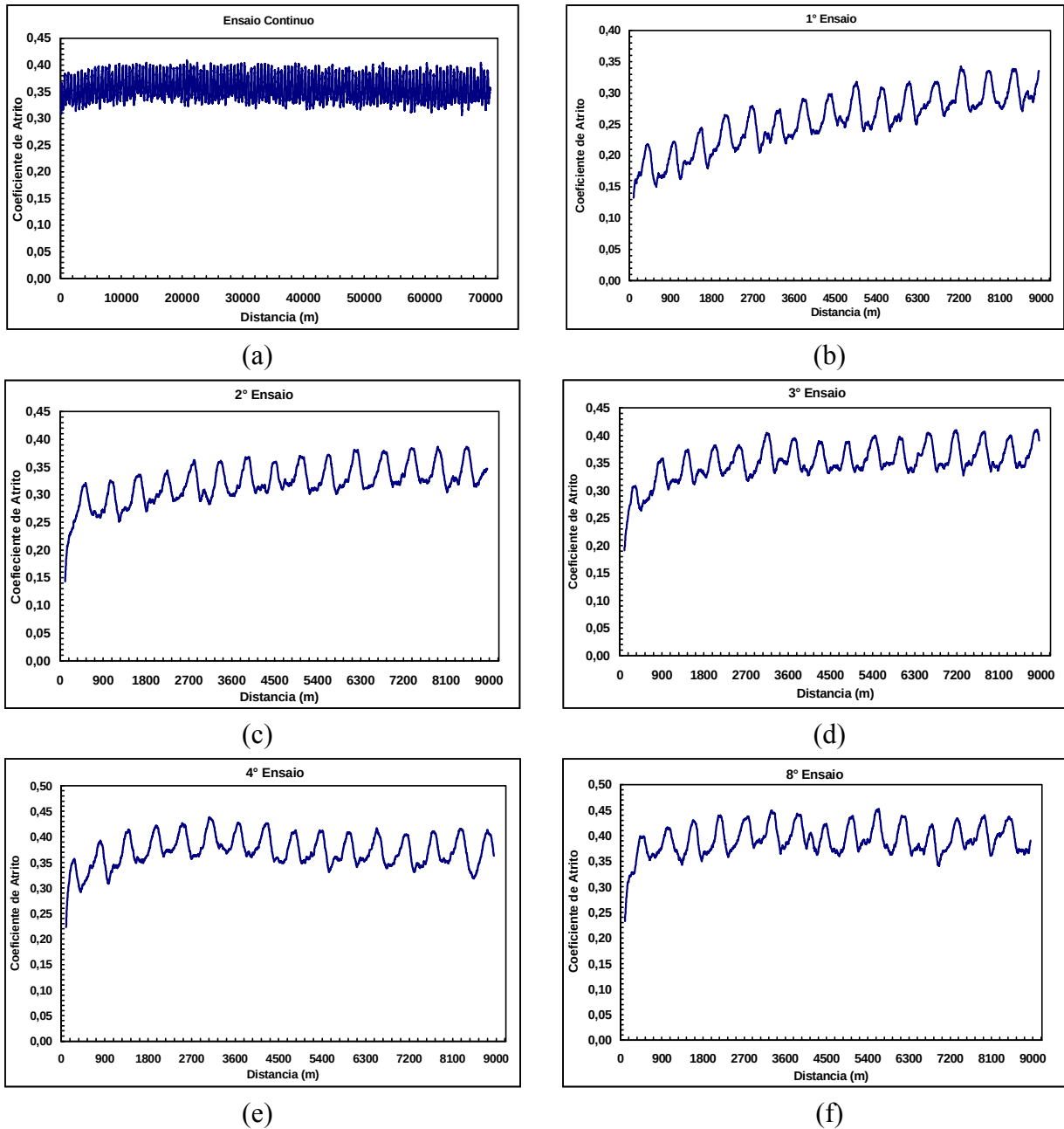


Figura 4.4: Comportamento do coeficiente de atrito com a evolução do ensaio em função da distancia de deslizamento percorrida. (a): ensaio contínuo; (b-f)- ensaios interrompidos; (b)- 1º hora; (c)- 2º hora; (d)- 3º hora; (e)- 4º hora; (f)- 8º hora.

Observa-se através da figura 4.4 que o coeficiente de atrito apresenta um crescimento rápido e acentuado após o início do ensaio. Com exceção dos gráficos das figuras 4.4-b e 4.4-c (1º e 2º ensaios interrompidos), após uma determinada distância de deslizamento, o coeficiente de atrito tende a atingir um regime permanente com oscilações periódicas. Nas figuras 4.4-b e 4.4-c (1º e 2º ensaios interrompidos) nota-se que o comportamento do coeficiente de atrito durante a evolução do ensaio é diferente. Observa-se que o coeficiente de

atrito fica oscilatório, periódico e crescente, não atingindo um regime permanente. Para os ensaios interrompidos, o coeficiente de atrito atinge o regime de estabilização após a 3ª hora de ensaio.

Após o coeficiente de atrito atingir o regime de estabilização, foi calculado o valor do atrito médio. A figura 4.5 apresenta os valores médios do coeficiente de atrito dos ensaios interrompidos. Pode-se observar que o valor médio do coeficiente de atrito é crescente nas três primeiras horas de ensaio. O valor da média geral do coeficiente de atrito dos oito ensaios interrompidos foi igual ao valor da média do coeficiente de atrito do ensaio contínuo.

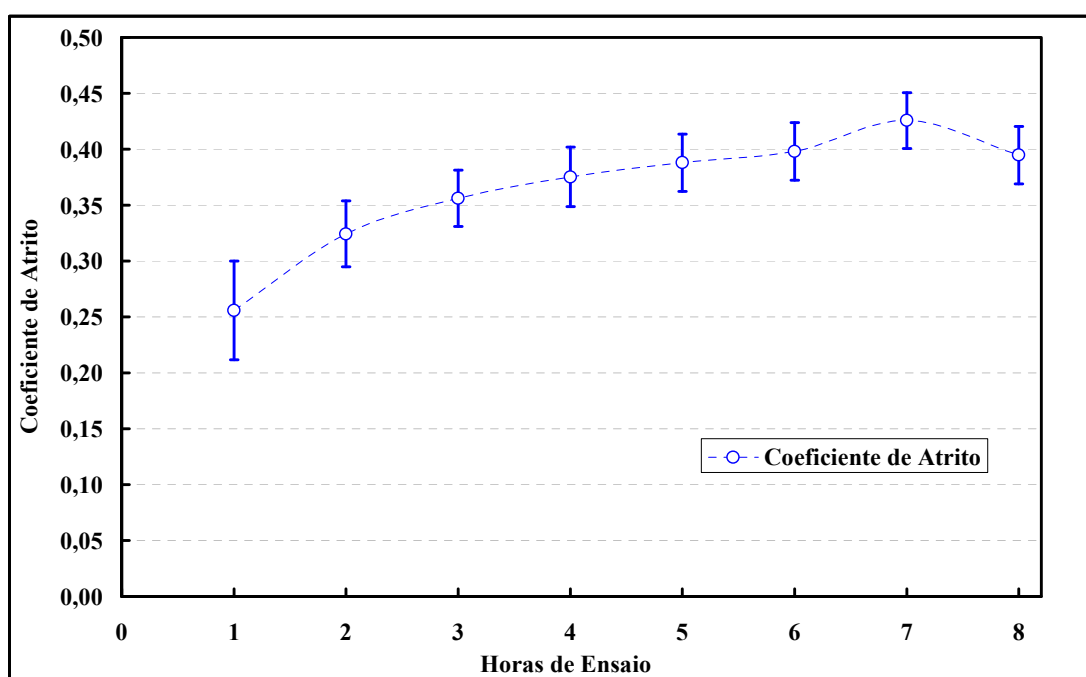


Figura 4.5: Gráfico da variação do coeficiente de atrito médio em função das horas de ensaio.

A figura 4.6 mostra o comportamento da taxa de desgaste do revestimento e da placa de pressão utilizados nos ensaios interrompidos. Observa-se que ambos apresentam o mesmo comportamento. A taxa de desgaste é maior nas três primeiras horas de ensaio e após a terceira hora a taxa de desgaste tende a permanecer constante.

Dividiu-se o valor total da perda de massa do revestimento e da placa de pressão utilizado no ensaio contínuo por oito, para obter então o valor da taxa de desgaste em gramas por hora. Este valor foi comparado com o valor da taxa de desgaste média do revestimento e da placa de pressão utilizados nos ensaios interrompidos. A figura 4.7 apresenta esta correlação. Observa-se que, tanto os revestimentos, quanto as placas de pressão apresentaram, estatisticamente, a mesma taxa de desgaste.

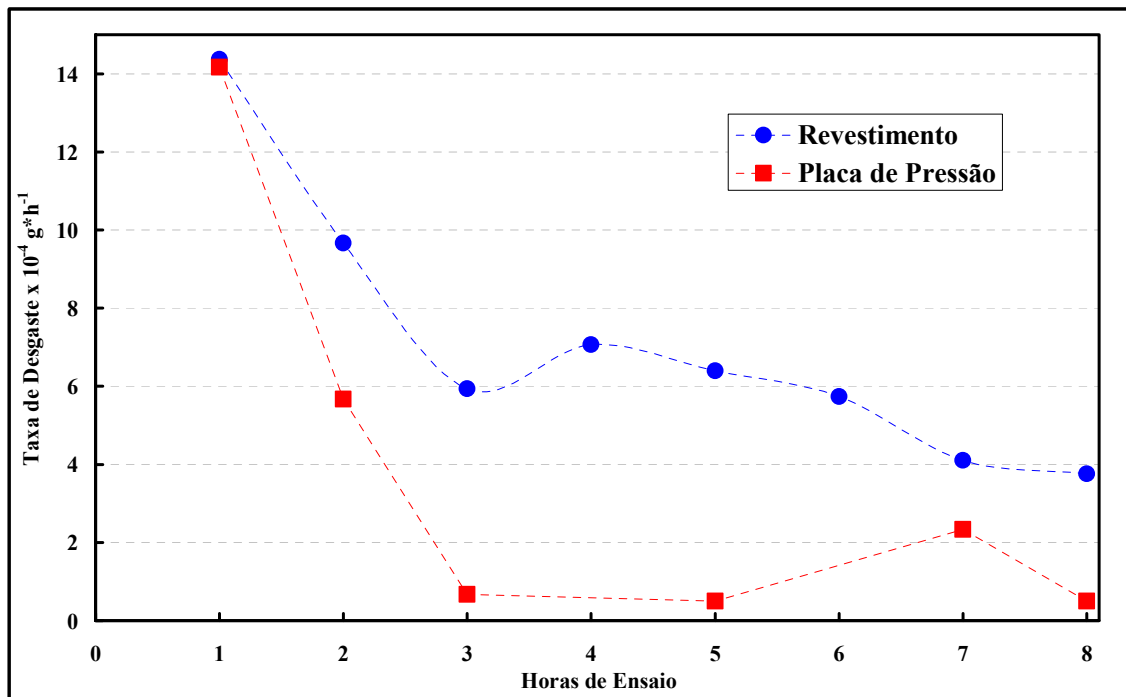


Figura 4.6: Taxa de desgaste do revestimento e placa de pressão, dos ensaios interrompidos.

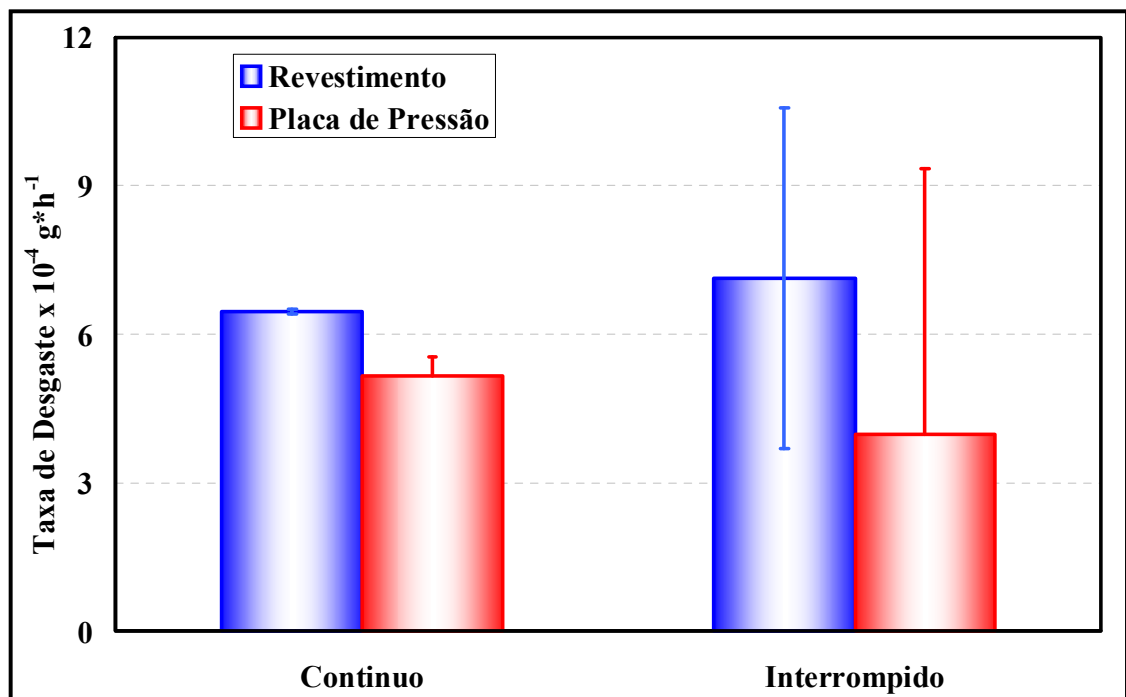


Figura 4.7: Comparativo entre a taxa de desgaste dos revestimentos e placas de pressão usados no ensaio interrompido e contínuo.

A figura 4.8 apresenta uma correlação entre o comportamento da rugosidade quadrática média (S_q) e da capacidade de apoio (T_p), com o comportamento da taxa de desgaste do revestimento utilizado no ensaio interrompido. Analisando o comportamento da

rugosidade quadrática média, observa-se que o seu valor diminui após a 1^o hora de ensaio. Nas horas subseqüentes, a rugosidade quadrática média tende a permanecer constante. Analisando a capacidade de apoio, observa-se que, antes do primeiro ensaio, a superfície do revestimento apresenta um baixo valor. Após a primeira hora de ensaio, o valor da capacidade de apoio aumenta. Nas horas seguintes dos ensaios, o valor da capacidade de apoio tende a permanecer constante.

Fazendo uma analogia entre a rugosidade quadrática média e a capacidade de apoio, observa-se que, quando a rugosidade quadrática média é alta, a capacidade de apoio é baixa, e quando se tem um baixo valor da rugosidade quadrática média, se tem uma alta capacidade de apoio. Quando se faz uma correlação entre a rugosidade quadrática média e a taxa de desgaste, observa-se que há uma similaridade no comportamento dos parâmetros. Quando o valor da rugosidade quadrática média é alto, a taxa de desgaste é alta. Quando o valor da rugosidade quadrática média diminui, a taxa de desgaste também diminui. Através da figura 4.8, observa-se, que quando a rugosidade quadrática média tende a permanecer constante, a taxa de desgaste também tende a permanecer constante. Comportamento similar a este, mas de forma inversa, também pode se observado entre a capacidade de apoio e a taxa de desgaste. Quando o valor da capacidade de apoio é baixo, a taxa de desgaste é alta, e quando o valor da capacidade de apoio aumenta, o valor da taxa de desgaste diminui.

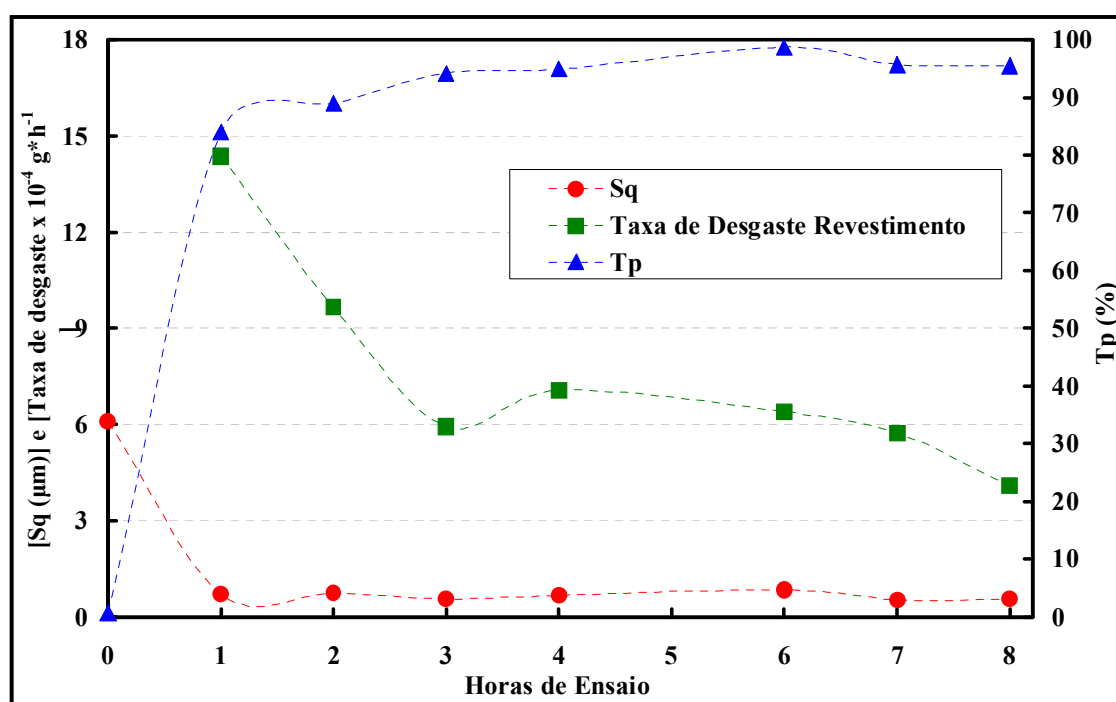


Figura 4.8: Correlação do comportamento da rugosidade quadrática média e da capacidade de apoio com a taxa de desgaste, do revestimento utilizado no ensaio interrompido.

Concluiu-se que o coeficiente de atrito cresce rapidamente no início do ensaio e tende a permanecer constante com a evolução do ensaio. No ensaio interrompido, o valor médio do coeficiente de atrito tem um crescimento nas três primeiras horas de ensaio e tende, estatisticamente, à estabilização com o decorrer das horas de ensaio. Os revestimentos e placas de pressão apresentam, estatisticamente, a mesma taxa de desgaste nas duas condições de ensaios adotadas. Para o ensaio interrompido, o revestimento e a placa de pressão apresentam uma maior taxa de desgaste nas três primeiras horas de ensaio. Após a terceira hora de ensaio, a taxa de desgaste tende a permanecer em regime permanente.

Concluiu-se, então que, para o ensaio interrompido, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste estão relacionadas com a topografia superficial dos revestimentos.

4.2 – Validação dos Ensaios Laboratoriais

Como foi mostrado na figura 4.1, o revestimento B apresentou maior taxa de desgaste em relação ao revestimento A, contrariando os resultados obtidos com os mesmos tipos de materiais utilizados em campo. Com isso, buscou-se produzir no laboratório o mesmo comportamento que foi observado no campo (figura 4.2). Então, novos ensaios laboratoriais foram realizados, mas somente com revestimentos A e B. Para isso, novas amostras de revestimento A e B e placas de pressão foram confeccionadas pela ZF_SACHS do Brasil e enviadas para o LTM. As novas amostras de revestimentos tiveram suas dimensões alteradas. A tabela 4.2 apresenta as características das novas amostras, e a figura 4.9, por sua vez, apresenta a geometria das novas amostras laboratoriais de revestimentos.

Como as amostras de revestimento tiveram sua área nominal de contato com a superfície da placa de pressão aumentada, houve a necessidade de ajustar o valor da força normal aplicada, para que a pressão de contato superficial fosse igual à pressão de contato superficial quando foram utilizadas amostras de revestimento com 8 mm de diâmetro. A força normal calculada foi de 23 N. Como as amostras tiveram suas dimensões alteradas, o raio também foi alterado e, conforme foi apresentado anteriormente na figura 4.6, a taxa de desgaste do revestimento e da placa de pressão foi maior nas três primeiras horas e, a partir deste tempo tendeu à estabilização. Com isto, foi adotado o tempo de duração de cada ensaio em três horas. Todos os ensaios foram realizados a seco, e foram mantidos os mesmo parâmetros laboratoriais utilizados nos ensaios preliminares, com exceção, os que foram ajustados para a realização dos novos ensaios com as amostras de revestimento A e B.

Tabela 4.2: Características das amostras utilizadas nos ensaios.

Amostra	Material	Geometria	Quantidade
Revestimento (Corpo)	A B	$\varnothing = 13 \text{ mm}$	30 de cada tipo de revestimento
Placa de Pressão (Contra-Corpo)	Ferro Fundido Cinzentos	$\varnothing_{\text{ext}} = 76 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{int}} = 8 \text{ mm}$	50



(a)



(b)

Figura 4.9: Amostra laboratorial do revestimento com sua nova dimensão. (a)- revestimento A; (b)- conjunto (placa de pressão mais revestimento no pino porta amostra).

Tabela 4.3: Parâmetros laboratoriais utilizados para a validação dos ensaios laboratoriais.

PARÂMETROS	VALORES
Velocidade de rotação (RPM)	750
Força Normal (N)	23
Tempo de Teste (h)	3
Raio (mm)	25
Meio	Ar Ambiente

Como as amostras de revestimento tiveram o diâmetro aumentado, para caracterizar a topografia dessas amostras, adotou-se uma área de 8 x 8 mm para os revestimentos, e para as placas de pressão, uma área de 2 x 13,5 mm, após a realização dos ensaios. A densidade de pontos foi a mesma apresentada anteriormente, [1000 (x) x 50 (y)] pontos.

A partir destes ensaios, a temperatura da superfície da placa de pressão foi monitorada com o auxílio de um sensor infravermelho. A figura 4.10-a mostra o posicionamento do sensor infravermelho Raynger MX4+ Noncontact Thermometer, em relação ao tribômetro. O sensor infravermelho está posicionado a uma determinada distância da superfície da placa de pressão. O feixe de luz infravermelha (linha vermelha figura 4.10-a) incidente sobre a superfície da placa está a uma distância angular α em relação a um feixe (linha azul figura 4.10-a) que estaria incidindo perpendicularmente sobre a superfície da placa de pressão. Esta distância angular α está dentro da variação angular que permite monitorar e obter valores de temperatura como se o posicionamento do feixe estivesse perpendicular a superfície, conforme demonstrado por Incropera; DeWitt (2003). O ponto vermelho na figura 4.10-b mostra a região onde foi realizado o monitoramento da temperatura na superfície da placa de pressão, em relação à região onde há contato entre a superfície do revestimento e a superfície da placa de pressão.

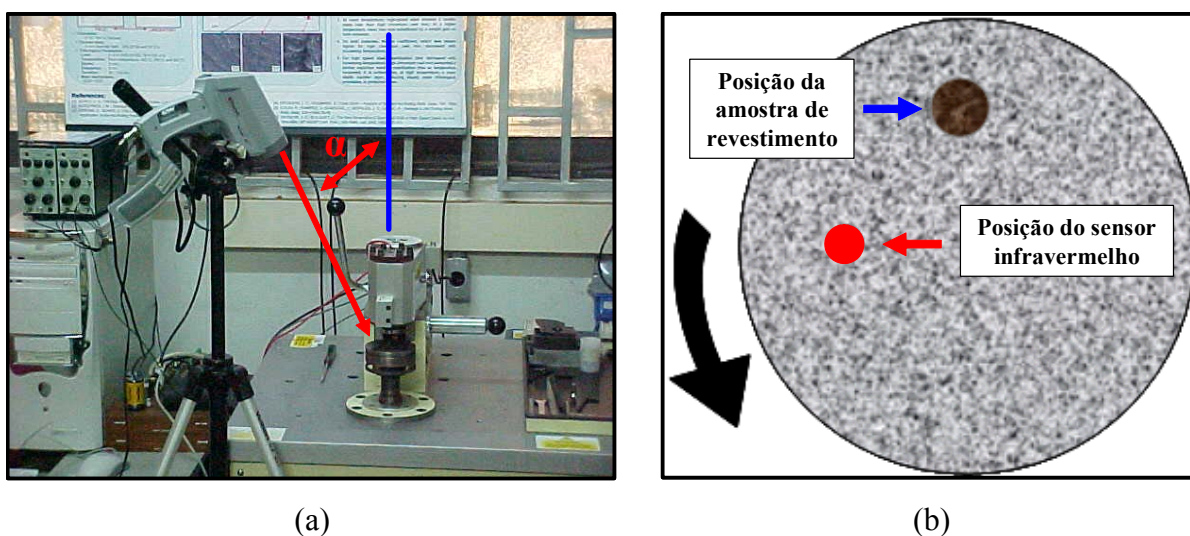
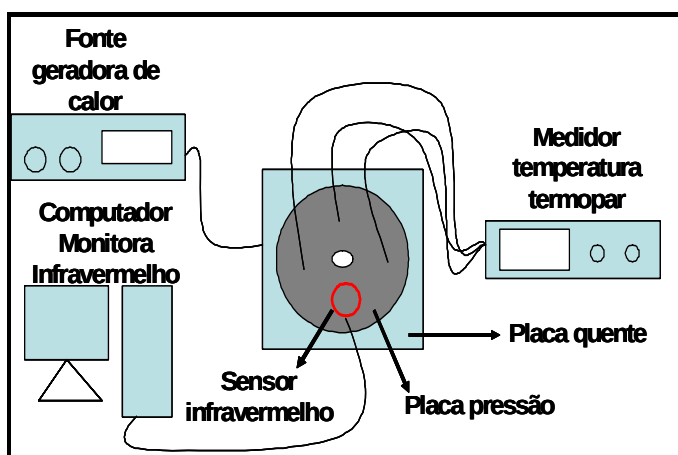


Figura 4.10: (a)- Configuração utilizada no monitoramento da temperatura; (b)- posicionamento do sensor infravermelho na superfície da placa de pressão em relação ao ponto de contato entre a superfície do revestimento e a superfície da placa de pressão.

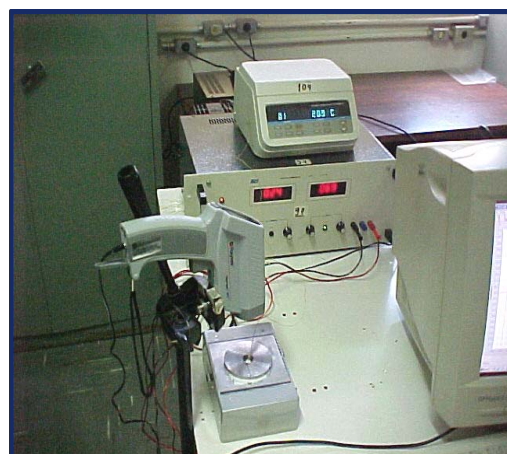
Devido à emissão de radiação da superfície de um corpo ser dependente da sua natureza topográfica, como também demonstrado por Incropera; DeWitt (2003), foi necessária a realização da calibração da emissividade da superfície da placa de pressão, no seu estado virgem. Para a realização dos experimentos, contou-se com o auxílio do Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM), pertencente à Universidade Federal de Uberlândia.

A figura 4.11 mostra a representação esquemática utilizada para a calibração da emissividade da superfície da placa de pressão no seu estado virgem.

A placa de pressão foi colocada sob uma placa quente especialmente fabricada pelo LTCM, e esta estava ligada a uma fonte geradora de calor da marca Power Supply modelo EMG 18134. Sob a superfície da placa de pressão foram soldados três termopares do tipo k, e conectados ao equipamento que lê a temperatura (marca Agilent modelo 34970A). Isso ocorreu com a finalidade de verificar e monitorar a uniformidade de distribuição de calor sob a superfície da placa de pressão. O sensor infravermelho foi posicionado próximo à superfície da placa de pressão, sendo que o ângulo entre o feixe de luz infravermelha e o plano horizontal da superfície da placa de pressão era de 90° . Esses equipamentos foram colocados dentro de uma cuba isolante térmica para diminuir a troca de calor da superfície da placa de pressão com o meio externo e, desta forma, tentar minimizar os erros de medição da temperatura.



(a)



(b)

Figura 4.11: Montagem experimental para calibração da emissividade da placa de pressão.

Foram considerados três pontos de medição de temperatura. Esses pontos foram determinados através da potência fornecida à fonte geradora de calor.

A fonte geradora de calor aquece a placa quente e esta, por sua vez, aquece a placa de pressão. Depois de fornecida potência para fonte geradora de calor, esperou-se em média de três a quatro horas para a temperatura na superfície da placa de pressão estabilizar. Quando a temperatura estava estabilizada, fazia-se a medição da temperatura. Conhecida a temperatura medida pelos termopares, ajustou-se então o valor da emissividade no sensor infravermelho até que o valor da temperatura medida pelo sensor infravermelho se igualasse à temperatura medida pelos termopares. Desta forma, obteve-se o valor da emissividade da superfície da

placa de pressão. O valor obtido, foi adotado para a realização de todos os ensaios laboratoriais, uma vez que, como foi feita a caracterização topográfica da superfície da placa de pressão no seu estado virgem e foi constatado que as superfícies topográficas são estatisticamente iguais, concluiu-se então que a emissividade das superfícies das placas também são as mesmas.

Determinado o valor da emissividade da superfície da placa de pressão no seu estado virgem, este foi ajustado no sensor infravermelho, e desta forma realizou-se o monitoramento da temperatura da superfície da placa de pressão durante a realização dos ensaios tribológicos.

Durante a realização dos ensaios laboratoriais devido à severidade do sistema, calor é gerado e a superfície da placa de pressão é aquecida, mudando de cor. Devido também à severidade do sistema, desgaste ocorre na superfície da placa de pressão mudando então sua natureza topográfica. Este dois fenômenos citados, por sua vez, mudam a emissividade superficial. Com isso foi necessário fazer a calibração da temperatura da superfície da placa de pressão após a realização dos ensaios.

Devido as limitações da fonte geradora de calor aquecer a temperatura da placa quente até aproximadamente 100°C , um novo procedimento foi utilizado neste processo de calibração, com a finalidade de aquecer a placa de pressão próximo dos valores obtidos pelo sensor infravermelho durante a realização dos ensaios tribológicos. Para isto foi utilizado o equipamento Leister modelo 9C2 que é ligado ao equipamento Tribômetro Plint, conforme está demonstrado na figura 4.12-a.

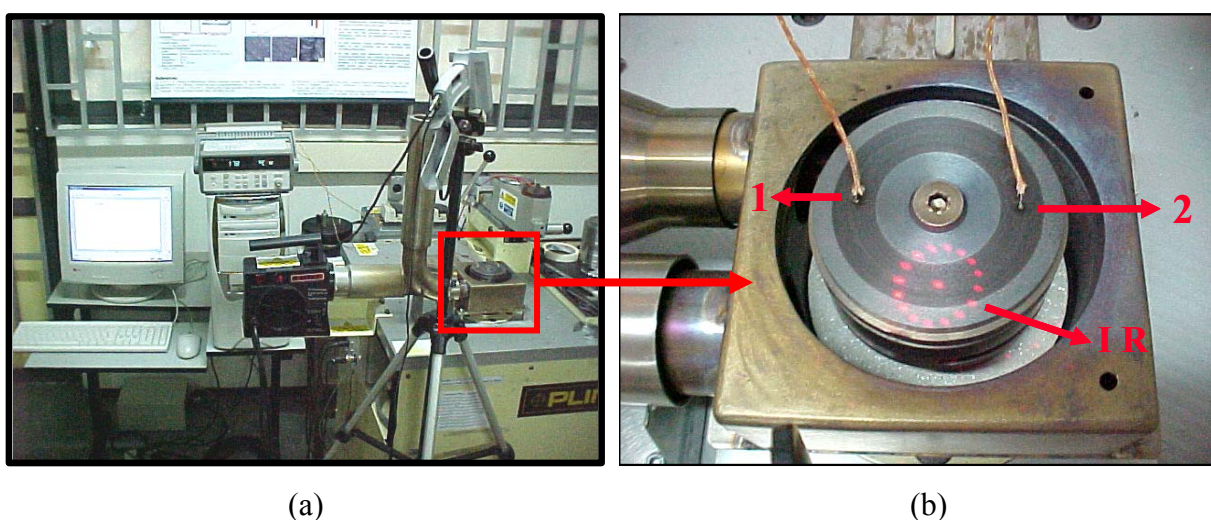


Figura 4.12: (a)- Montagem experimental para calibração da temperatura da superfície da placa de pressão submetidas aos ensaios; (b)- detalhe do monitoramento da superfície da placa de pressão na marca de desgaste, utilizando os termopares e o sensor infravermelho.

Este equipamento Leister gera um fluxo de ar quente aquecendo a placa de pressão. Sob a superfície da placa de pressão foram soldados dois termopares tipo k (figura 4.12-b), que foram conectados ao equipamento Agilent modelo 34970A que lê a temperatura, para verificar a distribuição da temperatura ao longo da superfície da placa de pressão. Ao mesmo tempo a superfície da placa de pressão foi monitorada pelo sensor infravermelho (figura 4.12-b), cuja emissividade estava ajustada no valor obtido na calibração da superfície virgem. Para calibrar a temperatura após a realização dos ensaios, foram utilizadas duas placas de pressão que foram submetidas a ensaios no tribômetro com revestimentos A e D, com uma força normal aplicada de 200 N e tempo de duração do ensaio igual a três horas. Este valor da força normal utilizada, posteriormente será justificado. A tabela 4.4 sintetiza os procedimentos que foram adotados para a realização da calibração para obtenção da temperatura da superfície da placa de pressão tanto no estado virgem quanto ensaiada.

Tabela 4.4 – Procedimentos adotados para calibração da temperatura da superfície da placa.

Material do Revestimento	-	A	D
Condição da Placa de Pressão	virgem	Ensaída (200 N, 3h)	Ensaída (200 N, 3h)
Faixa de Temperatura (°C)	40 - 100	50 - 300	70 - 400
Configuração Montagem Experimental	Placa quente	Tribômetro Aquecimento Leister	Tribômetro Aquecimento Leister

A figura 4.13 apresenta a correlação entre os valores das temperaturas medidas pelo sensor infravermelho, com os valores médios da temperatura medida pelos três termopares, para ajustar o valor da emissividade inicial da superfície virgem. No gráfico essa correlação é expressa pelo termo virgem, referente à superfície da placa de pressão que ainda não foi submetida ao ensaio de desgaste. Esta figura mostra que a regressão linear entre a temperatura medida pelo sensor infravermelho e pelos termopares, apresentou um coeficiente angular e um coeficiente de correlação igual a 1 e um coeficiente linear igual muito próximo de zero. Isto indica que os valores da temperatura medidos pelos dois métodos foram iguais quando a emissividade no sensor infravermelho estava ajusta no valor igual a 0,3. Portanto, com isso ficou definido que a emissividade da superfície da placa de pressão no seu estado virgem é igual a 0,3.

A figura 4.13 apresenta também as outras duas correlações que foram realizadas para calibrar a temperatura da placa de pressão, só que para as amostras que foram submetidas a ensaios no tribômetro com os revestimentos A e D. Neste caso, os valores obtidos através dos termopares foram considerados os valores reais ou os valores corretos da temperatura da superfície da placa de pressão. Observa-se que, através da correlação dos valores das temperaturas medidas pelo sensor infravermelho e pelos termopares tanto para a placa utilizada no ensaio com revestimento A quanto para o revestimento D, apresentam um coeficiente de correlação muito próximo de 1. Deste modo, o coeficiente de correlação mostrou que as equações das retas de regressão são confiáveis para converter as temperaturas medidas pelo sensor infravermelho para as temperaturas reais.

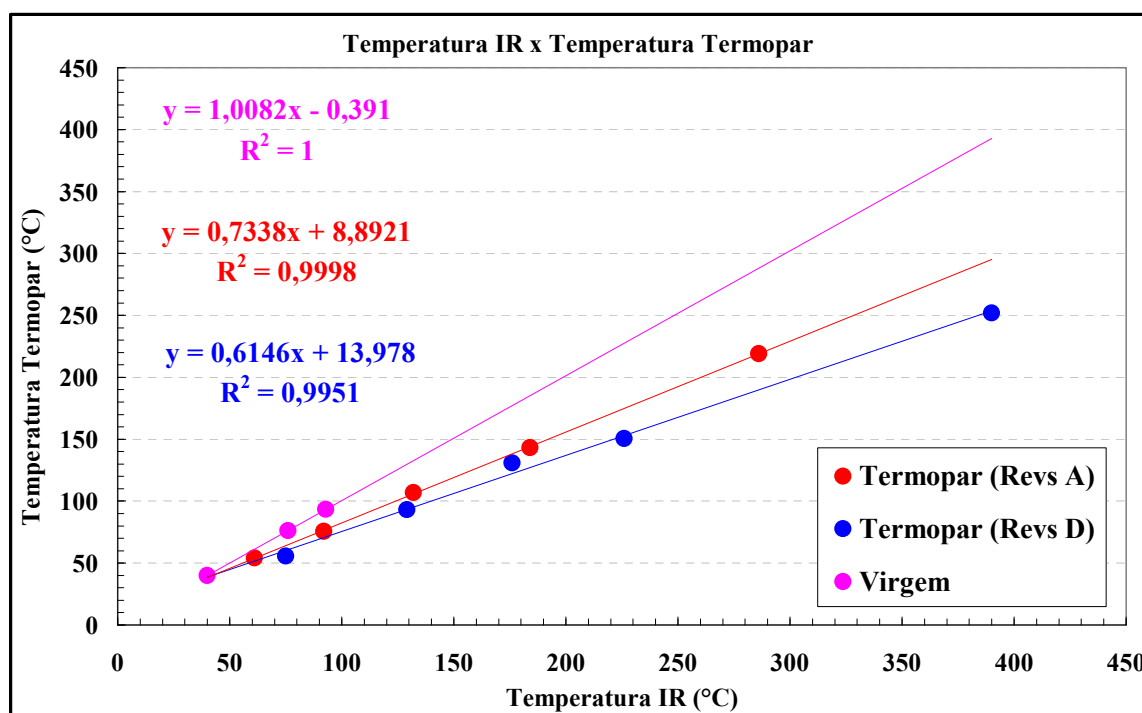


Figura 4.13: Correlação da temperatura medida pelo sensor infravermelho e termopares.

A figura 4.14 apresenta a taxa de desgaste dos revestimentos. Novamente observa-se que a taxa de desgaste do revestimento B é, estatisticamente, maior que a taxa de desgaste do revestimento A. Este resultado continua contradizendo os resultados obtidos em campo, lembrando que em campo a embreagem B apresentou melhor desempenho em relação a A.

A figura 4.15 mostra a topografia das novas amostras de revestimento, observadas via MEV, após terem sido submetidas ao ensaio laboratorial. Observa-se, na figura 4.15, que o aumento do diâmetro das amostras, com conseqüente aumento da área nominal de contato, teve um efeito positivo. Observa-se que as novas amostras de revestimento não apresentaram

arrancamento de material de forma severa, principalmente nas bordas, como foi observado na figura 4.3. Pode-se observar também que a superfície da amostra do revestimento B (figura 4.15-b) apresentou um desgaste superficial mais suave quando comparado com a superfície desgastada do revestimento A, figura 4.15-a. Esta figura mostra claramente “buracos” (setas vermelhas) na superfície da amostra do revestimento A, dando indícios de que material foi arrancado de forma mais severa. Este fenômeno físico contraria os resultados apresentados pela taxa de desgaste, uma vez que, após esta observação, esperava-se que o revestimento A apresentasse uma taxa de desgaste maior em relação ao revestimento B.

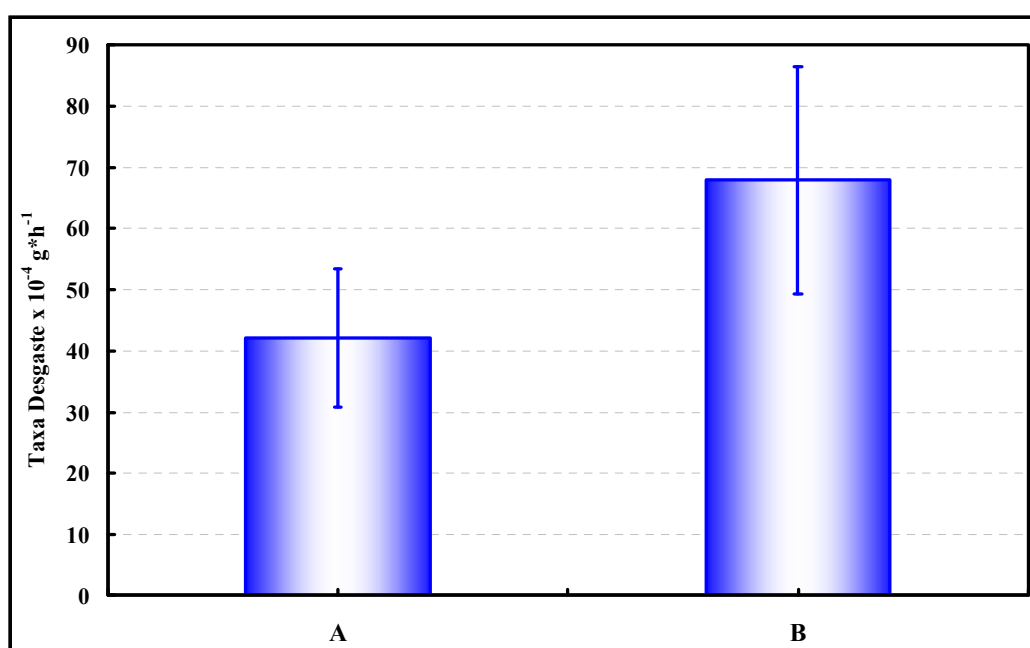


Figura 4.14: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos para força normal de 23N.

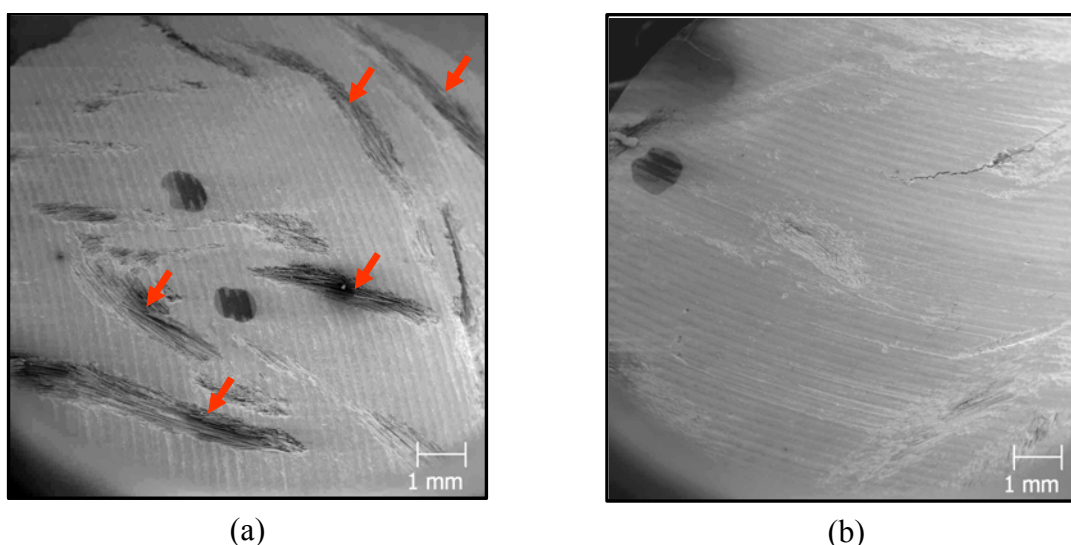


Figura 4.15: Topografia de superfície dos revestimentos ($\varnothing = 13 \text{ mm}$) obtida via MEV, após a realização dos ensaios, com força normal 23N: (a)- revestimento A; (b)- revestimento B.

Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005), desenvolveram um procedimento de teste capaz de simular em laboratório todas as diferentes condições de uso as quais uma embreagem é submetida em um veículo automotivo. Em seu trabalho, Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005), escolheram a energia de atrito que é gerada durante o acoplamento da embreagem como parâmetro para avaliar o tempo de vida útil dos materiais da embreagem. Posteriormente, estes mesmos autores correlacionaram os seus resultados, obtidos através dos ensaios laboratoriais, com os resultados que foram obtidos dos materiais utilizados em campo.

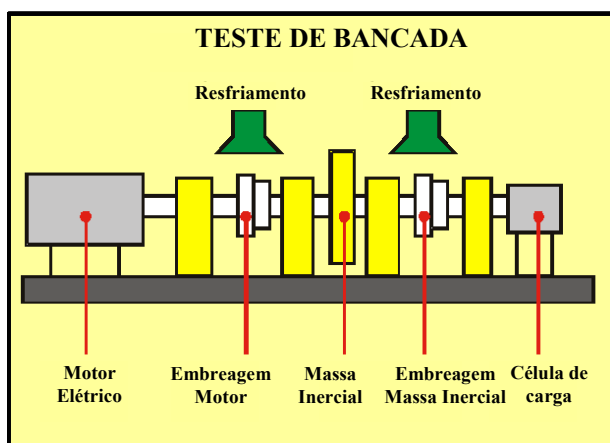
Baseado nos resultados do seu trabalho, Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005), puderam estimar a vida útil dos materiais da embreagem, principalmente os revestimentos utilizados nos veículos automotivos. Com este trabalho, Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005), puderam também ter conhecimento do comportamento da energia de atrito para as diversas condições de uso e da temperatura gerada durante o acoplamento.

Para o desenvolvimento do seu trabalho Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005), realizaram os testes utilizando um dinamômetro inercial, teste tribológico classificado na categoria III, de acordo com as classificações dos sistemas tribológicos propostos por Uetz; Sommer; Khosrawi (1981) e Czichos (1985).

O dinamômetro é constituído basicamente de um motor elétrico, um volante de massa inercial, duas embreagens e sistema de medição de temperatura e torque para determinar o coeficiente de atrito. O motor elétrico aciona o volante da embreagem do lado do motor, e quando a embreagem é acoplada, o movimento de rotação é transmitido à massa inercial. Então, a embreagem é desacoplada, ficando o volante de massa girando devido à inércia. Com isto, a outra embreagem do lado da massa inercial acopla, atuando, assim, como um sistema de freio do volante da massa inercial. Após um determinado período de acoplamento, a embreagem é desacoplada, e o motor elétrico é novamente acionado, iniciando um novo ciclo. O tempo de cada teste é o tempo até ser completado um determinado número de ciclos de acoplamentos. O período de acoplamento e desacoplamento da embreagem é de aproximadamente 1 segundo para o uso em condições normais e períodos de até 4 segundos quando busca simular uso em condições extremamente severas.

A figura 4.16-a mostra o desenho esquemático do princípio de funcionamento do dinamômetro e a figura 4.16-b apresenta um dinamômetro utilizado nos testes de bancada.

A figura 4.17 mostra uma amostra de revestimento e placa de pressão, que foram utilizadas para a realização dos testes de bancada, e a tabela 4.5, por sua vez, mostra as condições tribológicas utilizadas nos testes de bancada.



(a)



(b)

Figura 4.16: (a)- representação esquemática dinamômetro; (b)- dinamômetro inercial (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).



(a)



(b)

Figura 4.17: Amostra utilizada no teste de bancada. (a)- disco de revestimento; (b)- placa de pressão (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).

Tabela 4.5: Condições dos parâmetros laboratoriais utilizados na realização dos ensaios com o dinamômetro inercial (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).

PARÂMETROS LABORATORIAIS	DINAMOMETRO INERCIAL
Velocidade Angular [rpm]	1500
Potência Motor [CV]	50
Energia [kJ]	38
Energia Específica [J/cm ²]	109
Amostra (mm)	$\phi=215$
Carga [N]	4000
Tempo teste [h]	240

O valor da energia de atrito gerada durante o acoplamento da embreagem pode ser obtida através da Eq. (4.1) (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).

$$E = W * \Delta Torque * \Delta Tempo \quad (4.1)$$

Onde:

$$\Delta Torque = F_{tangencial} * raio \quad (4.2)$$

$$\Delta Tempo = \text{Variação do tempo}$$

$$W = \text{Velocidade angular constante}$$

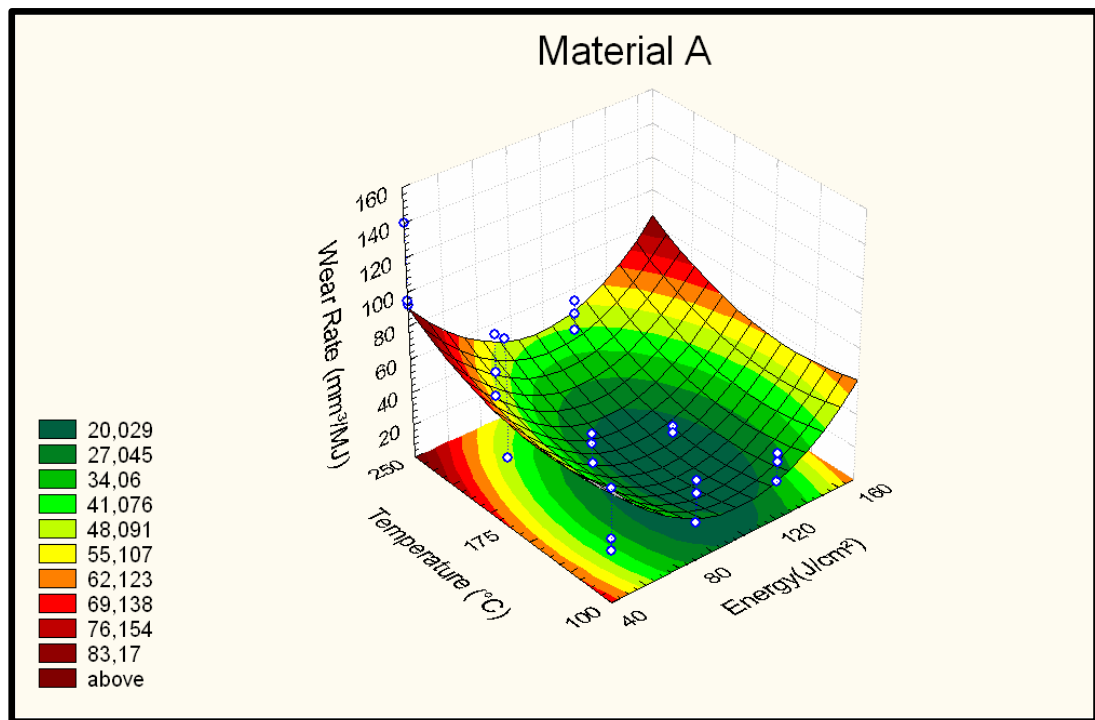
Conhecendo os valores dos parâmetros tribológicos utilizados nos testes de bancada e através da Eq. (4.1), pôde-se determinar o valor da energia de atrito gerada durante os ensaios tribológicos.

Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005) obtiveram os valores das energias geradas durante os ensaios tribológicos no dinamômetro utilizando revestimentos A e B. A figura 4.18 apresenta as taxas de desgaste dos revestimentos A e B que foram obtidas em função da temperatura e da energia de atrito gerada durante o acoplamento.

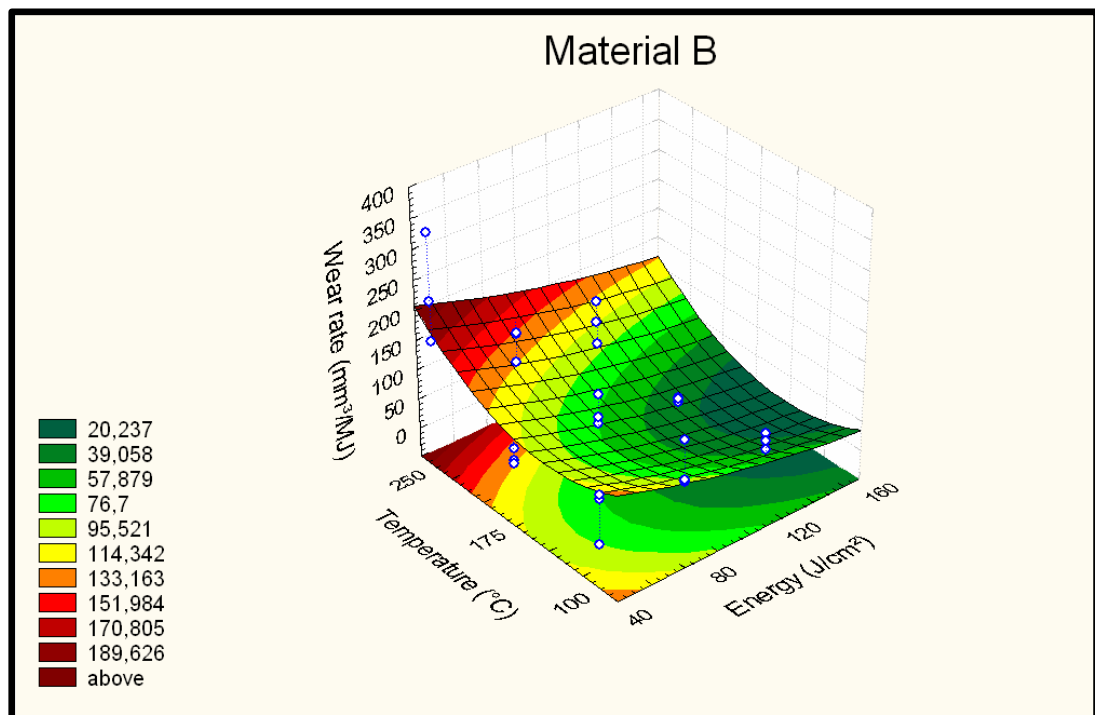
Como já mencionado, Czichos (1985) propôs que, para que haja similaridade das interações tribológicas, os valores de energia que são geradas nos sistemas tribológicos devem ser equivalentes. Com isso, buscou-se simular no tribômetro o mesmo nível de energia que é gerada no dinamômetro.

Utilizando a mesma Equação (4.1) usada por Gregori; Zanotto; Haertel Jr (2005), foi possível obter o valor da energia que é gerada no sistema tribológico utilizando o tribômetro, lembrando que os parâmetros aplicados na fórmula são os parâmetros laboratoriais adotados para a realização dos ensaios no tribômetro.

Com o auxílio do gráfico gerado por Gregori; Zanotto; Haertel Jr. (2005), figura 4.18, conhecendo-se os valores da energia gerada no sistema tribológico quando se utiliza o dinamômetro, e as respectivas taxas de desgaste dos revestimentos A e B que estão correlacionadas com os valores da energia, buscou-se reproduzir no tribômetro os mesmos níveis de energia. Com isso, buscou-se simular no laboratório comportamento idêntico ao obtido no dinamômetro.



(a)



(b)

Figura 4.18: Gráfico mostrando a taxa de desgaste que foi obtida em função da temperatura e da energia de atrito gerada durante o acoplamento da embreagem, quando testes foram realizados no dinamômetro inercial. (a)- revestimento A; (b)- revestimento B (Gregori; Zanotto; Haertel Jr., 2005).

Através da Equação (4.1), aumentando-se o valor da força normal aplicada, o valor da energia gerada no sistema aumenta também. Desta forma, adotou-se um novo valor para a força normal. Este valor foi de 70 N. Com este valor da força normal, obteve-se um valor de energia igual a 52 J/cm^2 . Através dos gráficos da figura 4.18 percebe-se que, para este valor de energia calculado, a taxa de desgaste do revestimento B é maior que a taxa de desgaste do revestimento A. Para validar este valor teórico, foi realizado um único ensaio laboratorial para o revestimento A e B, com força normal igual a 70N.

A figura 4.19 traz a taxa de desgaste dos revestimentos A e B utilizando força normal igual a 70N. Através desta figura, pode-se observar que, realmente, a taxa de desgaste do revestimento B é maior que a taxa de desgaste do revestimento A, validando assim, os cálculos realizados, e contrariando, mais uma vez, os resultados obtidos em campo.

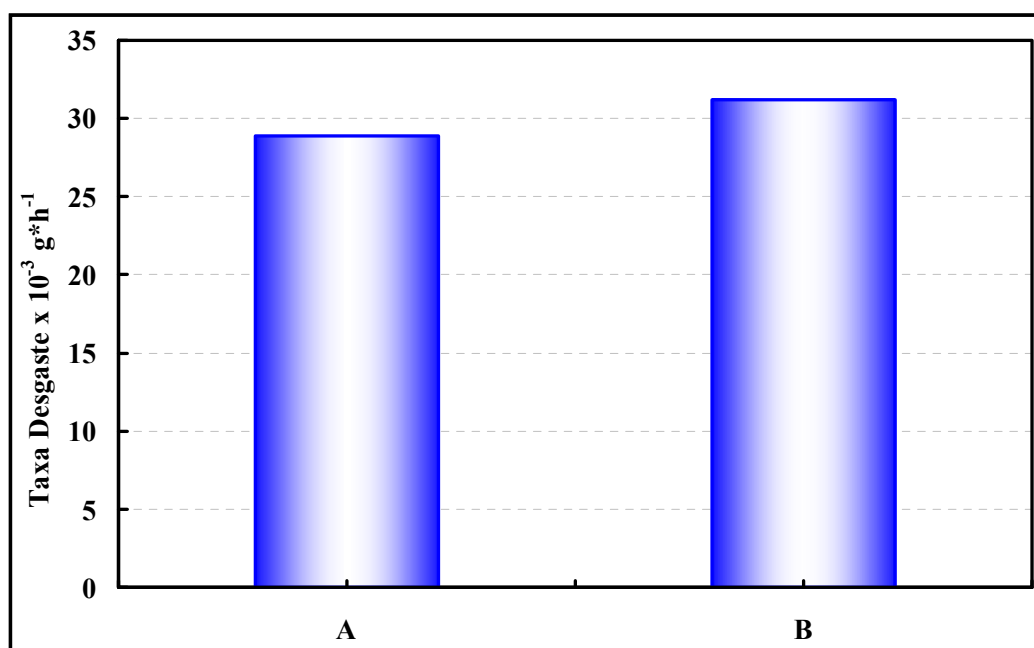


Figura 4.19: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos A e B para força normal de 70N.

Como não foi possível obter um comportamento similar ao obtido em campo aplicando uma força normal de 70 N, ajustou-se então, o valor da força normal igual a 150N. Com este valor, através da Eq. (4.1), obteve-se um valor de energia igual a 110 J/cm^2 . Através dos gráficos de energia, figura 4.18, observou-se que, para este valor de energia obtido, o revestimento B ainda apresenta taxa de desgaste maior que o revestimento A. Fizeram-se então três ensaios com cada tipo de revestimento, utilizando força normal de 150N, para validar os cálculos realizados.

A figura 4.20 apresenta o comportamento da taxa de desgaste para uma força normal aplicada de 150 N. Observa-se que a taxa de desgaste do revestimento B é maior do que a taxa de desgaste do revestimento A, contrariando mais uma vez os resultados obtidos em campo, mas validando novamente os valores calculados.

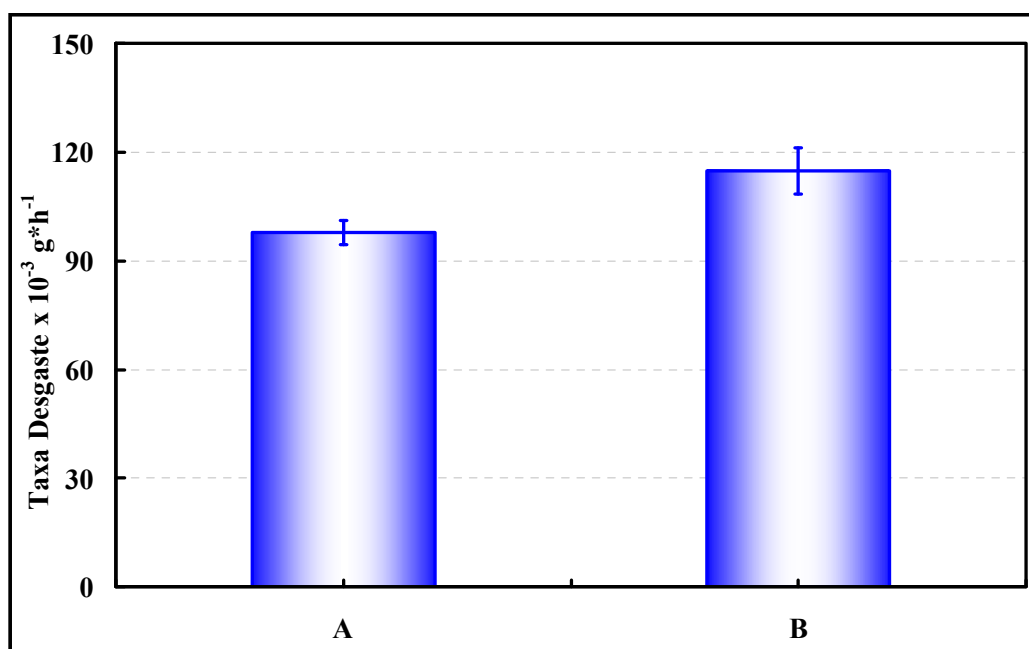


Figura 4.20: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos A e B para força normal de 150N.

Visto que foram realizados alguns ensaios variando a força normal na tentativa de obter um comportamento da taxa de desgaste do revestimento igual à obtida em condições reais, e como os resultados apresentados mostram que não foi possível obter similaridade com o campo, fez-se, então, o problema inverso. Através do gráfico de energia, figura 4.18, pôde-se obter a energia onde a taxa de desgaste do revestimento A é maior do que a do revestimento B. O valor da energia é 160 J/cm^2 . Conhecendo então este valor e através da equação (4.1) pôde-se calcular o valor da força normal necessária para simular no tribômetro esta energia. O valor da força normal obtido foi de 200N. Foram então realizados três ensaios laboratoriais para cada revestimento, para validar o valor da força normal determinada.

A figura 4.21 mostra a taxa de desgaste dos revestimentos. Através da referida figura, observa-se que a taxa de desgaste do revestimento B foi, estatisticamente, menor do que a taxa de desgaste do revestimento A. Com este resultado, foi possível reproduzir em laboratório a classificação apresentada pelos materiais em condições reais, conforme foi apresentado na figura 4.2.

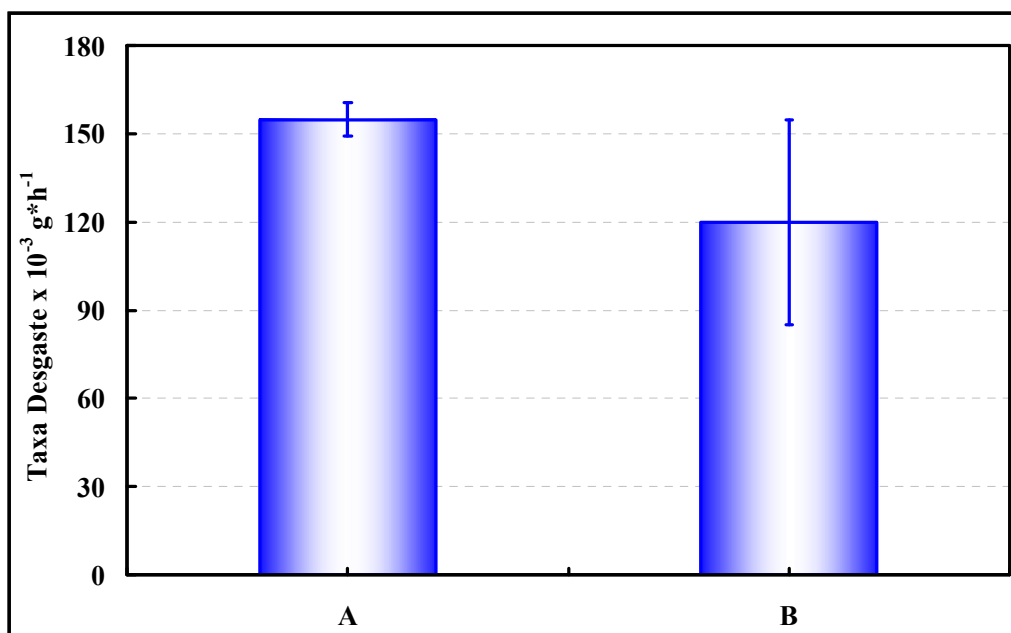


Figura 4.21: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos A e B para força normal de 200N.

A figura 4.22 apresenta a taxa de desgaste dos revestimentos para os diferentes ensaios tribológicos variando a força normal aplicada. Estes resultados apresentados são resultados condizentes com os gráficos apresentados na figura 4.18. Observa-se também que, quanto maior é o valor da força normal, maior é o valor da taxa de desgaste, o que, de fato, era esperado.

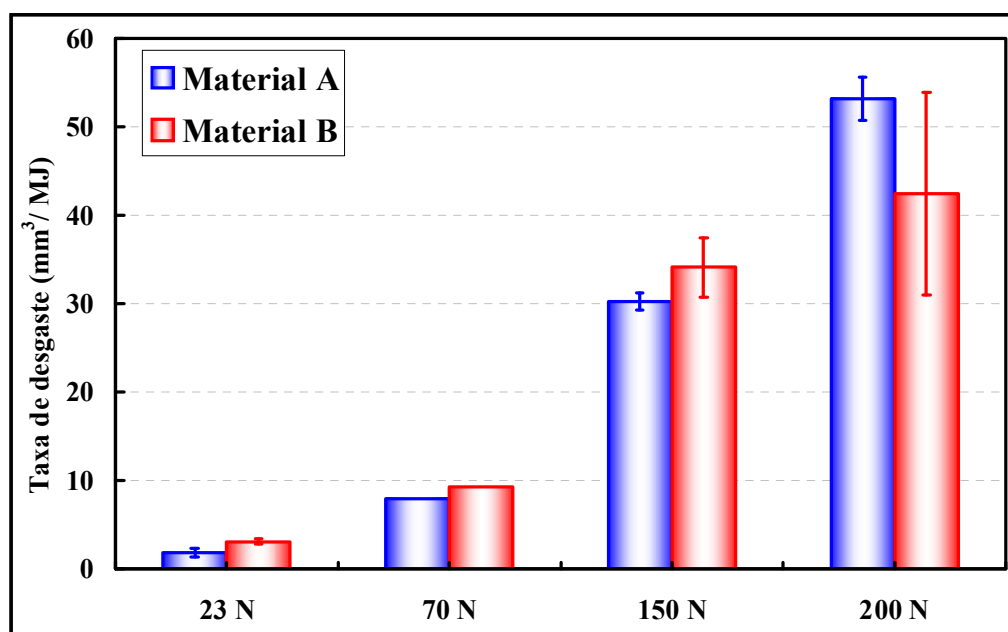


Figura 4.22: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos para as diferentes forças normais aplicadas.

O coeficiente de atrito e a temperatura dos revestimentos A e B apresentaram comportamentos similares, nos diversos ensaios realizados, quando a força normal foi variada. Desta forma, será apresentado somente o comportamento do coeficiente de atrito e da temperatura dos ensaios submetidos a força normal de 200N, sendo que, foi para este valor de força normal, que foi possível reproduzir em laboratório comportamento similar ao campo, para o mesmo tipo de material.

A figura 4.23 apresenta a evolução da temperatura e do coeficiente de atrito do revestimento A com o decorrer do tempo de ensaio. Esta figura mostra a evolução da temperatura em função das horas de ensaio que foi obtida com o sensor infravermelho cuja emissividade estava ajustada em 0,3. A figura mostra também a evolução da temperatura que esta mais próxima da realidade, sendo que esta temperatura foi obtida através da equação de correlação apresentada na figura 4.13. Observa-se na figura 4.23 que a temperatura em ambos os casos apresentam um comportamento similar, mas o valor real da temperatura é inferior ao valor obtido com o sensor infravermelho. Pode-se observar que a temperatura cresce rapidamente no início do ensaio, permanecendo crescente com a primeira hora de ensaio e tendendo a estabilização com a evolução do ensaio.

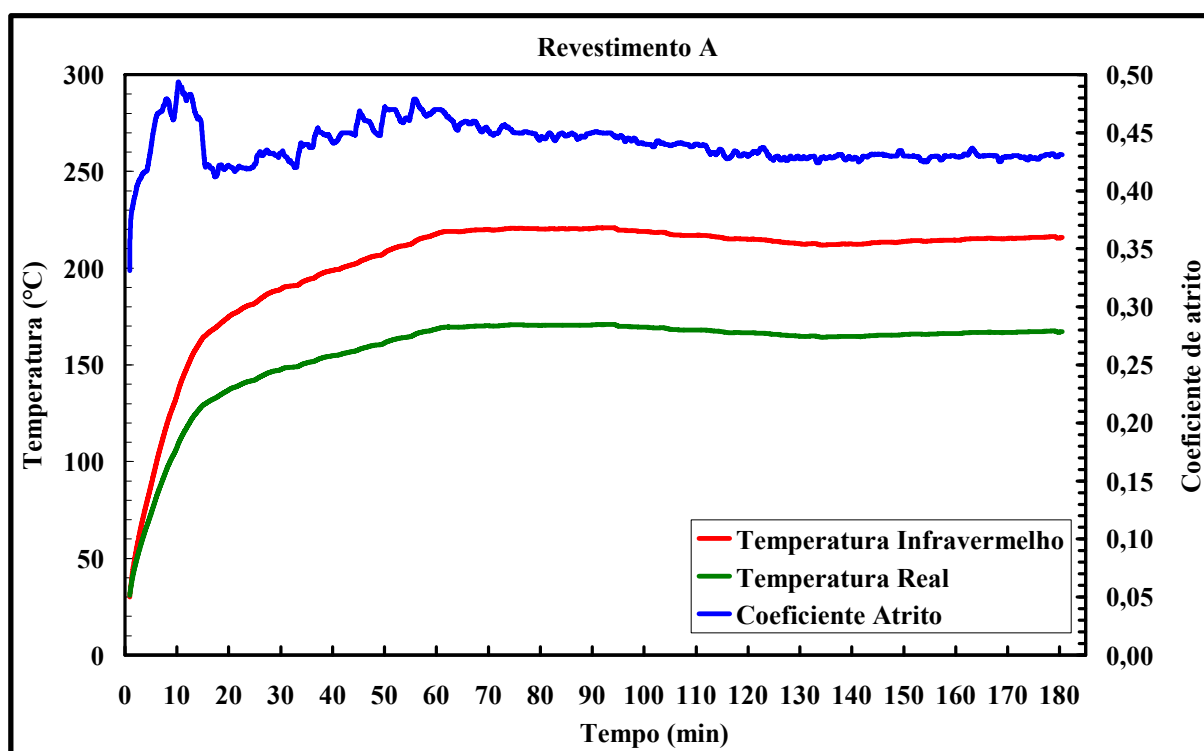


Figura 4.23: Evolução do coeficiente de atrito e da temperatura obtida pelo sensor infravermelho e da temperatura calibrada, em função do tempo de ensaio do revestimento A.

Analisando a evolução do coeficiente de atrito na figura 4.23, observa-se que o atrito cresce rapidamente no início do ensaio, atingindo um valor máximo, decrescendo até atingir um valor mínimo e tornando-se crescente novamente até atingir um valor que tende à estabilização com a evolução do ensaio.

Comportamento do coeficiente de atrito similar ao mostrado na figura 4.23 foi obtido por Bezzazi et al, recentemente em 2007, como está apresentado na figura 4.24.

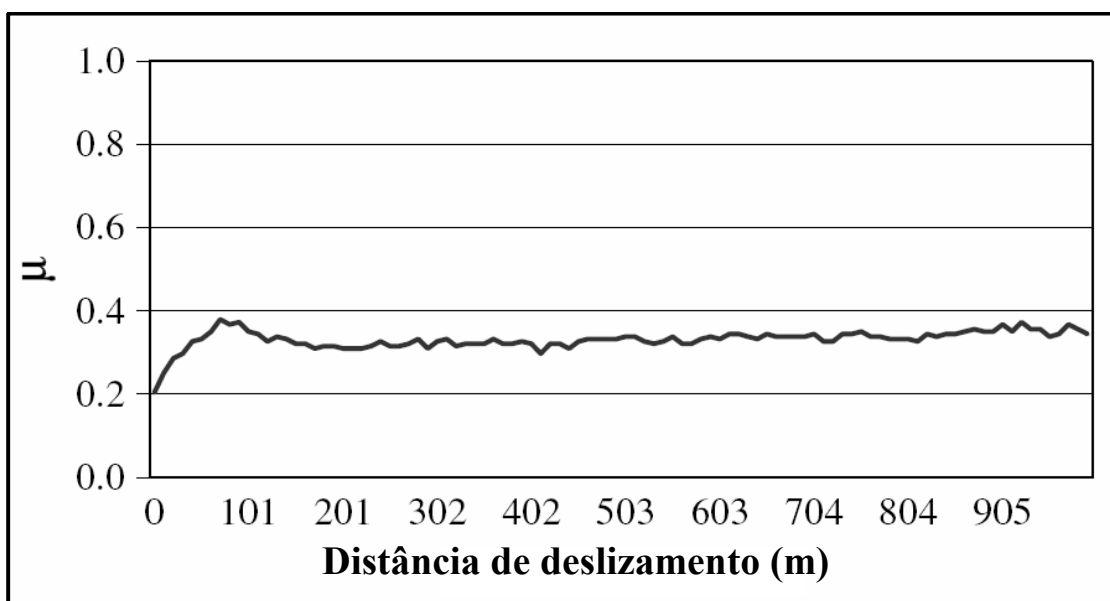


Figura 4.24: Evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, para os ensaios tribológicos realizados no tribômetro por Bezzazi et al (2007).

Em seu trabalho Bezzazi et al (2007) realizaram testes laboratoriais para caracterizar experimentalmente o comportamento do coeficiente de atrito quando submetidos a ensaios tribológicos. Bezzazi et al (2007) utilizaram um tribômetro idêntico ao que foi utilizado neste trabalho para a realização dos ensaios tribológicos. Foi também utilizada a configuração pino sobre disco. Ao contrário deste trabalho onde a amostra de revestimento foi o corpo, e o disco de ferro fundido cinzento o contra-corpo, no trabalho de Bezzazi et al (2007) foram utilizados pinos de aço de 8 mm diâmetro, comprimento de 67,8 mm e dureza de 230 HB como corpo, e discos de 74 mm de diâmetro e 8 mm de espessura, tendo a mesma constituição do revestimento, especialmente fabricados, como contra-corpo.

A figura 4.24 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito obtido por Bezzazi et al (2007), para uma força normal aplicada de 53N, velocidade de deslizamento de 1 m/s e temperatura de aquecimento do contra-corpo igual a 100°C. Observa-se que o coeficiente de

atrito é crescente no início do ensaio, atingindo um máximo, diminuindo logo em seguida e tendendo à estabilização com o decorrer do ensaio.

Há uma desvantagem na utilização da configuração adota por Bezzazi et al (2007). Para a confecção do disco de revestimento há a necessidade de um molde exclusivo, enquanto que, na configuração utilizada neste trabalho, amostras de revestimento podem ser obtidas diretamente do disco de revestimento.

4.3 – Correlação Entre os Resultados dos Testes no Tribômetro e Dinamômetro

Fernandes et al em 2006, fizeram uma correlação entre os resultados obtidos dos testes realizados no tribômetro, com os resultados dos testes realizados no dinamômetro pelo Laboratório de Desenvolvimento de Materiais de Atrito, da empresa ZF_Sachs do Brasil. O principal objetivo desta correlação foi mostrar que, através da realização de testes, na configuração pino sobre disco utilizando um tribômetro, foi possível encontrar uma boa correlação dos resultados que são obtidos no dinamômetro, tanto para a taxa de desgaste quanto para o coeficiente de atrito.

A tabela 4.6 mostra os parâmetros laboratoriais utilizados em ambos os testes.

Tabela 4.6: Correlação entre os parâmetros laboratoriais utilizados em ambos os testes.

	Dinamômetro Inercial	Tribômetro
Velocidade angular [rpm]	1500	750
Potência elétrica [CV]	50	3,15
Energia [kJ]	38	1825
Energia Específica [J/cm^2]	109	160
Amostra (mm)	$\phi=215$	$\phi=13$
Carga [N]	4000	200
Tempo de teste [h]	240	3

As diferenças mais significantes entre os parâmetros utilizados entre os dois testes foram: o tempo de ensaio e as dimensões das amostras. Observa-se na tabela 4.6, que há uma diferença muito grande entre os tempos de ensaio, enquanto que, no dinamômetro, testes tribológicos foram realizados em até dez dias, no tribômetro, os ensaios foram realizados em três horas. Há uma redução de aproximadamente 98% no tempo de teste quando se utiliza o

tribômetro. Outra grande diferença está nas dimensões das amostras. No dinamômetro as amostras são em tamanho real, onde os diâmetros das amostras variaram entre 215 mm para os materiais que são utilizados na linha leve, e 430 mm para os materiais utilizados na linha pesada. No tribômetro as amostras são em escala reduzida, sendo que o diâmetro das amostras de revestimento é igual a 13 mm, e 74 mm para as amostras da placa de pressão.

A figura 4.25 apresenta a correlação da taxa de desgaste dos revestimentos, que foram submetidos a ensaios no tribômetro e dinamômetro. Observa-se que a equação da reta da regressão linear apresenta um coeficiente de correlação muito próximo de 1, mostrando que há uma forte correlação entre os valores da taxa de desgaste obtidos no tribômetro com os valores da taxa de desgaste obtidos no dinamômetro.

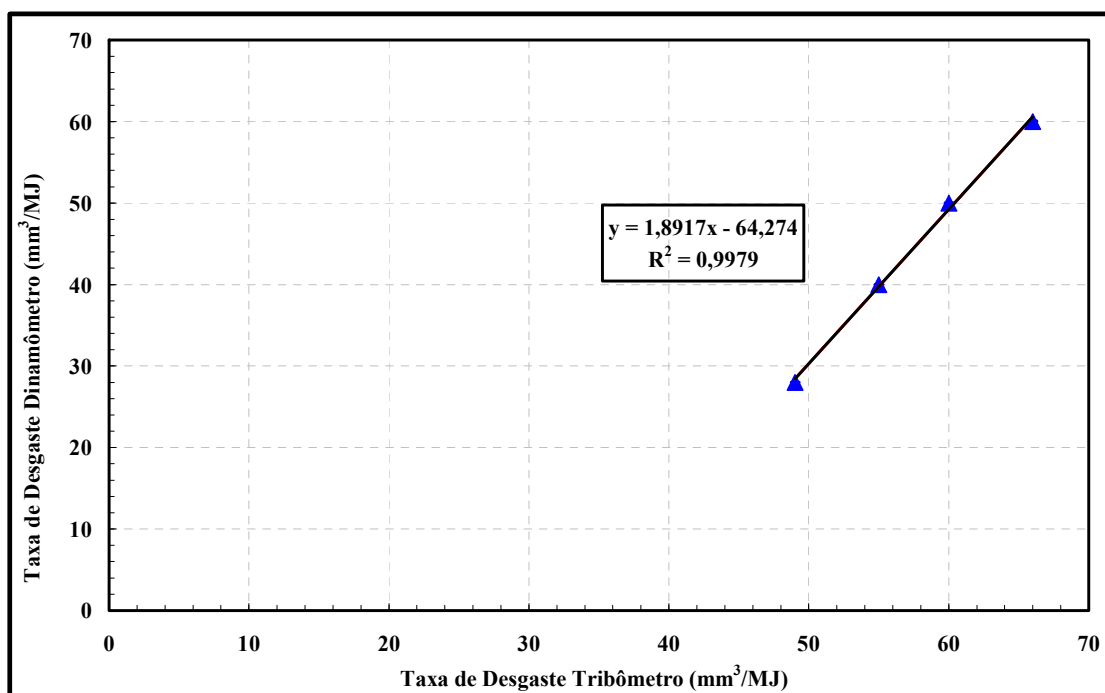
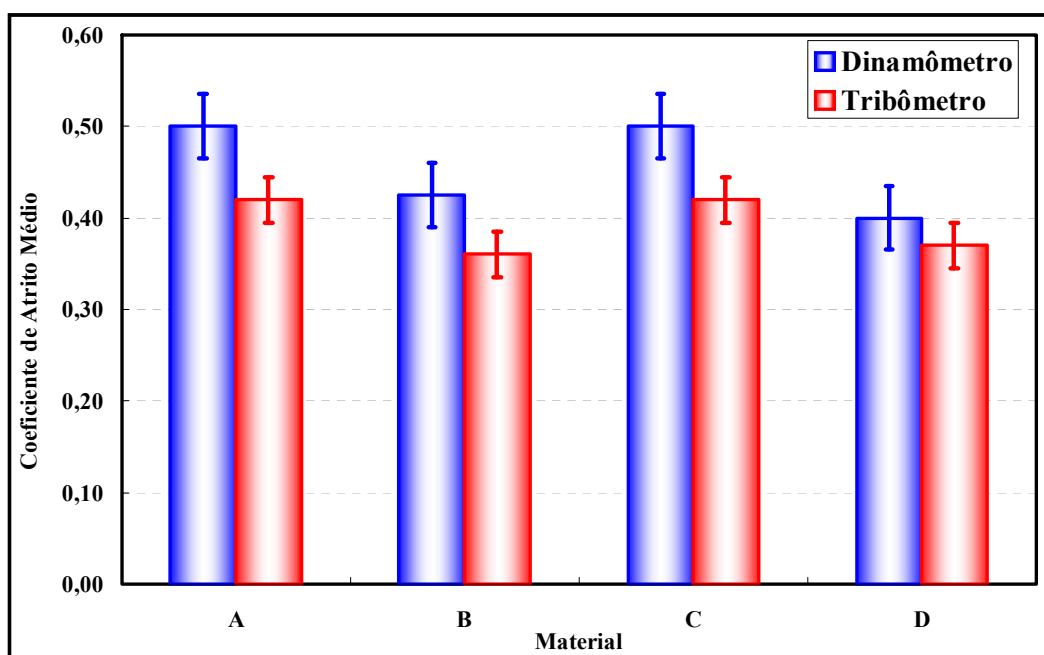


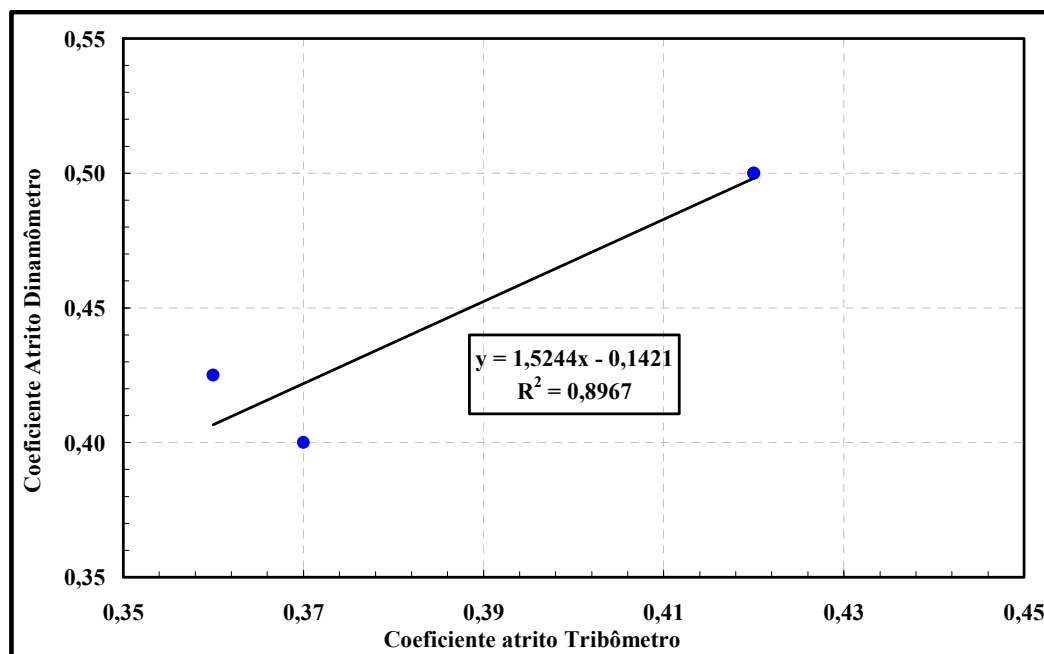
Figura 4.25: Correlação entre a taxa de desgaste dos testes tribológicos realizados no tribômetro e os testes tribológicos realizados no dinamômetro.

A figura 4.26-a apresenta uma correlação qualitativa entre o coeficiente de atrito médio dos testes tribológicos realizados no tribômetro com os testes realizados no dinamômetro. Esta correlação teve como objetivo mostrar que há uma mesma tendência de comportamento do coeficiente de atrito. Pode-se ver através da figura 4.26-a, que o coeficiente de atrito médio obtidos pelo dinamômetro dos materiais A e C, são estatisticamente iguais, sendo maiores do que o coeficiente de atrito médio dos materiais B e D, que por sua vez, apresentam também, estatisticamente, coeficientes de atrito iguais.

Comportamento semelhante a este é também observado para o coeficiente de atrito médio obtidos com o tribômetro. Os materiais A e C apresentam, estatisticamente, o mesmo coeficiente de atrito, sendo estes, maiores do que B e D, que por sua vez, também são, estatisticamente, iguais.



(a)



(b)

Figura 4.26: Correlação entre o coeficiente de atrito médio dos testes tribológicos realizados no tribômetro e os testes tribológicos realizados no dinamômetro. (a)- correlação qualitativa; (b)- correlação quantitativa.

Fazendo uma correlação quantitativa entre os valores do coeficiente de atrito médio da figura 4.26-a, obtém-se uma reta de regressão linear como está apresentado na figura 4.26-b. Esta reta apresenta um coeficiente de correlação próximo de 1, indicando que há uma boa correlação entre os valores do coeficiente de atrito obtido no tribômetro com o obtido no dinamômetro.

Bezzazi et al (2007) também fizeram uma correlação do comportamento do coeficiente de atrito obtido com testes realizados no tribômetro com o comportamento do coeficiente de átrio obtido com testes realizados no dinamômetro, de acordo com as normas SAE J661a. Bezzazi et al (2007) concluíram que o comportamento do coeficiente de atrito obtido utilizando um tribômetro é idêntico ao comportamento do coeficiente de atrito quando se utiliza um dinamômetro.

4.4 - Validação da Otimização do Tempo de Ensaio Para Ensaio Laboratoriais Utilizando Força Normal de 200 N.

Esta etapa teve como objetivo verificar se as taxas de desgaste do revestimento e placa de pressão apresentariam comportamentos similares àqueles apresentados na figura 4.6, aplicando uma força normal igual a 200 N. Conforme foi apresentado na figura 4.6, as taxas de desgaste do revestimento e da placa de pressão são maiores nas três primeiras horas de ensaio e tendem a estabilização a partir desta hora.

Para a realização desta etapa, foram utilizadas amostras de revestimento do tipo E e F. Estas amostras apresentam características similares às amostras utilizadas na validação dos ensaios laboratoriais. Foi realizada uma série de quatro ensaios interrompidos com a duração de uma hora cada, para cada tipo de revestimento. Nestes ensaios, a força normal aplicada foi 200 N. Os outros parâmetros laboratoriais foram os mesmos utilizados durante o desenvolvimento da metodologia que permitiu simular no tribômetro interações tribológicas semelhantes a da realidade.

A figura 4.27 apresenta a evolução da taxa de desgaste em função das horas de ensaio dos revestimentos e placas de pressão. Observa-se na figura 4.27 que a taxa de desgaste dos revestimentos E e F, bem como as das placas de pressão apresentaram comportamentos muito semelhantes aos que foram mostrados anteriormente pelo conjunto A, na figura 4.6. Nota-se que a taxa de desgaste é maior nas três primeiras horas, tendendo a estabilização a partir desta

hora de ensaio. Este comportamento é observado tanto para o revestimento quanto para a placa de pressão.

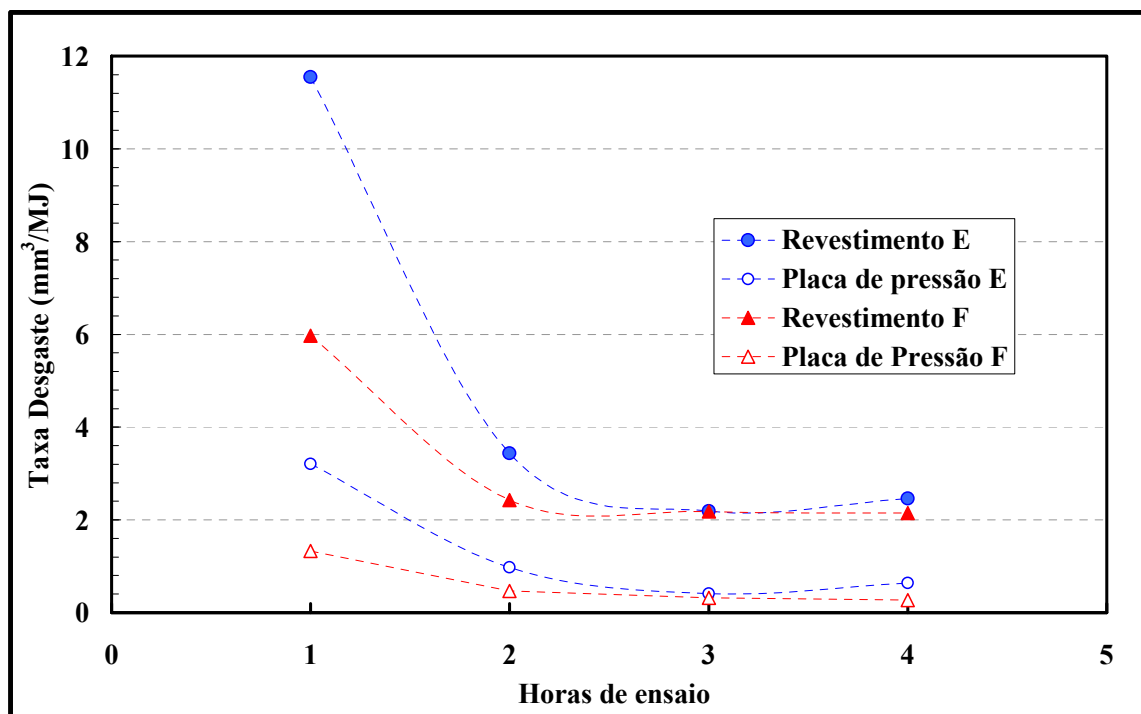
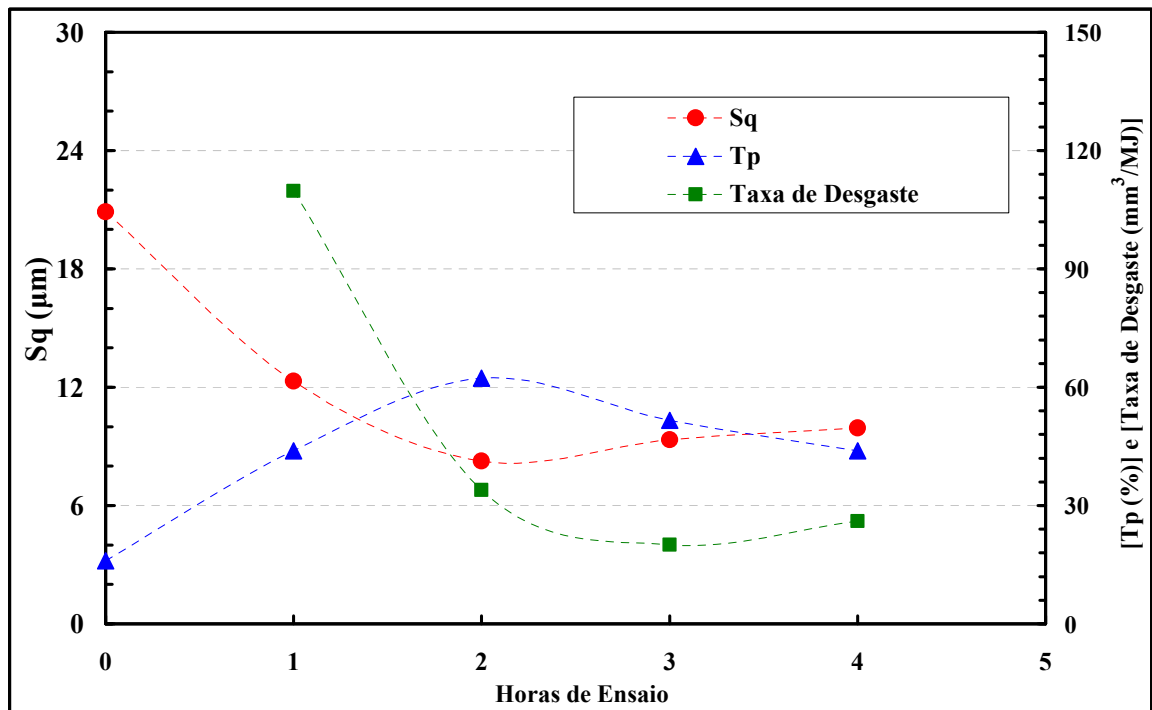


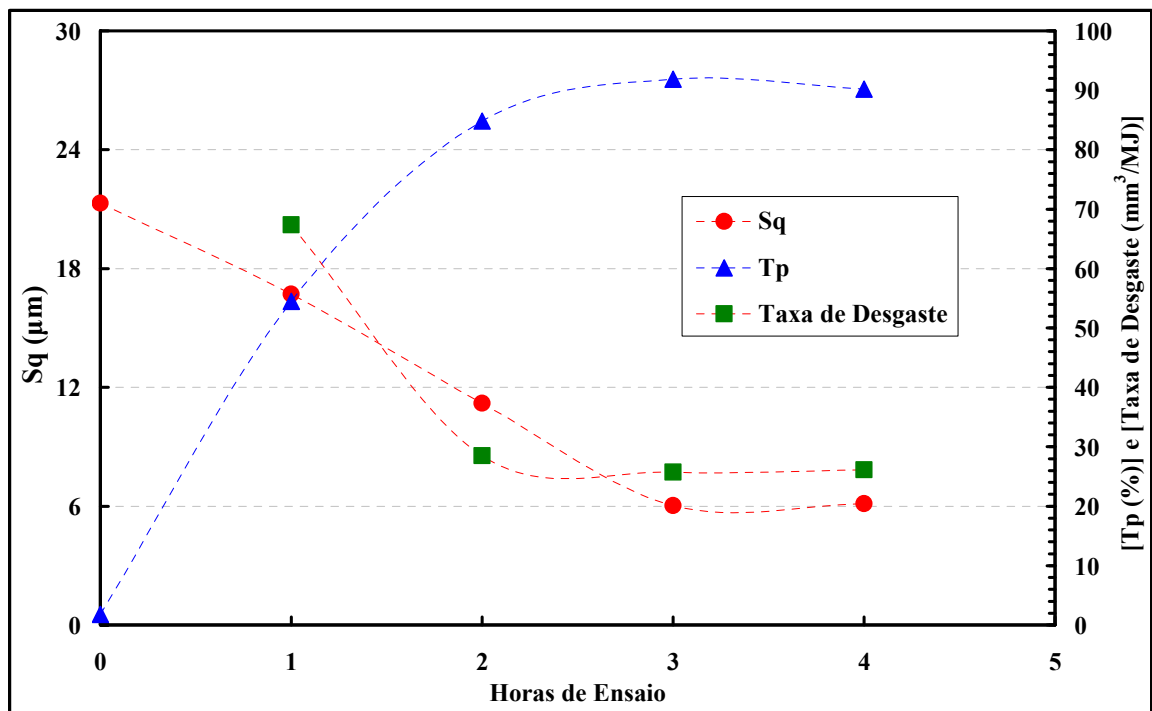
Figura 4.27: Evolução da taxa de desgaste dos revestimentos e placas de pressão E e F.

A figura 4.28-a e 4.28-b mostram uma correlação entre a taxa de desgaste dos conjuntos (revestimento mais placa de pressão) E e F respectivamente, com a rugosidade quadrática média e a capacidade de apoio para as diferentes horas de ensaio. É importante ressaltar aqui que a capacidade de apoio nesta etapa foi determinada utilizando os seguintes parâmetros: uma porcentagem inicial de apoio igual a 1% e a profundidade ativa de 20 μm . Posteriormente na caracterização topográfica será apresentado os resultados do estudo realizado para a otimização dos parâmetros para a caracterização topográfica.

Observa-se na figura 4.28-a que quando o valor da rugosidade quadrática média é alto, a capacidade de apoio é baixa e a taxa de desgaste é alta. Quando o valor da rugosidade quadrática média tende a diminuir, a capacidade de apoio tende a aumentar e a taxa de desgaste tende a diminuir. E que, quando a rugosidade quadrática média e a capacidade de apoio tendem a estabilização, a taxa de desgaste também tende a estabilização. Este comportamento descrito para ser um comportamento bastante típico, uma vez que, foi também observado para o conjunto F, conforme está demonstrado na figura 4.28-b, e que, já foram apresentados na figura 4.8.



(a)



(b)

Figura 4.28: Correlação entre a taxa de desgaste com a rugosidade quadrática média e capacidade de apoio para força normal de 200 N. (a)- revestimento E; (b)- revestimento F.

As placas de pressão E e F apresentaram comportamento similar ao do revestimento. Quando a rugosidade quadrática média diminui, a capacidade de apoio aumenta, e ambos

parâmetros tendem à estabilização a partir da terceira hora de ensaio com o decorrer das horas de ensaio.

4.5 – Conclusões Parciais

De acordo com a análise dos resultados, sintetizam-se as seguintes conclusões. Através dos ensaios tribológicos simplificados, utilizando um tribômetro na configuração pino sobre disco, foi possível simular, de forma semelhante, os mecanismos de desgaste atuantes nas condições reais de uso. Foi possível também simular no laboratório resultados equivalentes aos que são obtidos em campo, em termos de durabilidade dos revestimentos.

A correlação entre a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito que foram obtidos com a realização de testes no tribômetro e dinamômetro mostraram que os resultados obtidos com testes no tribômetro são confiáveis. Sendo assim, o tribômetro pode ser utilizado para o estudo e desenvolvimento de materiais para embreagem automotiva. Além deste fator, há uma redução do tempo de teste de até 10 dias no dinamômetro para 3 horas no tribômetro, e conseqüentemente redução do custo para a confecção dos protótipos.

A tabela 4.7 sintetiza os parâmetros laboratoriais para a realização de testes tribológicos simplificados utilizando um tribômetro na configuração pino sobre disco.

Tabela 4.7: Parâmetros laboratoriais para testes laboratoriais que simulam comportamentos tribológicos semelhantes aos da realidade, quando se utiliza um tribômetro.

PARÂMETROS LABORATORIAIS	TRIBÔMETRO
Amostra revestimento (mm)	$\varnothing = 13$
Amostra placa de pressão (mm)	$\varnothing_{\text{ext}} = 76$ $\varnothing_{\text{int}} = 8$
Velocidade de Rotação (RPM)	750
Força Normal (N)	200
Tempo de Teste (h)	3
Raio (mm)	25
Meio	Ar ambiente
Condições de teste	a seco

Conclui-se também que o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste estão relacionados com a topografia do revestimento. A taxa de desgaste e o coeficiente de atrito tendem a estabilização a partir da terceira hora de ensaio, assim como a rugosidade quadrática média e a capacidade de apoio também tendem a estabilização a partir da terceira hora de ensaio.