

MARCIA MARIE MARU

**ESTUDO DO DESGASTE E ATRITO DE UM PAR
METÁLICO SOB DESLIZAMENTO LUBRIFICADO**

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

São Paulo
2003

MARCIA MARIE MARU

**ESTUDO DO DESGASTE E ATRITO DE UM PAR
METÁLICO SOB DESLIZAMENTO LUBRIFICADO**

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

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Titular
Dr. Deniol Katsuki Tanaka

São Paulo
2003

FICHA CATALOGRÁFICA

Maru, Marcia Marie

Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado / Marcia Marie Maru. -- São Paulo, 2003. 254 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Desgaste 2.Atrito 3.Lubrificante parafínico 4.Contaminante abrasivo 5.Lubrificação mista 6.Movimento rotativo 7.Movimento oscilatório 8.Carregamento mecânico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

À Fapesp, pelo financiamento deste trabalho através do projeto 97/12753-9 (bolsa de doutorado).

Ao Prof. Dr. Deniol Katsuki Tanaka, por sua orientação, confiando-me a realização deste trabalho com liberdade e autonomia.

Ao Prof. Dr. Roberto Martins de Souza, pelas proveitosas sugestões nas várias etapas de realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Amilton Sinatora, Prof. Dr. Linilson R. Padovese e Prof. Dr. João Telésforo N. de Medeiros, pelas sugestões, incentivo, preocupação e apoio durante este período.

Ao Dr. Eduardo Tomanik, da empresa Mahle, pela participação nas discussões deste trabalho, e ao pessoal do Laboratório de Metrologia da Mahle, pela realização das medições de perfil das amostras metálicas.

À Dra. M^a. Adelina Araújo, da empresa Petrobrás, pela atenção e apoio durante a estadia no Centro de Pesquisas - Cenpes, pelo fornecimento do óleo neutro para as amostras de ensaio e pelas discussões sobre lubrificantes, e ao pessoal técnico do Cenpes, pelo apoio nas caracterizações de óleo.

Ao Eng. Tarcísio Baroni, da empresa Tribolab, pelas análises de óleo e pelas discussões realizadas.

Ao Prof. Dr. André P. Tschiptschin e à Enga. MSc. Clarice Kunioshi, do Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, pela permissão e realização da microscopia eletrônica de varredura.

À Silene e ao Sidney M. Carneiro da Silva, pela paciência, apoio e compreensão.

Aos colegas técnicos, engenheiros, mestrandos e doutorandos do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) e do Laboratório de Dinâmica (LADIN) do Depto. de Eng. Mecânica, e do Laboratório de Metalografia do Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, pelas experiências compartilhadas e pelo companheirismo, solidariedade e paciência que me foram destinados durante momentos importantes e pelas discussões, tanto acerca do tema deste trabalho, como nos trabalhos em conjunto realizados.

A meus pais
pela compreensão e apoio incondicionais

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 DESGASTE	9
2.1.1 <i>Tribo-superfícies de materiais metálicos</i>	10
2.2 ATRITO.....	17
2.3 AÇÃO DO LUBRIFICANTE	20
2.3.1 <i>Viscosidade do lubrificante</i>	22
2.3.2 <i>Formação de filme lubrificante</i>	25
2.4 ATRITO NO SISTEMA LUBRIFICADO.....	34
2.5 DESGASTE NO SISTEMA LUBRIFICADO	41
2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A COMPOSIÇÃO DO ÓLEOS LUBRIFICANTES	44
2.7 PARTÍCULAS DE DESGASTE.....	49
2.8 ENSAIOS DE DESGASTE.....	51
2.9 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS.....	57
2.9.1 <i>Desempenho triboquímico de filmes lubrificantes</i>	58
2.9.2 <i>Influência da rugosidade no desgaste lubrificado</i>	67
2.9.3 <i>Influência do abrasivo no desgaste lubrificado</i>	71
2.9.4 <i>Desgaste e atrito relacionados com regimes de lubrificação</i>	78
2.9.5 <i>Sistemas de ensaio</i>	86
2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	89
3.1 CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	89
3.2 EQUIPAMENTOS.....	90
3.3 MATERIAIS METÁLICOS	96
3.4 ÓLEOS LUBRIFICANTES.....	105
3.5 ABRASIVO	108
3.6 PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE DESLIZAMENTO	110

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	114
4.1 DESGASTE.....	115
4.1.1 <i>Desgaste medido pelo sensor WEAR</i>	115
4.1.2 <i>Considerações sobre o cálculo do volume de desgaste do pino</i>	118
4.1.3 <i>Morfologia microscópica das superfícies</i>	121
4.1.4 <i>Desgaste dimensional</i>	146
4.1.5 <i>Perfilometria e rugosidade</i>	156
4.1.6 <i>Considerações quanto ao desgaste</i>	165
4.2 POTENCIAL DE CONTATO	166
4.3 ATRITO.....	177
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO GERAL.....	188
5.1 CARACTERÍSTICAS DE INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE ENSAIO NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO.....	188
5.2 INFLUÊNCIA DO MOVIMENTO E DO FLUXO DE ÓLEO NA INTERFACE DESLIZANTE.....	191
5.3 DESGASTE EM FUNÇÃO DO CARREGAMENTO MECÂNICO.....	192
5.4 ATRITO EM FUNÇÃO DO CARREGAMENTO MECÂNICO	204
5.5 ESPESSURA DO FILME DE LUBRIFICANTE NA INTERFACE	205
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	208
ANEXO A: MORFOLOGIA MICROSCÓPICA DAS AMOSTRAS ENSAIADAS	213
ANEXO B: RESULTADOS DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO POTENCIAL DE CONTATO ELÉTRICO	223
ANEXO C: RESULTADOS DA ANÁLISE DO ÓLEO	233
ANEXO D: CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE DESGASTE	239
ANEXO E: INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE INICIAL – DIFERENÇA ENTRE OS LOTES	245
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	248

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo experimental das respostas de desgaste e de atrito encontradas em um sistema deslizante lubrificado. Para tanto, foram realizados ensaios de deslizamento em um equipamento para ensaios de desgaste, adotando-se o dispositivo pino-contra-disco, para ensaios com movimento relativo rotativo contínuo entre as amostras, e o dispositivo pino-contra-placa, para ensaios com movimento relativo alternado, ou oscilatório, entre as amostras. Os materiais metálicos ensaiados foram pinos de aço AISI 52100 e contra-corpos de aço AISI 8640. O óleo lubrificante foi o mineral de base parafínico, IV 100. Foram variadas as condições de aditivação e de contaminação do óleo lubrificante e foram utilizados dois níveis de carregamento mecânico, determinada pela relação velocidade/carga. O desgaste foi estudado por microscopia óptica e eletrônica de varredura, medição da área afetada pelo desgaste, perfilometria das superfícies desgastadas e análise de óleo. O atrito e o potencial de contato foram monitorados ao longo dos ensaios. Os resultados obtidos mostraram que o desgaste dos corpos metálicos foi sensível ao carregamento mecânico, à aditivação e à contaminação do óleo. Diferenças foram notadas nas morfologias superficiais entre os resultados de desgaste dos ensaios rotativos e oscilatórios.

Palavras-chave: desgaste, atrito, lubrificante parafínico, contaminante abrasivo, movimento rotativo, movimento oscilatório, carregamento mecânico, lubrificação mista.

ABSTRACT

This work concerns with experimental study of wear and friction responses of lubricated sliding system. Sliding tests were carried out using pin-on-disk wear testing machine for tests with continuous rotating movement, and the pin-on-plate device, for reciprocating tests between specimens. The metallic test coupons were AISI 52100 steel pins and AISI 8640 steel counter-faces. The used lubricant was paraffinic mineral oil, VI 100. The presence of additives and contamination in the lubricant oil were investigated under two mechanical loading levels, determined by the velocity/load relation. The wear was studied by means of optic and scanning electronic microscopes, profilometry and dimensional analysis of the worn surfaces and oil analysis. The friction and the contact potential were monitored through out the sliding tests. The results showed that the wear of the metallic materials was susceptible to the mechanical loading, the additive and the contamination existence in the oil. It was observed differences among the wear results of the rotating and the reciprocating tests in terms of surface morphologies.

Key words: wear, friction, paraffinic oil, abrasive contaminant, rotating movement, reciprocating movement, mechanical loading, mixed lubrication.

LISTA DE SÍMBOLOS

Parâmetros numéricos

α :	nível de significância utilizado na análise estatística de dados
α :	parâmetro do óleo da variação da viscosidade com a pressão [Pa^{-1}]
η :	viscosidade dinâmica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]; [10^3 cP]
λ :	fator de filme = h/σ , com h = espessura do filme de lubrificante e σ = rugosidade combinada das superfícies
ν_i :	coeficiente de Poisson do corpo i
τ :	tensão de cisalhamento [MPa]
ρ :	massa específica [kg/m^3]
σ :	rugosidade combinada das superfícies = $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$, com σ_i na maioria das vezes considerada como sendo a rugosidade Ra_i da superfície do corpo i ($i = 1, 2$)
γ :	deformação ao cisalhamento
ΔS :	distância percorrida [m]
E' :	módulo de elasticidade [MPa] combinado do contato, com $1/E' = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$, ν_i = coeficiente de Poisson do corpo i e E_i = módulo elástico do corpo i
E_i :	módulo de elasticidade [MPa] do corpo i
k :	coeficiente dimensional de desgaste do modelo de Archard [$\text{mm}^3 / (\text{N}\cdot\text{m})$]
h :	espessura do filme de lubrificante [mm]
H :	dureza do material [MPa]
IV :	índice de viscosidade do lubrificante
Q :	volume de desgaste [mm^3]
R :	raio equivalente do contato [m], onde $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, e R_i = raio de contato do corpo i
R_i :	raio de contato do corpo i [m]
Ra :	parâmetro de rugosidade – altura média de asperezas [μm]
Ra_i :	parâmetro de rugosidade – altura média de asperezas [μm] da superfície do corpo i
Sm :	parâmetro de rugosidade – espaçamento horizontal médio entre asperezas [mm]
P :	pressão nominal de contato [MPa]
P_{Hmax} :	pressão máxima de Hertz [MPa]
P_{Hnom} :	pressão nominal de Hertz (pressão nominal aplicada na área de Hertz) [MPa]
V :	velocidade de deslizamento [m/s]
V_{med} :	velocidade média [m/s]
W :	carga normal [N]
W' :	carga normal por unidade de comprimento [N/m]
Z :	viscosidade cinemática [mm^2/s] ou [cSt]
$\eta V/W$:	parâmetro utilizado na curva de Stribeck, relaciona viscosidade do fluido lubrificante, velocidade de deslizamento e carga mecânica aplicada

Abreviaturas

EHL:	elastohidrodinâmico
HD:	hidrodinâmico
AES:	espectroscopia de elétrons Auger

XPS:	espectroscopia fotoeletrônica de raios-X
STEM:	microscopia eletrônica de transmissão com varredura
MEV:	microscópio eletrônico de varredura
EDAX:	espectrometria de dispersão de energia de raios-X
IV:	índice de viscosidade
EP:	aditivo do lubrificante, que atuam em situações de extrema pressão

Codificações

P:	ensaio oscilatório, maior carregamento
PP:	ensaio oscilatório, menor carregamento
PPc:	ensaio oscilatório, menor carregamento, óleo contaminado
D:	ensaio rotativo, maior carregamento
DD:	ensaio rotativo, menor carregamento
DDc:	ensaio rotativo, menor carregamento, óleo contaminado
SA:	ensaio com óleo sem aditivação
CA:	ensaio com óleo com aditivação
c SA:	ensaio com óleo sem aditivação e com contaminação
c CA:	ensaio com óleo com aditivação e com contaminação
Mo:	ensaio sob o maior nível de carregamento (283 N e velocidade menor)
Se:	ensaio sob o menor nível de carregamento (80 N e velocidade maior)

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1-1: Mapas de desgaste de ensaios pino-sobre-disco, em função de velocidade e pressão normal, com diferentes lubrificantes, obtidos por AKAGAKI e KATO (1991). k : coeficiente dimensional de desgaste (conforme Eq. 2-15).3

CAPÍTULO 2

- Figura 2-1: Mudanças na configuração do contato como resultado do desgaste para uma esfera deslizando sobre um plano. A: somente a esfera se desgasta; B: somente o plano se desgasta; C: Ambos se desgastam. [BAYER, 1994]. 11
- Figura 2-2: Fatores que afetam a temperatura das superfícies [BAYER, 1994]. 13
- Figura 2-3: Modelo utilizado por DRAGON-LOUISET (2001) para o desgaste produzido em um sistema deslizante com dois corpos (1 e 2) sob velocidade relativa V . Γ_1 , Γ_2 : bordas limites entre a região afetada (Ω_3) e não afetada (Ω_1 , Ω_2) pelo deslizamento. e : espessura de Ω_3 14
- Figura 2-4: Modelo da interface na escala microscópica, considerado por DRAGON-LOUISET (2001) para o modelo de desgaste no regime moderado de um sistema deslizante. Ω_{31} e Ω_{32} : regiões afetadas pelo processo deslizante; Ω_{33} : região com fluxo de partículas; Ω_3 : região da interface. 15
- Figura 2-5: Classificação de modos de desgaste, segundo HOKKIRIGAWA e colaboradores (1998). 16
- Figura 2-6: Formação de cunha de fluido em um sistema deslizante lubrificado [BAYER, 1994]. ..22
- Figura 2-7: Comparação dos contatos em um sistema com duas superfícies esféricas em deslizamento lubrificado no regime HD e EHL [BAYER, 1994]. 27
- Figura 2-8: Esquemas ilustrativos dos filmes de lubrificante formados em um contato lubrificado [NEALE, 1997]. 33
- Figura 2-9: Representação esquemática do diagrama de Stribeck: coeficiente de atrito em função da relação $\eta V/W$. η : viscosidade, V : velocidade de deslizamento, W : carga normal [BAYER, 1994]. 36
- Figura 2-10: Representação esquemática do diagrama de transição de regimes de lubrificação IRG [GEE, BEGELINGER e SALOMON, 1984]. 38
- Figura 2-11: Regimes de lubrificação e desgaste no deslizamento lubrificado de metais em função do fator λ , conforme HUTCHINGS (1992). 42
- Figura 2-12: Efeito do comprimento da cadeia molecular no coeficiente de atrito e no ângulo de contato; esfera de aço inoxidável contra vidro coberto com uma monocamada de lubrificante [BOWDEN e TABOR, 1964]. 45
- Figura 2-13: Efeito do comprimento da cadeia molecular e dos grupos terminais no coeficiente de atrito e no ângulo de contato; esfera de aço inoxidável contra vidro coberto com uma monocamada de lubrificante [BOWDEN, TABOR, 1964]. 46
- Figura 2-14: Desgaste em ensaios “four ball”, em função da concentração de contaminante [ODI-OWEI e ROYLANCE, 1986]. 55
- Figura 2-15: Resultados do coeficiente de atrito obtidos em ensaios “four ball” em função da concentração de contaminante [ODI-OWEI e ROYLANCE, 1986]. 56

Figura 2-16:	Estrutura molecular do ZDDP, aditivo destinado a condição de operação sob extrema pressão [WANG, CHENG e GUAN, 1995].....	59
Figura 2-17:	Partículas de desgaste resultantes de ensaios lubrificadas (A) sem e (B) com aditivo ZDDP, observação em STEM, e respectivos padrões de difração de elétrons [MARTIN et al., 1986].....	59
Figura 2-18:	Espectros de energia de raios-X obtidos (A) no STEM e (B) no MEV, da região amorfa das partículas de desgaste produzidas nos ensaios com aditivo [MARTIN et al., 1986].	60
Figura 2-19:	Imagens topográficas por MEV das superfícies de desgaste obtidas em ensaio lubrificadas [JAHANMIR, 1987].....	60
Figura 2-20:	Taxas de desgaste em função da carga obtidas em ensaio lubrificadas [JAHANMIR, 1987].	61
Figura 2-21:	Desgaste resultante de ensaios bloco-sobre-anel com e sem a presença do aditivo no lubrificante. (A) cerâmica (zircônia parcialmente estabilizada); (B) metal (AISI 52100) [WANG, CHENG e GUAN, 1995].....	62
Figura 2-22:	Micrografia das trilhas de desgaste do material cerâmico, evidenciando a formação de filme na trilha no ensaio com ZDDP (foto da direita). [WANG, CHENG e GUAN, 1995].	63
Figura 2-23:	Espectros obtidos por XPS da superfície de desgaste do material metálico, na região do (A) Zn, (B) O, (C) P [WANG, CHENG e GUAN, 1995].	63
Figura 2-24:	Molécula do aditivo de extrema pressão utilizado por WAN e colaboradores (1996) em ensaios de deslizamento lubrificado.....	64
Figura 2-25:	Micrografias da área de desgaste (aço AISI 52100) originadas em ensaios com carga de 300 N, (a) sem e (b) com aditivo [WAN et al., 1996].....	65
Figura 2-26:	Percentual de elementos químicos encontrados na superfície de desgaste ensaiada com lubrificante e 1 % de aditivo, resultante da análise por AES [WAN et al., 1996].....	65
Figura 2-27:	Desgaste linear do anel de pistão de 1º canaleta em função da rugosidade inicial (c: carga = 1,43 bhp, sendo a potência máxima “engine rated power” 6 bhp) [SREENATH, RAMAN, 1976].....	67
Figura 2-28:	Perfis de rugosidade (Ra de 0,2 µm, 0,5 µm e 0,8 µm) dos cilindros de motor de combustão interna [SREENATH e RAMAN, 1976].....	68
Figura 2-29:	Curvas de desgaste do pino obtidas por MEHAN (1988), antes e após a adição de abrasivo Al ₂ O ₃ no óleo; ensaios pino-sobre-disco, “like-on-like”. (A) Aço AISI 440C; (B) Revestimento de carboneto de tungstênio com 0,15 mm de espessura.....	72
Figura 2-30:	Resultados de desgaste de ensaios lubrificadas com óleo diesel a 177 °C, tipo bloco-sobre-anel com movimento alternado. (A) Desgaste do anel de WC+Co, mediante 6 materiais de bloco. (B) Desgaste dos materiais do bloco (segmento de anel de pistão revestidos com WC+Co, Cr e Cr ₃ C ₂), mediante o anel de WC+Co [MEHAN, FLYNN e GLAMMARISE, 1991].....	73
Figura 2-31:	Resultados de desgaste obtidos em ensaios “four ball” modificado, em função da contaminação do óleo [ODI-OWEI e ROYLANCE, 1987].	74
Figura 2-32:	Curvas das cargas e velocidades relativas à transição I-II do diagrama IRG, resultantes de ensaios “four ball” modificado, com óleo não contaminado [ODI-OWEI e ROYLANCE, 1987].....	75
Figura 2-33:	Cargas para a ocorrência de falha do filme de lubrificante, obtidas em ensaios “four ball” modificado, em função da contaminação do óleo [ODI-OWEI e ROYLANCE, 1987].	76
Figura 2-34:	Efeito das razões de dureza no desgaste abrasivo a três corpos [XUAN, HONG e FITCH, 1989].....	77

Figura 2-35:	Indentação e corte provocados por uma partícula abrasiva em meio lubrificado [XUAN, HONG e FITCH, 1989].....	77
Figura 2-36:	Resultados de KHURSHUDOV, DROZDOV e KATO (1995), de ensaios bloco-sobre-anel lubrificado. (A): Coeficiente de atrito vs. velocidade; (B) Coeficiente de atrito vs. temperatura de ensaio (ou viscosidade do óleo); (C) Taxa de desgaste do aço vs. velocidade; (D) Taxa de desgaste da cerâmica vs. velocidade.....	79
Figura 2-37:	Fator de filme λ , inicial e final, em função das velocidades ensaiadas. Região I corresponde à lubrificação mista com efeito dominante da interação mecânica e com efeito EHL crescente com o aumento da velocidade; região II refere-se à lubrificação mista com efeito EHL predominante [KHURSHUDOV, DROZDOV e KATO, 1995].	81
Figura 2-38:	Coeficiente de atrito obtido nos ensaios lubrificado pino-sobre-disco realizados por JISHENG e GAWNE (1997); diâmetro do pino de 6,35 mm, carga de 450 N.	82
Figura 2-39:	Coeficiente de atrito em função da carga de ensaio, obtido por JISHENG e GAWNE (1997); ensaios pino-sobre-disco lubrificado, diâmetro do pino de 6,35 mm.....	83
Figura 2-40:	Relação entre o coeficiente de atrito e o fator $(\eta V)/(P\sigma)$ dos ensaios realizados por JISHENG e GAWNE (1997).	83
Figura 2-41:	Tensão elétrica entre pino e disco medida durante os ensaios pino-sobre-disco lubrificado de JISHENG e GAWNE (1997).....	84
Figura 2-42:	Superfície observada por JISHENG, GAWNE (1997) após ensaio lubrificado, com carga de 300 N.	85
Figura 2-43:	Superfície observada por JISHENG, GAWNE (1997) após ensaio lubrificado, com carga de 900 N.	85
Figura 2-44:	Resultados de desgaste não lubrificado de aço contra aço, de tribossistemas com movimento contínuo e com movimento oscilatório (“reciprocating”) [WARD, 1970].	87

CAPÍTULO 3

Figura 3-1:	Configuração geométrica dos dispositivos utilizados para os ensaios.	91
Figura 3-2:	Esquema para visualização da relação do movimento rotativo com o movimento alternado. Observação da variação da velocidade relativa no ensaio P e PP, obtida com base na Eq. 3-1.	92
Figura 3-3:	Esquema de parte do conjunto mecânico do equipamento de ensaio, com visualização do posicionamento das células de carga e do sensor de deslocamento vertical do pino.	94
Figura 3-4:	Fotos microscópicas típicas de representação das morfologias observadas na análise ferrográfica de amostras de óleo.	96
Figura 3-5:	Microestrutura do material dos pinos (aço AISI 52100), observada em microscópio óptico, 500x. Ataque Nital 3%. Nota-se uma estrutura homogênea (martensítica) muito fina.	97
Figura 3-6:	Microestrutura do material dos pinos (aço AISI 52100), ataque Nital 3%, observada em MEV, imagem de elétrons retroespalhados. Nota-se uma microestrutura martensítica fina e presença de carbonetos.....	98
Figura 3-7:	Calota esférica da extremidade do pino medida com um perfilômetro.	98
Figura 3-8:	Observação por microscópio óptico da superfície da extremidade arredondada do pino, sem ataque, 100x (esquerda) e 500x (direita). Nota-se a presença de microcrateras.	99
Figura 3-9:	Perfil de rugosidade da superfície da extremidade de um pino.	99
Figura 3-10:	Observação por microscópio óptico da microestrutura do material das placas (aço SAE 8640), 500x. Ataque Nital 3%. Nota-se uma estrutura martensítica fina.	100

Figura 3-11:	Observação por microscópio óptico da microestrutura do material das placas (aço SAE 8640), 200x. Ataque Nital 3%. Região com sulfeto.....	101
Figura 3-12:	Microestrutura do material SAE 8640 das placas e dos discos, ataque Nital 3%, observada em MEV, imagem por elétrons retroespalhados. Nota-se a mesma estrutura, tipicamente martensítica, em ambas as micrografias.	101
Figura 3-13:	Esquema para visualização do direcionamento do acabamento superficial nas amostras de discos e placas (indicado pelo tracejado).....	102
Figura 3-14:	Superfícies de um disco e de uma placa, observadas por microscópio óptico (100x)..	102
Figura 3-15:	Perfil de rugosidade da superfície de uma placa, na direção do deslizamento.	103
Figura 3-16:	Espectros de transmitância na região do infravermelho obtidos para os três óleos selecionados para os ensaios.	107
Figura 3-17:	Histograma da distribuição do tamanho de partículas do material quartzo utilizado como abrasivo na forma de pó.	108
Figura 3-18:	Partículas do pó abrasivo a ser utilizado nos ensaios com lubrificante contaminado, observadas por microscópio óptico (500x).....	109
Figura 3-19:	Partículas do pó abrasivo a ser utilizado nos ensaios com lubrificante contaminado, observadas por MEV, imagem de elétrons secundários.	109
Figura 3-20:	Aparência do óleo com e sem abrasivo.	110
Figura 3-21:	Diagrama de lubrificação de GEE, BEGELINGER, SALOMON (1984) com as condições de ensaio utilizadas.....	113

CAPÍTULO 4

Figura 4-1:	Gráficos da posição vertical do pino (WEAR) ao longo dos ensaios (A) Pc SA e (B) D SA.	116
Figura 4-2:	Média e desvio-padrão do deslocamento vertical do pino em função da condição de ensaio.	117
Figura 4-3:	Modelo para cálculo do volume aproximado de desgaste do pino.	117
Figura 4-4:	Aspecto geral de duas superfícies de pino após ensaiados, observados em MEV, imagem de elétrons secundários. A linha tracejada delimita a área de desgaste.	119
Figura 4-5:	Formação do sulco na trilha de desgaste sobre o contra-corpo, resultando em uma área de desgaste do pino elíptica.....	119
Figura 4-6:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição PP.	122
Figura 4-7:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição PPc.	123
Figura 4-8:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição DD.	125
Figura 4-9:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição DDc.....	126
Figura 4-10:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição P.	128
Figura 4-11:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição D.	129
Figura 4-12:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição Pc.	131

Figura 4-13:	Aparência microscópica da superfícies metálicas após o ensaio de deslizamento (100x), condição Dc.....	132
Figura 4-14:	Esquema indicativo da localização da região na área de desgaste dos pinos observados no MEV, delimitada pelo quadrado vermelho.	134
Figura 4-15:	Aparência microscópica da área de desgaste de pinos após ensaio nas condições DD e D. Imagens de elétrons secundários.	134
Figura 4-16:	Aparência microscópica da área de desgaste de pinos após ensaio na condição P. Imagens de elétrons secundários.	135
Figura 4-17:	Espectro obtido por EDAX referente à análise química da região escura indicada no pino do ensaio P6 CA.....	135
Figura 4-18:	Esquema indicativo das regiões das trilhas das placas e dos discos observados no MEV, delimitadas pelos quadrados vermelhos.	136
Figura 4-19:	Aparência microscópica da trilha de desgaste de placas após ensaio na condição PP, região próxima à extremidade lateral. Imagens de elétrons secundários.....	137
Figura 4-20:	Espectro obtido por EDAX referente à análise química da região escura indicada na placa do ensaio PP6 CA.	137
Figura 4-21:	Aparência microscópica da trilha de desgaste de placas após ensaio na condição PP, região central da trilha, evidenciando partículas nos sulcos do acabamento original. Imagens de elétrons secundários.	138
Figura 4-22:	Aparência microscópica da trilha de desgaste de placas após ensaio na condição P, região próxima à extremidade lateral da trilha. Imagens de elétrons secundários.....	138
Figura 4-23:	Espectro obtido por EDAX referente à análise química da superfície da extremidade lateral da placa do ensaio P6 CA.....	139
Figura 4-24:	Região sub-superficial afetada pelo desgaste da placa do ensaio P6 (CA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.....	139
Figura 4-25:	Região sub-superficial afetada pelo desgaste da placa do ensaio P1 (SA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.....	140
Figura 4-26:	Aparência microscópica das superfícies de disco após ensaio na condição D. Imagens de elétrons secundários.	141
Figura 4-27:	Espectro obtido por EDAX referente à análise química na região do sulco da superfície do disco do ensaio D4 CA.....	142
Figura 4-28:	Aparência microscópica da trilha de desgaste do disco do ensaio D4, com detalhe do microtrincamento e a aparente pré-formação de uma partícula de desgaste. Imagem de elétrons secundários.	142
Figura 4-29:	Região sub-superficial afetada pelo desgaste do disco do ensaio D4 (CA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.....	143
Figura 4-30:	Visualização da região sub-superficial afetada pelo desgaste do disco do ensaio D6 (SA), ataque Nital 3%, imagens de elétrons retroespalhados.....	144
Figura 4-31:	Ensaio P7 (óleo não aditivado).....	146
Figura 4-32:	Ensaio D1 (óleo não aditivado).....	146
Figura 4-33:	Ensaio PP4 (óleo não aditivado).	147
Figura 4-34:	Ensaio DD4 (óleo aditivado).....	147
Figura 4-35:	Valores normalizados da área projetada de desgaste do pino resultantes dos ensaios realizados.	148
Figura 4-36:	Valores normalizados da área de desgaste do pino resultantes dos ensaios com menor carregamento (A) e maior carregamento (B). Efeito da utilização do contaminante no óleo.....	150

Figura 4-37:	Valores normalizados da área de desgaste do pino resultantes dos ensaios com menor carregamento (A) e maior carregamento (B). Efeito da utilização do óleo com aditivo.	151
Figura 4-38:	Valores normalizados da área de desgaste do pino resultantes dos ensaios rotativos (A) e oscilatórios (B). Efeito do carregamento mecânico (condição de velocidade e carga). 151	
Figura 4-39:	Valores normalizados da área de desgaste do pino em função da condição de ensaio; visualização das diferenças entre os sistemas mecânicos.....	152
Figura 4-40:	Ilustração esquemática de duas situações de desgaste nos ensaios. (1) Desgaste preferencial do contra-corpo; (2) Desgaste preferencial do pino.	153
Figura 4-41:	Diferença percentual do comprimento das diagonais ortogonais, V e H, da área elíptica do pino.....	154
Figura 4-42:	Posicionamento do apalpador do rugosímetro sobre uma amostra de placa para medição do perfil na direção transversal da trilha formada no ensaio.	156
Figura 4-43:	Ilustração do procedimento adotado para as medições do perfil da área de desgaste do pino.	157
Figura 4-44:	Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições de ensaio PP SA e PPc SA.	157
Figura 4-45:	Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições PP CA e PPc CA.	157
Figura 4-46:	Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições de ensaio DD SA e DDc SA.	158
Figura 4-47:	Perfis dos pinos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições de ensaio DD CA e DDc CA.....	158
Figura 4-48:	Perfil de um disco DD CA após ensaiado, obtido pelo rugosímetro.	159
Figura 4-49:	Perfil de uma placa nova e de uma após ensaiada (PPc CA), direção longitudinal ao deslizamento, obtidos pelo rugosímetro.	159
Figura 4-50:	Perfil longitudinal da placa, antes e após ensaio, condição PP CA.	160
Figura 4-51:	Perfis dos pinos e das respectivas placas após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições P SA e P CA.	161
Figura 4-52:	Perfil longitudinal da placa após ensaio, condição P CA.	161
Figura 4-53:	Perfis dos pinos e dos respectivos discos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições D SA e D CA.....	161
Figura 4-54:	Perfis dos pinos e das respectivas placas após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições Pc SA e Pc CA.	162
Figura 4-55:	Perfis dos pinos e dos respectivos discos após ensaiados, obtidos pelo rugosímetro; condições Dc SA e Dc CA.	163
Figura 4-56:	Áreas de desgaste do pino e do contra-corpo sobrepostas, para visualização da largura da região afetada; condição Pc SA.	164
Figura 4-57:	Rugosidade Ra [μm] da superfície dos pinos, antes e após o ensaio, em função da condição de ensaio. (A) ensaios oscilatórios; (B) ensaios rotativos.	164
Figura 4-58:	Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) PP SA e (B) PP CA.....	167
Figura 4-59:	Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados na condição (A) PPc SA e (B) PPc CA.	169
Figura 4-60:	Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) P SA e (B) P CA.....	170

Figura 4-61:	Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) DD SA e (B) DD CA.	172
Figura 4-62:	Comportamento do potencial de contato nos ensaios realizados nas condições (A) D SA e (B) D CA.	173
Figura 4-63:	Gráfico com os valores médios do potencial de contato dos ensaios realizados e resultados da análise estatística dos efeitos da contaminação, aditivação e carregamento no potencial.	174
Figura 4-64:	Potencial de contato em função da condição de ensaio; visualização das diferenças entre os sistemas mecânicos. Valores em destaque referem-se àqueles com as maiores diferenças.	176
Figura 4-65:	Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios oscilatórios com menor carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.....	178
Figura 4-66:	Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios oscilatórios com maior carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.....	179
Figura 4-67:	Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios rotativos com menor carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.....	181
Figura 4-68:	Gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios rotativos com maior carregamento. (A) com óleo não aditivado; (B) com óleo aditivado.....	182
Figura 4-69:	Detalhe de curvas do coeficiente de atrito em função do tempo, ensaios com óleo não aditivado. (A) oscilatórios; (B) rotativos.....	183
Figura 4-70:	Gráfico com os valores médios do coeficiente de atrito dos ensaios realizados e resultados da análise estatística dos efeitos da contaminação, aditivação e carregamento no potencial.	184
Figura 4-71:	Coefficiente de atrito em função da condição de ensaio; visualização das diferenças entre os sistemas mecânicos. Valores em destaque referem-se àqueles com diferença significativa.	186

CAPÍTULO 5

Figura 5-1:	Esquemas ilustrativos do contato entre pino e disco e pino e placa, ressaltando a diferença na angulosidade das asperezas devido à diferença no valor de Ra.....	189
Figura 5-2:	Trilhas de desgaste nas superfícies de uma amostra de placa e de disco, imediatamente após a realização do ensaio, observação da geometria da aglomeração de resíduos próximo à trilha.....	191
Figura 5-3:	Perfil transversal da trilha de desgaste do disco do ensaio D8 CA.	194
Figura 5-4:	Aproximações geométricas utilizadas para o cálculo do volume de desgaste do contracampo e dos respectivos coeficientes de desgaste, k, para as condições de ensaio P e D.	194
Figura 5-5:	Valores do coeficiente de desgaste k', calculados pela área do pino afetada pelo desgaste, em função da condição de ensaio.....	195
Figura 5-6:	Diagrama esquemático utilizado por BLAU (1994), relacionando a espessura do filme de óleo com o atrito e o desgaste. Em vermelho indica-se a região provável dos ensaios realizados.	195
Figura 5-7:	Valores do coeficiente de desgaste k'', calculados pela área do pino afetada pelo desgaste, em função da condição de ensaio.....	197
Figura 5-8:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação V_{med}/W . (A) Ensaios CA, (B) CA contaminado, (C) SA, (D) SA contaminado.....	197
Figura 5-9:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação V_{med}/W	198

Figura 5-10:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação $(V_{med}/W)/\sigma$. (A) Ensaios CA, (B) CA contaminado, (C) SA, (D) SA contaminado.	199
Figura 5-11:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação $(V_{med}/W)/\sigma$	200
Figura 5-12:	Esquema ilustrativo do contato deslizante e a localização do filme EHD (ou EHL). ..	201
Figura 5-13:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação $V_{med}^{0,68}/W^{0,07}$. (A) Ensaios CA, (B) CA contaminado, (C) SA, (D) SA contaminado.	201
Figura 5-14:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação $V_{med}^{0,68}/W^{0,07}$	202
Figura 5-15:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação $(V_{med}^{0,68}/W^{0,07})/\sigma$. (A) Ensaios CA, (B) CA contaminado, (C) SA, (D) SA contaminado.	202
Figura 5-16:	Área de desgaste do pino normalizada, em função da relação $(V_{med}^{0,68}/W^{0,07})/\sigma$	203
Figura 5-17:	Valores médios do coeficiente de atrito, em função dos fatores (A) V_{med}/W , (B) $(V_{med}/W)/\sigma$, (C) $V_{med}^{0,68}/W^{0,07}$ e (D) $(V_{med}^{0,68}/W^{0,07})/\sigma$	204
Figura 5-18:	Superfícies do pino e da placa em escala 1:1.	207

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2-1:	Energia de ligação (eV) dos elementos S, N e O obtidos da análise do aditivo e da trilha de desgaste [WAN et al., 1996].....	66
Tabela 2-2:	Energia de ligação S 2p (eV) de compostos de enxofre de referência [WAN et al., 1996].	66

CAPÍTULO 3

Tabela 3-1:	Quadro-resumo com as 16 condições estudadas.	90
Tabela 3-2:	Composição química nominal e medida do aço AISI-SAE 52100.....	97
Tabela 3-3:	Composição química nominal e medida do aço AISI-SAE 8640.....	100
Tabela 3-4:	Valores da rugosidade Ra das superfícies dos contra-corpos, medidas na direção do deslizamento.....	103
Tabela 3-5:	Valores da rugosidade Ra das superfícies dos contra-corpos, considerando a média dos dois lotes.	104
Tabela 3-6:	Valores da rugosidade média equivalente do par de amostras, $\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$	104
Tabela 3-7:	Valores da distância média entre asperezas, Sm, das superfícies dos contra-corpos, medidas na direção do deslizamento do ensaio.	104
Tabela 3-8:	Viscosidade cinemática, índice de viscosidade e TAN dos óleos selecionados para os ensaios.	106
Tabela 3-9:	Elementos detectados, em unidades de $\mu\text{g/g}$, na análise espectrométrica dos óleos selecionados para os ensaios.	106
Tabela 3-10:	Quadro-resumo com as condições de ensaio utilizadas.....	112

CAPÍTULO 4

Tabela 4-1:	Diagrama com as condições de ensaio estudadas, mostrando os códigos e as repetições realizadas em cada condição.	115
Tabela 4-2:	Figuras relativas às microfotografias e respectivas condições de ensaio.....	122
Tabela 4-3:	Principais características morfológicas visualizadas em cada condição de ensaio.....	145
Tabela 4-4:	Valores médios e normalizados da área afetada no ensaio medida no pino, resultantes em cada condição de ensaio.	148
Tabela 4-5:	Ações causadas no contato pelo tipo de influência.	149
Tabela 4-6:	Diferença percentual nas áreas de desgaste do pino normalizadas resultantes dos ensaios com menor e maior nível de carregamento.	152
Tabela 4-7:	Condições que apresentaram maior percentual de tendência à forma elíptica na área do pino afetada pelo desgaste.....	154
Tabela 4-8:	Condições de ensaio que apresentaram efeito contrário na comparação do tamanho da área do pino afetada pelo desgaste e da diferença entre as diagonais ortogonais da área.	155

Tabela 4-9:	Resumo das principais características relacionadas ao desgaste observadas em cada condição de ensaio.	166
Tabela 4-10:	Resumo das principais características relacionadas ao comportamento do potencial de contato observadas em cada condição de ensaio.	177
Tabela 4-11:	Resumo das principais características relacionadas ao comportamento do coeficiente de atrito observadas em cada condição de ensaio.	187

CAPÍTULO 5

Tabela 5-1:	Principais diferenças entre os ensaios com os dois sistemas de ensaio utilizados.....	190
Tabela 5-2:	Relação de velocidade e carga das condições de ensaio utilizadas.	196
Tabela 5-3:	Valores utilizados para o cálculo da espessura do filme lubrificante do regime EHL, conforme Eq. 2-10, e espessuras resultantes.	206

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO 2

$\tau = \eta \, d\gamma/dt$	Eq. 2-1.....	22
$Z = \eta/\rho$	Eq. 2-2.....	23
$\log_{10}(\log_{10}(Z+0,7)) = A + B(\log_{10} T)$	Eq. 2-3.....	23
$\eta = \eta_0 e^{(\alpha P)}$	Eq. 2-4.....	23
$\alpha \sim (0,6 + 0,965 \log_{10} \eta_0) \times 10^{-8}$	Eq. 2-5.....	24
$h \sim (\eta V/W')^m$	Eq. 2-6.....	25
$h = (6 \cdot \eta \cdot K' \cdot V \cdot L^2 / W')^{1/2}$	Eq. 2-7.....	25
$h_{HD} = 4,9 \cdot R \cdot (\eta \cdot V / W')$	Eq. 2-8.....	28
$h_{EHL} = 2,65 \cdot \alpha^{0,54} \cdot (\eta_0 \cdot V)^{0,7} \cdot R^{0,43} \cdot W'^{-0,13} \cdot E'^{-0,03}$	Eq. 2-9.....	28
$h = 1,79 \cdot \alpha^{0,49} \cdot (\eta_0 \cdot V)^{0,68} \cdot R^{0,47} \cdot W'^{-0,07} \cdot E'^{-0,12}$	Eq. 2-10.....	28
$h = 2,65 \cdot 0,5^{0,7} \cdot 2^{-0,03} \cdot \alpha^{0,54} \cdot (\eta_0 \cdot V)^{0,70} \cdot R^{0,43} \cdot (W/L)^{-0,13} \cdot E'^{-0,03}$	Eq. 2-11.....	28
$h = \lambda \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$ ou $\lambda = h/\sigma$	Eq. 2-12.....	30
$\mu = \beta \cdot \mu_m + (1 - \beta) \cdot \mu_l$	Eq. 2-13.....	34
$\beta = 1 - \exp \{ - [(30,9 \cdot 10^5) \cdot T_m^{1/2} \cdot V^{-1} \cdot M^{-1/2}] \cdot \exp [- E_c / (RT)] \}$	Eq. 2-14.....	35
$Q = k \cdot W \cdot \Delta S$	Eq. 2-15.....	42

CAPÍTULO 3

$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot \text{sen}(\theta)$	Eq. 3-1.....	91
$V_{\text{med}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot \text{sen} \theta \, d\theta = 4 \cdot f \cdot R$	Eq. 3-2.....	92
$P_{H\text{máx}} = 0,918 [W / (D/E')]^{1/3}$	Eq. 3-3.....	112
$a = 0,721 (W \cdot D / E')^{1/3}$	Eq. 3-4.....	112

CAPÍTULO 5

$k' = Q' / W \cdot \Delta S$ ou $k' = \text{área normalizada} / W$	Eq. 5-1.....	194
$k'' = (Q' \cdot W) / (V_{\text{med}} \cdot \Delta S)$ ou $k'' = \text{área normalizada} \cdot W / V_{\text{med}}$	Eq. 5-2.....	196