EFRAIN PANTALEÓN MATAMOROS

**MODELO DE DESGASTE OXIDATIVO BASEADO EM
PARÂMETROS TERMODINÂMICOS**

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

SÃO PAULO
2004

EFRAIN PANTALEÓN MATAMOROS

**MODELO DE DESGASTE OXIDATIVO BASEADO
EM PARÂMETROS TERMODINÂMICOS**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Titular
Dr. Deniol Katsuki Tanaka

SÃO PAULO
2004

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de abril de 2004.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

© Reprodução autorizada pelo autor desde que citada a fonte

- **Edição Revisada**- elaborada pelo Serviço de Bibliotecas da EPUSP

Matamoros, Efrain Pantaleón
Modelo de desgaste oxidativo baseado em parâmetros
Termodinâmicos
Efrain Pantaleón Matamoros. -- São Paulo, 2004.
1v.

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

1.Tribologia 2.Desgaste dos materiais 3.Desgaste oxidativo
4.Modelo de desgaste I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica I.t.

.....Sem grandes amigos não podemos fazer grandes coisas"

José Martí

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese a: meus pais que com seu amor formaram meus princípios e valores, às mães de meus filhos, que me formaram na arte da vida e dos compromissos e aos meus filhos Dyanelys, Mercedes e Efrain que são a força motriz da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A realização de uma tese, está indiretamente misturada aos desafios da vida quanto aos compromissos pessoais que cada um de nós temos, e neste aspecto a contribuição de determinadas pessoas em nossa vida nós permite concretizar a pesquisa, contribuindo assim no cotidiano. Daí que essas pessoas não só contribuiriam em uma tese de doutorado, são sem duvida alguma parte da minha vida, por isso gostaria de agradecer especialmente aos Senhores: Dr Urbano Ordoñez, sem sua ajuda não existiria este momento (Obrigado por sua amizade), Prof. Dr. Amilton Sinatora, sem você o mercado de trabalho brasileiro não me conheceria, Prof. Titular Dr. Deniol Katsuki Tanaka minha exigência científica, M Eng. Miguel Ângelo de Carvalho, Eng. Jorge Augusto Ferreira por suas confiança e por dar-me meu primeiro emprego no Brasil, o que me permite manter meus grandes compromissos e filhos e a Sandra C O'farril por cuidar e educar a minhas filhas sem a minha presença física. Ao apoio e ajuda da minha esposa Marcela C Pulgar Alvares.

Ao apoio, e confiança do Prof. Dr. Linilson Padovese. Aos amigos do LFS: Prof. Dr. Roberto Martins de Souza, Silene e Sidney Carneiro, Eng. Felipe Bernardes, Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros, Dr. Carlos Henrique da Silva, Dr. Giuseppe Pintaúde, Alexandre Martins, Jovanio Oliveira Santos, Leandro Justino de Paula, Eng. Marcio Bonet, Eng. Relbis Valera, Eng. Amir Rivaroli Júnior por suas orientações e apoio.

O final de uma tese é um momento de muita desesperação, é nesses momento que as amizade como: Dra. Márcia Marie Maru, M Eng. Maria Cristina More Farias e M Eng. Andréia Ranzan, com seus estímulos e ajuda permitiriam a culminação deste trabalho; obrigado.

Ao apoio, da **CAPES**, **PRONEX** possibilitando-me a viabilização deste programa de doutorado.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Lista de Equações

Resumo

Abstract

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 7

2.1	DESGASTE POR DESLIZAMENTO	7
2.1.1	PROGNÓSTICO DO DESGASTE DE METAIS.....	7
2.1.2	MECANISMOS BÁSICOS DE DESGASTE	10
2.1.3	MAPAS DE DESGASTE.....	12
2.2	MECANISMOS E TEORIA GERAL DO DESGASTE OXIDATIVO.....	16
2.2.1	OXIDAÇÃO E REGIMES DE DESGASTE.....	16
2.2.2	MECANISMO DE DESGASTE OXIDATIVO.....	22
2.2.3	PAPEL DA SEGUNDA FASE NO MECANISMO DE DESGASTE OXIDATIVO MODERADO ..	31
2.2.4	TEORIA GERAL DO DESGASTE OXIDATIVO	36
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46

CAPÍTULO 3. PROPOSTA DE MODELO DE DESGASTE OXIDATIVO

BASEADO EM PARÂMETROS TERMODINÂMICOS.....	48

3.1	CÁLCULO DA ENERGIA DE CONTATO	57
3.1.1	TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE CONTATO	57
3.1.2	TEMPERATURA LOCAL DO CONTATO	59
3.1.3	ENERGIA DE GIBBS NO DESGASTE OXIDATIVO	60
3.2	COMPATIBILIDADE COM OS RESULTADOS DA LITERATURA.....	64
3.2.1	PARÂMETROS DA MODELAGEM	64
3.2.2	INFLUÊNCIA DA CARGA, VELOCIDADE E COEFICIENTE ATRITO ESTÁTICO NA TAXA DE DESGASTE.....	65
3.2.3	INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE GIBBS NA TAXA DE DESGASTE.....	67
3.3	INFLUÊNCIA DA CARGA NOS PARÂMETROS DO CONTATO E NO ATRITO	69

CAPÍTULO 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL **72**

4.1	MATERIAIS.....	72
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	72
4.1.1.1	Composição química	72
4.1.1.2	Exame metalográfico	73
4.1.1.3	Dureza.....	74
4.1.1.3.1	Macro dureza Rockwell C	74
4.1.1.3.2	Nanodureza.....	75
4.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	75
4.2.1	ENSAIOS PINO-SOBRE-DISCO.....	75
4.2.2	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	78

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... **83**

5.1	ENSAIOS PINO-CONTRA-DISCO: DESGASTE LINEAR, COEFICIENTE DE ATRITO E POTENCIAL DE CONTATO	83
5.2	RELAÇÕES ESTATÍSTICAS DOS VALORES DOS PARÂMETROS TRIBOLÓGICOS COM A CARGA E A DISTÂNCIA	85
5.2.1	MÉDIAS DO DESGASTE LINEAR, COEFICIENTE DE ATRITO E POTENCIAL DE CONTATO	85
5.2.2	VARIAÇÕES DAS MÉDIAS E DOS DESVIOS-PADRÕES DO DESGASTE, COEFICIENTE DE ATRITO E POTENCIAL DE CONTATO	87
5.2.3	PERDA DE MASSA.....	90
5.2.4	TAXA DE DESGASTE EM FUNÇÃO DA CARGA NORMAL	91
5.3	MAPA DOS MECANISMOS DE DESGASTE	95
5.4	CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS ENSAIADAS	98
5.5	CONSIDERAÇÕES GERAIS	101
5.5.1	COMPARAÇÃO DOS MODELOS DA LITERATURA COM O PROPOSTO.	101
5.5.2	LIMITAÇÕES DO MODELO PROPOSTO	105

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES..... 107

6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	107

ANEXO I “CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES NOMINALMENTE PLANAS”..... 109

ANEXO II “PROGRAMA PARA CÁLCULO TAXA DE DESGASTE OXIDATIVO” 114

ANEXO III “PROGRAMA PARA O CALCULO DA TAXA DE DESGASTE DO ENSAIO PINO DISCO..... 122

ANEXO IV “RESULTADOS DA MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DA TEMPERATURA DE CONTATO” 155

ANEXO V “RESULTADOS DOS ENSAIOS” 157

CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 161

Lista de Figuras

Figura 2.1: Mapa de temperatura [Lim e Ashby, 1987].....	11
Figura 2.2: Mapa de mecanismos de desgaste de aços em condições de deslizamento sem lubrificação [Lim e Ashby, 1987].....	13
Figura 2.3: Mapa do mecanismo de desgaste de aço contra aço em deslizamento com configuração pino-sobre-disco [Lim e Ashby, 1987].....	14
Figura 2.4: Mapa de mecanismos de desgaste para alumina em contato lubrificado com óleo de parafínico [Wang, Hsu e Muuro, 1991].....	15
Figura 2.5: Elementos componentes de um tribossistema.....	17
Figura 2.6: Variação da taxa de desgaste e da resistência de contato com a carga para o par latão 60/40- <i>Stellite</i> (61% Co, 30% Cr). São observados os perfis de rugosidade da pista desgastada do pino [Welsh, 1965].....	19
Figura 2.7: Taxa de desgaste em ensaio de pino-sobre-disco com pino de aço 0,5 %C e disco de aço ferramenta; velocidade de 1 m/s. A: desgaste moderado, B: desgaste severo e C: desgaste moderado [Hutchings, 1992].....	21
Figura 2.8: Mecanismo de desgaste oxidativo [Vardavoulias, 1994]. a) Formação do patamar de óxido; b) Crescimento do patamar; c) Expansão dos óxidos; d) Quebra dos óxidos para formar partículas.....	24
Figura 2.9: Micrografias obtidas de MEV, mostrando as partículas de desgaste resultantes do ensaio de aço de alto carbono contra aço AISI 4340 a uma velocidade de 2 m/s [Hong So, 1995].....	28
Figura 2.10: Coeficiente de atrito em função da carga normal [Hong So, 1995].....	29
Figura 2.11: Taxa de desgaste vs. carga, para aço de médio carbono, velocidades de ensaio de 1 e 4 m/s [Hong So, 1995].....	30
Figura 2.12: Taxa de desgaste vs. velocidade de deslizamento, pressão normal de 1,1 MPa (19,8 N) [Hong So, 1995].....	31
Figura 2.13: Desenvolvimento dos óxidos em presença de segunda fase [Vardavoulias, 1994]. (a) partículas rodeadas por óxido; (b) partículas arrastadas pelo óxido, quebrando e formando " <i>debris</i> "......	34
Figura 2.14: Desenvolvimento de óxido na presença de segundas fases duras [Vardavoulias, 1994]. (a) partículas rodeadas por óxido; (b) partículas ficam no substrato e sobressaem na superfície; (c) partículas provocam desgaste por abrasão; (d) quebras da partícula; (e) saída da segunda fase da matriz.....	34
Figura 2.15: Desenvolvimento do óxido em presença de partículas duras de segunda fase, com tamanho de partícula maior que a espessura crítica dos óxidos [Vardavoulias, 1994]. a) óxidos se formam; b) partículas duras não são influenciadas pela ruptura dos óxidos.....	35
Figura 2.16: Efeito da carga sobre: (a) Taxa de desgaste, (b) Temperatura na superfície, (c) Temperatura de contato, (d) Número de asperezas; aço En8, velocidade de 2 m/s [Quinn, 1983].	43
Figura 2.17: Taxa de desgaste e temperatura da superfície em função da carga para o aço En8 para velocidades de 2, 3 e 4 m/s [Quinn, 1983].	44
Figura 2.18: Taxa de desgaste vs. velocidade para o aço AISI 52100 em deslizamento sem lubrificação [Sullivan e Hodgson, 1988].	46
Figura 3.1: Esquema das regiões características num ensaio pino-disco.....	59
Figura 3.2: Energia livre para a formação de diferentes tipos de óxidos em função da temperatura [Birks e Meier, 1993].	62

Figura 3.3: Efeito do % Cr em ligas Fe-Cr na taxa de oxidação e estrutura do óxido formado, resultante da oxidação isotérmica a 1000 °C e 0,13 atm O ₂ [Wright, 1987].	63
Figura 3.4: Fluxograma do programa para a modelagem do desgaste oxidativo.	64
Figura 3.5: Dependência da taxa de desgaste com o coeficiente de atrito estático, a carga, a velocidade e a temperatura do contato.	66
Figura 3.6: Dependência da taxa de desgaste com a energia de Gibbs e temperatura do contato. $\mu_e=0.78$.	68
Figura 3.7: Influência da carga sobre parâmetros do contato: coeficiente de atrito, espessura de óxido, número de contatos e área real de contato.	70
Figura 3.8: Dependência do número de contatos com a carga segundo resultados obtidos por Quinn (1992, 1996 e 1998).	71
Figura 4.1: Microestrutura bainítica presente no material do disco. a) 500x, b) 200x. Atacado com Nital 2%.	73
Figura 4.2: Microestrutura de martensita revenida com presença de carbonetos no material dos pino. a) 1000x, b) 500x. Atacado com Nital 2%.	74
Figura 4.3: Máquina de ensaio de desgaste pino-contra-disco Plint TE 67.	76
Figura 4.4: Esquema dos ensaios de desgaste mostrando a variação da carga.	78
Figura 4.5: Desenho representativo do dado obtido no ensaio e as variáveis estatísticas tomadas para estudo.	80
Figura 4.6: Fluxograma do programa de análise dos dados obtidos do ensaio na máquina pino-sobre-disco.	82
Figura 5.1: Valores do coeficiente de atrito, força de atrito, desgaste e potencial de contato, obtidos da máquina de ensaio. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	84
Figura 5.2: Médias globais (Md) dos parâmetros tribológicos para cada tipo de carregamento utilizado no ensaio.	86
Figura 5.3: Valores das médias parciais do coeficiente de atrito e do potencial de contato. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	87
Figura 5.4: Variação da média (ΔMd) dos parâmetros tribológicos para cada tipo de ensaio. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	88
Figura 5.5: Variação do desvio-padrão (ΔSTD) dos parâmetros tribológicos para cada tipo de ensaio. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	89
Figura 5.6: Fração da perda de massa por desgaste do disco e variação da massa total do disco em função da carga atingida nos ensaios.	91
Figura 5.7: Fração da perda de massa por desgaste do pino e variação da massa total do pino em função da carga atingida nos ensaios.	91
Figura 5. 8: Localização dos dados tomados para o cálculo dos valores médios do desgaste desconsiderando os dados provenientes da etapa de assentamento.	93
Figura 5. 9: Representação dos resultados da taxa de desgaste do disco. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	94
Figura 5. 10: Representação dos resultados da taxa de desgaste do pino. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	95

Figura 5. 11: Mapa de desgaste correlacionando os valores das variações dos desvios-padrões (Δ STD) do coeficiente de atrito e do desgaste linear (posicionamento do pino no disco). Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.....	96
Figura 5. 12: Ampliação do mapa de desgaste correlacionando os valores das variações dos desvios-padrões (Δ STD) do coeficiente de atrito e do desgaste. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.	97
Figura 5. 13: Morfologia típica da superfície resultante dos ensaios de 40 e 80 N, camadas de óxido trincadas. MEV.....	98
Figura 5. 14: Morfologia da superfície resultante do ensaio de 120 N, camadas quebradas, presença de óxidos globulares. MEV.	99
Figura 5. 15: Morfologia das superfícies resultantes do ensaio de 120 N, presença de óxidos. Microscopia óptica. a) Disco b) Pino.....	99
Figura 5. 16: Morfologia das superfícies do pino e disco na etapa de assentamento, observando-se superfícies riscadas, evidenciando um mecanismo de desgaste severo, com presença de pequenas regiões de óxidos. Microscopia óptica. a) Disco b) Pino.	100
Figura 5. 17: Difração de raios-X da superfície do pino x após o ensaio de 120 N. a) superfície do running-in b) região oxidada.	101
Figura 5. 18: Dependência da taxa de desgaste com a carga, com os resultados teórico e prático.	103
Figura 5. 19: Dependência da espessura de óxido com a carga.	104
Figura 5. 20: Topografias de uma superfície real.	104
Figura 5. 21: Etapas de oxidação previstas pelo modelo proposto. a) contato entre as asperezas, b) formação dos núcleos de óxido nos vales das asperezas, c) crescimento dos patamares de óxidos d) quebras das camadas de óxido (debris).	105

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Reações que podem ocorrer no aço AISI M2 [Kelley, Prohet e Janaf, 1971].....	63
Tabela 3.2: Parâmetros dos materiais em contato aço M2, [Metals Handbook 68].	65
Tabela 4.1: Composição química dos materiais usados.....	73
Tabela 4.2: Valores de dureza Rockwell C do pino.....	74
Tabela 4.3: Valores de dureza do disco.	74
Tabela 4.4: Valores de nanodureza do material do disco.	75
Tabela 4.5: Valores de nanodureza do material do pino.....	75
Tabela 5.1: Medições da variação da massa, ensaios de 20-120 N.	90
Tabela 5.2: Medições da variação da massa, ensaios de 20-80 N.	90
Tabela 5.3: Medições da variação da massa, ensaios de 20-40 N.	90
Tabela 5.4: Frações de perda de massa do pino e do disco.	90
Tabela 5.5: Espessura dos óxidos formados medida através de microscópio óptico.	100
Tabela 5.6: Modelos desenvolvidos para o desgaste oxidativo.....	102
Tabela 5.7: Diferenças dos critérios teóricos de partida nos modelos de desgaste oxidativo.	102

Lista de Símbolos

Todas as variáveis e constantes encontram-se definidas no texto, logo após a sua primeira ocorrência. Abaixo serão listados os símbolos na ordem alfabética.

A_l	Constante de Arrhenius para a oxidação linear ($\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{s}^{-1}$);
A_p	Constante de Arrhenius para a oxidação parabólica ($\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{s}^{-1}$);
A_n	Área de contato nominal ou aparente entre o pino e o disco (m^2);
A_r	Área real total de contato (m^2);
a	<i>Difusividade térmica</i>
D_e	Distancia de deslizamento (m);
D_t	Coeficiente de difusividade térmica;
D_{po}	Densidade média dos patamares oxidados (kg m^{-3});
d	Dimensões das partículas duras de segunda fase (μm);
ε	Espessura crítica do filme de óxido na área real de contato (μm);
ε_p	Espessura do filme de óxido em equilíbrio no pino (μm);
ΔE	Variação de energia do sistema;
F_a	Força de atrito (N);
F_r	Frequência de rotação (R.P.M.);
f	Fração de massa do filme de óxido que é oxigênio;
ΔG_s	Energia livre de Gibbs na superfície.;
H	Dureza dos materiais usados como pino e disco (N m^{-2});
H_a	Dureza das partículas (HV);
H_m	Dureza das amostras usadas nos ensaios (HV);
HSS	Aço rápido (High Speed steel)
h	Profundidade de desgaste
K	Probabilidade de produzir uma partícula de desgaste dado um encontro de aspereza;

k_l	Constante da taxa de oxidação linear ($\text{kg}^2 \text{ m}^{-4} \text{ s}^{-1}$);
k_o	Condutividade térmica do óxido;
k_p	Constante da taxa de oxidação parabólica ($\text{kg}^2 \text{ m}^{-4} \text{ s}^{-1}$);
K_b	Constante de Boltzmann
N	Número de asperezas em contato sob o pino que constitui a área real de contato;
P_n	Pressão normalizada;
Q	Carga normal aplicada num dos corpos em atrito (N);
Q_a	Calor total desenvolvido através do atrito na interface de deslizamento (W);
Q_p	Energia de ativação para a oxidação parabólica (J mol^{-1});
R	Constante molar dos gases ($\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$);
R_a	Rugosidade superficial média aritmética (μm);
R_p	Raio do pino cilíndrico (m);
R_{po}	Resistência de polarização;
r_a	Raio de uma aspereza em contato (μm);
ΔS	Entropia
ΔS_s	Entropia na superfície
T_c	Temperatura da área real de contato entre duas superfícies ($^{\circ}\text{C}$);
T_d	Temperatura fictícia em excesso na área de contato do disco ($^{\circ}\text{C}$);
T_e	Tempo de duração do ensaio (s);
T_p	Temperatura fictícia em excesso na área de contato do pino ($^{\circ}\text{C}$);
T_{tc}	Temperatura da área real de contato em excesso com respeito à temperatura geral da superfície ($T_f = T_c - T_s$), conhecida como temperatura “flash” ($^{\circ}\text{C}$);
T_s	Temperatura geral da superfície (fora da área real de contato) ($^{\circ}\text{C}$);

T_{sp}	Temperatura geral da superfície do pino ($^{\circ}\text{C}$);
T_{sd}	Temperatura geral da superfície do disco ($^{\circ}\text{C}$);
t	Tempo para produzir um filme de óxido (s);
V	Velocidade de deslizamento de uno dos corpos em atrito (m/s);
V_n	Velocidade normalizada (m/s);
V_k	Velocidade crítica (m/s);
W	Taxa de desgaste predita pela teoria de desgaste oxidativo ($\text{m}^3 \text{m}^{-1}$);
ρ_o	Densidade média dos óxidos formados na área real de contato (kg m^{-3});
τ	Tempo unitário de duração de um encontro entre as asperezas (s);
σ	Tensão atuante (MPa);
Δm	Massa de oxigênio do filme de óxido (g).
μ	Coeficiente de atrito
μ_e	Coeficiente de atrito estático

Lista de Equações

$W = K \frac{Q}{H}$	Eq. 2.1	8
$h = K \cdot Q^m \cdot S^n$	Eq. 2.2	10
$V_n = \frac{(v)(R_p)}{D_t}$	Eq. 2.3	13
$P_n = \frac{Q}{(A_n)(H)}$	Eq. 2.4	13
$W_n = \frac{W}{A_n}$	Eq. 2.5	13
Coef. de Desgaste $\left(\frac{m^2}{N}\right) = \frac{\text{Material Perdido (m}^3\text{)}}{\text{Carga Norma (N) * Distancia de Deslizamento (m)}}$	Eq. 2.6	33
$W = K A_r$	Eq. 2.7	36
$A_r = \frac{Q}{H}$	Eq. 2.8	36
$A_r = N\pi(r_a)^2$	Eq. 2.9	37
$t = \frac{\tau}{K}$	Eq. 2.10	38
$\tau = \frac{2r_a}{v}$	Eq. 2.11	38
$(\Delta m)^2 = k_p t$	Eq. 2.12	38
$k_p = A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right)$	Eq. 2.13	39
$\Delta m = f_o \varepsilon_o \rho_o$	Eq. 2.14	39
$f_o^2 \varepsilon_o^2 \rho_o^2 = A_p \left(\frac{2r_a}{vK}\right) \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right)$	Eq. 2.15	39
$K = \left(\frac{2r_a}{vf_o^2 \varepsilon_o^2 \rho_o^2}\right) A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right)$	Eq. 2.16	39
$W = \left[\frac{Q2r_a}{\varepsilon_o^2 \rho_o^2 f_o^2 vH}\right] A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right)$	Eq. 2.17	39

$A_r \varepsilon_o = W v t$	Eq. 2.18	40
$D_{po} f_o \varepsilon_o = k_i t$	Eq. 2.19	40
$W = \frac{k_l Q}{D_{po} f_o v H}$	Eq. 2.20	41
$k_l = A_l \exp - \frac{Q_l}{R T_c}$	Eq. 2.21	41
$\Delta S_s = K_b \text{Ln} \left(\frac{n_o!}{(n_o - n)! n!} \right)$	Eq. 3.1	49
$\Delta G = \Delta H_s - T_c \Delta S_s = n \Delta G_s - K_b T_c \text{Ln} \left(\frac{n_o!}{(n_o - n)! n!} \right)$	Eq. 3.2	49
$\Delta G = n \Delta G_s - K_b T_c [n_o \text{Ln}(n_o) - (n_o - n) \text{Ln}(n_o - n) - n \text{Ln}(n)]$	Eq. 3.3	50
$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial n} \right)_{T_c} = \Delta G_s - K_b T_c \text{Ln} \left(\frac{n_o - n}{n} \right)$	Eq. 3.4	50
$\frac{\Delta G_s}{K_b T_c} = -\text{Ln} \left(\frac{n}{n_o - n} \right)$	Eq. 3.5	50
$n = n_o \exp \left(- \frac{\Delta G_s}{K_b T_c} \right)$	Eq. 3.6	50
$V = V_o \left(\frac{n_o V}{n V_o} \right) \exp \left(- \frac{\Delta G_s}{K_b T_c} \right)$	Eq. 3.7	51
$V_w = \kappa v_i \exp \left(- \frac{\Delta G_i}{E_c} \right)$	Eq. 3.8	51
$\kappa = \frac{A_r}{A_n}$	Eq. 3.9	52
$V_n = V_o \prod_{j=0}^{n-1} \exp(x_j) = V_o \exp \left(\sum_{j=0}^{n-1} x_j \right)$	Eq. 3.10	53
$V_n = \varepsilon_o A_r \exp \left(- \frac{\sum_{j=1}^k (\Delta G_i)_j}{E_c} \right)$	Eq. 3.11	53

$$W = \frac{V_n}{2r_a} \quad \text{Eq. 3.12} \dots\dots\dots 53$$

$$W = \frac{\varepsilon_o A_r}{2r_a} \exp \left(- \frac{\sum_{j=1}^k (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.13} \dots\dots\dots 54$$

$$K = \frac{\varepsilon_o}{2r_a} \exp \left(- \frac{\sum_{j=1}^k (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.14} \dots\dots\dots 54$$

$$W = \frac{\varepsilon_o A_r}{2r_a} N \exp \left(- \frac{\sum_j (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.15} \dots\dots\dots 54$$

$$W = 0.94\pi N \left(\frac{3Q\hat{r}}{4E_v} \right)^{\frac{2}{3}} \exp \left(- \frac{\sum_j (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.16} \dots\dots\dots 56$$

$$P = \frac{4}{3} N E_v \hat{r}^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (z-d)^{\frac{3}{2}} \phi(z) dz \quad \text{Eq. 3.17} \dots\dots\dots 56$$

$$T_c = T_b + T_f \quad \text{Eq. 3.18} \dots\dots\dots 57$$

$$q = \frac{\mu Q v}{A_n}, \text{ em unidades de } \left[N \left(\frac{m}{s} \right) \frac{1}{m^2} \right] \quad \text{Eq. 3.19} \dots\dots\dots 57$$

$$\mu = \mu_e - 0.13 \log \left(\frac{v r_a}{a} \right) \quad \text{Eq. 3.20} \dots\dots\dots 58$$

$$T_b = T_o + \alpha \frac{\mu Q v L_b}{A_n K_m} \quad \text{Eq. 3.21} \dots\dots\dots 58$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{8.a.r_a}{32.a.r_a + \pi.L_b^2.v}} \quad \text{Eq. 3.22} \dots\dots\dots 58$$

$$Pe = \frac{2v r_a}{a} \quad \text{Eq. 3.23} \dots\dots\dots 59$$

$$T_f = F \frac{\alpha q}{b} \sqrt{t} \quad \text{Eq. 3.24} \dots\dots\dots 59$$

$$T_f = 0,50\mu Q^{\frac{2}{3}}v\left(\frac{1}{K_m}\right)\left(\frac{E_v}{\hat{r}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 3.25} \dots\dots\dots 60$$

$$T_f = 0,50\mu Q^{\frac{1}{2}}v^{\frac{1}{2}}\left(\frac{1}{\sqrt{K_m\rho c}}\right)\left(\frac{E_v}{\hat{r}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 3.26} \dots\dots\dots 60$$

$$M + O_2 \leftrightarrow MO_2 \quad \text{Eq. 3.27} \dots\dots\dots 61$$

$$\Delta G_s = -RT_c \ln\left(\frac{a_{MO_2}}{a_M P_{O_2}}\right) \quad \text{Eq. 3.28} \dots\dots\dots 61$$

$$Md = \frac{\sum_{i=1}^n P(i)}{n} \quad \text{Eq. 4.1} \dots\dots\dots 80$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P(i) - P_o)^2}{n}} \quad \text{Eq. 4.2} \dots\dots\dots 81$$

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^n (P(i) - P_o)^2}{n} \quad \text{Eq. 4.3} \dots\dots\dots 81$$

$$\Delta Md(i) = Md(i+1) - Md(i) \quad \text{Eq. 4.4} \dots\dots\dots 81$$

$$\Delta STD(i) = STD(i+1) - STD(i) \quad \text{Eq. 4.5} \dots\dots\dots 81$$

$$\Delta RMS(i) = RMS(i+1) - RMS(i) \quad \text{Eq. 4.6} \dots\dots\dots 81$$

$$T_{desg} = C \frac{P_d A_n}{D_p} \quad \text{Eq. 5.1} \dots\dots\dots 92$$

RESUMO

Durante o desgaste por deslizamento há a ocorrência de calor gerado por atrito, que favorece a oxidação nas superfícies de contato dos metais. O resultado deste fenômeno pode provocar uma diminuição da taxa de desgaste, a qual usualmente é associada com transições no tipo de contato: metal-metal, metal-óxido ou óxido-óxido. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo teórico do desgaste oxidativo. O modelo tenta correlacionar parâmetros termodinâmicos e tribológicos dos materiais, como energia de Gibbs, carga, área real de contato, velocidade e temperatura do contato. Para testar o modelo, realizaram-se ensaios do tipo pino-sobre-disco convencional, para análise da influência dos parâmetros tribológicos, de forma a obter diversas relações entre temperatura de contato, carga, velocidade e as propriedades físico-químicas dos materiais. Os ensaios foram realizados com variação contínua de carga, em intervalos de 20 a 120 N, 20 a 80 N e de 20 a 40 N. Os materiais escolhidos para serem ensaiados foram pino de aço ferramenta M2 temperado e revenido, enquanto que o disco foi de aço 1045 austemperado com microestrutura do tipo bainítica. A caracterização superficial antes e depois dos ensaios foi feita usando-se diferentes técnicas auxiliares, tais como microscopia óptica e eletrônica de varredura. Analisando as curvas obtidas a partir do modelo, assim como as obtidas pelas análises das experiências feitas para sua avaliação, pôde-se concluir que força motriz que causa a taxa de desgaste é a energia de contato, a qual depende das condições físico-químicas, do meio e das solicitações impostas às condições de contato, sendo também as propriedades do material essenciais para a influência na taxa de desgaste, propriedades que estão intrínsecas no modelo, assumindo a energia de Gibbs do material.

Palavras chave: Desgaste, Desgaste oxidativo, modelo, aço ferramenta, AISI M2 e AISI 1045.

ABSTRACT

During sliding wear, heat generated friction occurs, which favors oxidation occurrence on the contacting surfaces of metallic materials. The oxidation phenomenon can result in wear rate attenuation due to transitions in the contact feature from metal-metal to either metal-oxide or oxide-oxide. This work aimed to develop a theoretical modeling on oxidational wear. In the obtained model, both thermodynamic and tribological parameters were used, such as Gibbs energy, load, actual area of contact, velocity and contact temperature. In order to obtain experimental data for the model assessment, usual pin-on-disk tests were conducted under some load and velocity conditions. Relations among the variables, such as contact temperature, load, velocity and physical-chemical properties of the materials, were attained. The tests were performed under continuous rising on load. Intervals from 20 to 120 N, 20 to 80 N and 20 to 40 N were tested. The pin material was made of quenched and tempered M2 tool steel and the disks were of austempered AISI 1045 steel with bainitic microstructure. Surface characterization was carried out before and after the tests, through optical and scanning electronic microscopes. Analyzing the results obtained from the model and from the experimental tests, it was possible to conclude that the wear phenomenon is related to the contact energy, which depends on the physical-chemical conditions of the surfaces, the environment and the mechanical loading the surfaces undergo. The material properties, which do also influence the wear rate, were taken into consideration in the model as the Gibbs energy of the materials.

Key words: wear, oxidational wear, model, tool steel, AISI M2, AISI 1045

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O estudo do desgaste de metais teve grandes avanços nos últimos anos, fato que, aliado ao advento de novas máquinas e equipamentos de ensaio, possibilitou novas maneiras de realização de ensaios em escalas micro e nanométricas, bem como de técnicas analíticas que permitem um melhor conhecimento da composição da superfície submetida ao desgaste.

O desgaste é definido pela American Society for Testing and Materials (ASTM, 1993)¹ como dano a uma superfície sólida, geralmente envolvendo perda de massa do material devido ao movimento relativo entre as superfícies em contato. Seguindo esse conceito, o desgaste fica aparentemente restrito a deslizamento e a abrasão, porém, muitos outros mecanismos de desgaste são conhecidos, como por exemplo, o desgaste oxidativo.

Existem diversas razões para estudar o desgaste, dentre as quais pode-se destacar:

- a) Melhorar o conhecimento do comportamento ao desgaste de uma determinada família de materiais;
- b) Otimizar ou selecionar materiais para uma determinada aplicação;
- c) Entender os efeitos de certas variáveis num tipo particular de processo de desgaste, e
- d) Dar suporte ao desenvolvimento de modelos preditivos e descritivos para o desgaste de um determinado tribossistema.

O desgaste é uma propriedade sistêmica do material, ou seja, não se pode afirmar que o comportamento ao desgaste de um dado material é bom ou ruim sem antes descrever as condições de desgaste a que este fora submetido. Segundo Czichos (1978)², a consideração da resistência ao desgaste torna-se mais significativa na seleção de materiais para uma aplicação particular, pois a resistência ao desgaste de um determinado grupo de materiais pode diferir ao se mudar as condições nas quais os mesmos são submetidos.

Peterson (1990)³ revisou investigações acerca do desenvolvimento e do uso de tribomateriais, tanto cerâmicos, como poliméricos e metálicos, e concluiu que os metais e suas ligas são os mais utilizados nas aplicações de desgaste, bem como observou que a maioria dos estudos realizados sobre desgaste estão voltados para o deslizamento, que é o tipo de desgaste mais complexo, uma vez que envolve uma série de fenômenos, tais como a adesão e a transferência de material entre as asperezas, a presença de terceiros sólidos ("*debris*"), a ocorrência de fenômenos de iniciação e crescimento de trincas sub-superficiais, como ocorre, por exemplo, no processo de fadiga de contato. Além disso, como consequência do atrito entre as superfícies em contato durante a fase de assentamento das superfícies ("*running-in*"), podem ocorrer a mudança na rugosidade superficial e a formação de filmes triboquímicos (oxidação), além de outros processos. Um outro fator que deve contribuir para a tendência de estudos voltados ao desgaste por deslizamento é a facilidade de se construir máquinas de ensaio, comparadas com os outros tipos de desgaste, além do fato de que os dados são obtidos rapidamente neste tipo de ensaio.

Segundo Dowson (1979)⁴, o estudo do desgaste foi estimulado pelo desenvolvimento de metais e ligas, voltado a dar maior suporte ao desenvolvimento de tratamentos térmicos e camadas de cobertura. A necessidade de controlar o atrito e o desgaste na indústria de grãos, marítima e aeroespacial foi um dos principais incentivadores das pesquisas. A maioria delas foram realizadas nas décadas de 40 e 50 do século XX, conduzidas por engenheiros mecânicos e metalurgistas, com o intuito de obter dados para a construção de motores, freios, rolamentos e outros tipos de mecanismos com multi-corpos. Já o avanço da exploração espacial, nas décadas de 50 e 60, levou ao interesse no estudo do desgaste por adesão sob vácuo, e nos anos 70, ao estudo do desgaste para desenvolver novos materiais e ligas, como já citado anteriormente. Nos anos 80 e

90, os instrumentos para tratamento de imagem, somados às técnicas computacionais, acrescentaram um grande impulso ao estudo microscópico do desgaste.

Trabalhos como o de Abbott e Firestone (1933)⁵ auxiliaram no entendimento das curvas de desgaste e da quebra de asperezas. Já Kerridge e Lancaster (1956)⁶ discutiram os estágios da progressão do desgaste metálico severo. Anos depois, Kragelskii, Dobychin e Kombalov (1982)⁷ descreveram a maneira com que as superfícies em deslizamento podem interagir em termos da rugosidade. A idéia de que o atrito e o desgaste podem apresentar uma série de estágios foi o foco de muitos estudos.

Blau (1989)⁸ publicou um livro sobre o amaciamento e as transições. Nos mecanismos de desgaste, evidenciando a ação do atrito e descrevendo a taxa de desgaste nestas transições. A maior parte do seu trabalho baseou-se no conceito de que as superfícies estão sujeitas a uma série de mudanças, nas quais o balanço relativo do processo de desgaste também muda (devido, por exemplo, à transição no regime de dissipação de energia, tais como mudanças de fases e outros). Era esperado que, partindo da interpretação dos dados de atrito, o balanço da mudança interfacial poderia ser determinado e usado para prever e controlar o desgaste. O conceito dos diagramas do processo de atrito foi introduzido e sua construção e usos foram discutidos nos trabalhos de Blau (1993 e 1996)^{9, 10}. Atualmente, sabe-se que uma curva de desgaste do material, obtida numa determinada condição de ensaio, não pode ser usada para generalizar o comportamento do desgaste desse material, pois o resultado depende essencialmente do tribossistema ao qual o material fora submetido.

As transições do desgaste não estão limitadas ao desgaste por deslizamento. Na verdade, existem muitas formas de desgaste e de transição, principalmente nos

primeiros estágios de contato. Por exemplo, Adler (1978)¹¹ descreveu que, numa erosão por cavitação, podem ser distinguidos diversos estágios de dano:

- Um período de incubação, no qual a taxa de desgaste é nula ou praticamente desprezível,
- Um período de aceleração, durante o qual a taxa de erosão atinge um valor máximo,
- Um período de desaceleração (atenuação), e
- Um período final na qual um estado de equilíbrio é alcançado.

Esses períodos são dependentes de condições iniciais, como o estado da superfície, condições de resfriamento e de aquecimento, entre outros, conforme descrito por Adler (1978)¹¹.

Como citado anteriormente, houve nas últimas duas décadas um crescimento na modelagem e no estudo do desgaste de materiais por métodos computacionais. No livro de Burton (1980)¹², pode-se encontrar diversos avanços nos conceitos de instabilidade termoelástica e da localização da expansão térmica superficial. Trabalhos como o de Quinn e Winer (1987)¹³ mostraram a ocorrência do aumento da área real de contato durante as transições dos mecanismos de desgaste, como previsto pela equação de Hertz, descritos por Hutchings (1992)¹⁴. Modelos computacionais considerando o contato interatômico ou molecular são ainda incipientes, sendo voltados essencialmente para sistemas monofásicos e monocristalinos. A integração das propriedades das fases sólidas contínuas com as interações atômicas são um desafio nessa área de pesquisa. Além disso, observam-se outros aspectos complexos, que devem-se levar em conta pelos métodos computacionais na modelagem, como são: as condições para a formação dos filmes de óxido, a formação de "*debris*", e as irregularidades na microestrutura dos materiais de engenharia.

O princípio dos microscópios eletrônicos de varredura (MEV) era conhecido desde 1940, mas o equipamento não era disponível comercialmente até 1963

segundo Dowson (1979)⁴. As pesquisas sobre os materiais de engenharia sofreram um grande avanço com o advento do MEV, tornando-o uma ferramenta indispensável, devido à sua alta capacidade de aumento e de resolução e os diversos recursos disponíveis, como: profundidade de campo e a espectroscopia de dispersão de energia (EDX), foram informações importantes para a caracterização e determinação da microestrutura do material. Pesquisadores, como, Tsuya, Sato e Akaoka (1979)¹⁵, passaram a estudar o desgaste com MEV com detetores de raios-X e outras técnicas de análise química superficial, para auxiliar no entendimento da gama de fenômenos triboquímicos que ocorrem no desgaste de metais.

Todos os estudos mencionados favoreceram o entendimento dos processos tribológicos e abriram novos campos nas pesquisas na área, tais como o estudo das micromáquinas, do microcontato e do sinergismo corrosão-desgaste, bem como outras combinações de processos.

Conforme já mencionado, as transições nos mecanismos de desgaste dependem do sistema tribológico, mais do que propriamente das características do material, o que torna complexo a obtenção de uma sistematização do seu estudo. Além disso, observa-se que existe uma dificuldade na previsão da ocorrência das transições nos mecanismos de desgaste ao se englobar as diversas variáveis capazes de promover modificações, tanto topográficas quanto físico-químicas, nas superfícies de contato dos materiais. Pode-se citar como as variáveis mais importantes a dureza relativa entre os materiais, a temperatura, a carga e a velocidade, bem como as variáveis microestruturais, como a natureza e a distribuição das fases e a fração volumétrica do filme de óxido superficial.

Neste trabalho, apresenta-se um modelo que permite prever o desgaste oxidativo em função das características físico-químicas dos materiais em contato.

Este trabalho consta de sete Capítulos:

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução ao fenômeno que será estudado.

O Capítulo 2 refere-se ao desgaste de uma forma geral, através de uma breve resenha da literatura com a descrição de trabalhos sobre este tema. O objetivo deste capítulo é proporcionar uma visão geral dos fenômenos que ocorrem durante o deslizamento de dois corpos, através de uma revisão bibliográfica dos trabalhos clássicos de desgaste oxidativo, explicado segundo os diferentes critérios de Quinn (1961)¹⁶ e Hong So (1995)¹⁷.

No Capítulo 3, é apresentado o modelo de desgaste baseado em parâmetros termodinâmicos propostos desta Tese. O processo de desgaste oxidativo é justificado a partir da nucleação e do crescimento de óxido nas superfícies metálicas, ou seja, considera-se o conceito da nucleação de uma fase sobre um substrato. Modelos de desgaste já existentes reforçam o modelo físico proposto e, a partir da utilização deste modelo, propõe-se verificar os resultados reportados na literatura.

O Capítulo 4, "Procedimento Experimental", tem como objetivo principal fornecer informações acerca dos materiais, métodos e técnicas utilizadas nos ensaios para avaliar o modelo proposto. Neste Capítulo, propõe-se também um novo método de analisar os dados obtidos de ensaios de desgaste. Dessa forma, cabe salientar que tanto o procedimento de análise dos resultados de desgaste, bem como o modelo proposto são inovadores na área de investigação.

No Capítulo 5, "Resultados e Discussão", expõem-se os resultados e a discussão dos ensaios experimentais, bem como a inter-relação com os resultados do modelo proposto aplicado também aos resultados da literatura.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros para a continuidade deste trabalho.

No Capítulo 7 apresentam-se as referências bibliográficas da literatura pesquisada.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, apresenta-se a revisão da literatura consultada, com uma breve referência dos modelos usados para a previsão do desgaste por deslizamento e seus mecanismos básicos. Apresenta-se uma descrição detalhada da teoria geral do desgaste oxidativo proposta por Quinn (1961)¹⁶ e os principais comentários a esta, teoria.

2.1 Desgaste por deslizamento

Segundo as Normas DIN 50320 (1997)¹⁸ e a ASTM (1993)¹, o desgaste pode ser descrito como a “perda progressiva de massa da superfície de um corpo sólido causada por ação mecânica”. Os diferentes tipos de desgaste ocorrem pela ação do movimento relativo entre um sólido com outro sólido, líquido ou gás. Estas Normas ainda define quatro mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica.

Peterson (1980)¹⁹ propõe que no desgaste por deslizamento podem ocorrer os quatro mecanismos, sendo que um valor constante da taxa de desgaste demonstra que um determinado tipo de mecanismo predomina e que, qualquer variação no valor desta taxa, indica alteração do mecanismo de desgaste predominante. Assim, uma mudança na predominância de atuação de um dos mecanismos de desgaste estaria relacionado a transições nas curvas de perda de massa.

2.1.1 Prognóstico do desgaste de metais

A modelagem do desgaste tem sido objeto de muitas pesquisas ao longo da história da tribologia, sendo os modelos desenvolvidos para situações diversas.

Infelizmente, os modelos são para sistemas específicos, ou seja, só funcionam para um par de materiais específico, com uma determinada geometria, submetidos a uma situação particular de desgaste e lubrificação, não podendo ser generalizada. Ling (1988)²⁰ e Ludema e Bayer (1991)²¹ fazem referência a estas características dos modelos estudados e desenvolvidos por eles, argumentando que a inabilidade dos modelos em transcender essas restrições resulta em uma divergente coleção de parâmetros e constantes e, portanto, uma divergência cada vez maior na obtenção de um modelo geral.

O grande impecilho para o desenvolvimento de um modelo geral está no grande número de variáveis que podem estar envolvidos no processo de desgaste. Isso mostra a complexidade do estudo dos diversos tipos de desgaste, como por exemplo, o desgaste abrasivo, estudado por pesquisadores como Rabinowics (1965)²² e por Komvopoulos, Suh e Saka (1986)²³, entre outros. Nota-se que, mesmo conhecendo todos os comportamentos do material e as informações sobre o contato, não há nenhum modelo que possa prever um sistema de desgaste completo.

Usualmente, a equação de Archard (1953)²⁴, apresentada na Eq. 2.1, é utilizada para correlacionar os resultados dos experimentos tribológicos. A constante K é chamada de coeficiente de desgaste e é largamente aplicada para comparar a resistência ao desgaste de vários materiais.

$$W = K \frac{Q}{H} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

W = perda de volume por unidade de distância de deslizamento,

K = coeficiente de desgaste,

Q = esforço na direção normal ao contato,

H = dureza do material, expressa em N/m².

Para exemplificar, a Tabela 2.1 mostra alguns valores da constante K para alguns metais sob diferentes condições de desgaste seco ou lubrificado com diferentes tipos de óleo conforme Fein (1975)²⁵.

Tabela 2.1: Coeficiente de desgaste K para diferentes meios [Fein, 1975].

Superfície de desgaste	Contra-corpo	Meio	Lubrificante	K
Aço 52100	Aço 52100	Ar seco	--	1×10^{-3}
Aço 52100	Aço 52100	Ar	--	1×10^{-3}
Aço 52100	Aço 52100	Ar	Óleo parafínico	$3,2 \times 10^{-7}$
Aço 52100	Aço 52100	Ar	Óleo parafínico /TCP	$3,3 \times 10^{-9}$
Aço 52100	Aço 52100	Ar	Óleo	$< 2 \times 10^{-10}$
Aço doce	Aço doce	Ar	-	$2,3 \times 10^{-3}$
Aço carbonetado	Aço carbonetado	Ar	Óleo de engrenagem	$1,6 \times 10^{-9}$
Bronze ao alumínio	Aço carbonetado	Ar	Óleo de engrenagem	$2,5 \times 10^{-8}$

Estes dados mostram diferentes níveis de desgaste de metais sob uma série de condições, e que de maneira geral não podem ser usados para prever o desgaste sob outras condições. Além disso, os dados do aço AISI 52100 revelam que o coeficiente de desgaste pode variar de várias ordens de magnitude, dependendo das condições do sistema. O número de equações necessárias para prever o desgaste de um determinado par de materiais não pode ser determinado, por não se ter estabelecido ainda a quantidade de constantes e variáveis que possam descrever os diferentes mecanismos de desgaste.

Adicionalmente, a engenharia requer modelos de desgaste para orientar o desenvolvimento de projeto de um dado sistema tribológico; assim, o projeto deve incluir a escolha dos materiais, a geometria e as condições de uso como os diversos parâmetros de operação e uma série de dados que possam auxiliar na determinação do comportamento ao desgaste (resultados de ensaios e propriedades dos materiais, dentre outros). Como exemplo, os estudos experimentais de desgaste realizados por Bayer (1991)²⁶ em escala macroscópica, levaram à seguinte equação empírica:

$$h = K \cdot Q^m \cdot S^n \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde:

h = profundidade do desgaste,

Q = carga,

S = distância acumulada no deslizamento e

K = um fator que depende dos materiais e lubrificantes (uma espécie de coeficiente de desgaste).

Os expoentes m e n dessa expressão foram obtidos por vários experimentos.

Para a equação de Archard, ambos valem 1.

Bayer (1991) discute os elementos essenciais para a construção de modelos de projeto e ensaio. A chave é a simulação com todos os aspectos críticos do ambiente, bem como com a gama de aplicações a que um material pode ser submetido. Outras discussões podem ser encontradas na literatura. Godet (1988)²⁷ identificou como elementos essenciais para a simulação do ensaio de desgaste, a rigidez e o amortecimento característicos do sistema de desgaste, bem como seu comportamento ao longo do tempo, tudo sob uma vibração controlada do meio, já que estes parâmetros atuam diretamente na variação da área do contato e do mecanismo de falha.

2.1.2 Mecanismos básicos de desgaste

Do ponto de vista de mecanismos de desgaste, a literatura (Peterson, 1980)¹⁹ traz diversos dados com os quais diversos processos de desgaste podem ser amplamente explicados. Entretanto, integrar esses mecanismos de desgaste num único conjunto de dados para prever o comportamento aos diversos sistemas de desgaste é ainda um grande desafio.

O mecanismo de adesão e crescimento de junção do contato, entre asperezas, foi observado e utilizado para explicar muitos fenômenos de desgaste

por deslizamento segundo Archard (1953)²⁴. Este mecanismo foi usado inicialmente para prever as condições severas de desgaste.

Um mecanismo comum é o abrasivo, por ação de asperezas ou “*debris*” Archard (1953)²⁴, tal que, sob contato deslizante, uma aspereza dura arranca o material da superfície mais mole, gerando as partículas de desgaste (“*debris*”). Neste mecanismo, o desgaste é resultado do limite de resistência do material mais mole, que foi excedido devido à tensão de contato entre as asperezas.

Ainda em termos dos mecanismos de desgaste, considera-se que a temperatura das asperezas também desempenha um papel importante. Muitos fenômenos, tais como transformações de fase, formação de filme de óxido e amolecimento do material, estão intrinsecamente ligados à temperatura das superfícies de contato atingida durante o desgaste por deslizamento. Lim e Ashby (1987)²⁸ propuseram que muitos fenômenos de desgaste podem ser previstos pela temperatura do contato no desgaste por deslizamento. Eles correlacionaram resultados de diversos estudos e demonstraram que um mapa de desgaste, apresentado na Figura 2.1, poderia ser construído usando a temperatura de contato entre as asperezas como o parâmetro principal.

Figura 2.1: Mapa de temperatura [Lim e Ashby, 1987].

A temperatura das asperezas é função das propriedades térmicas dos materiais, da carga aplicada e da velocidade. Com essa consideração, Ting (1988)²⁹ propôs uma teoria termo-mecânica do desgaste e demonstrou que a temperatura de contato gera tensões térmicas, aumentando a tensão de contato, podendo-se atingir o limite de escoamento dos materiais. Baseou seus trabalhos no estudo dos “pontos-quentes” (“*hot-spots*”, conforme Quinn e Winer, 1987¹³) que surgem entre as superfícies em contato e nas asperezas, com a temperatura local de contato podendo ser superior à temperatura da superfície. Nesse aspecto, as propriedades térmicas, como por exemplo, a condutividade térmica e a difusividade térmica, se tornam bastante importantes.

Outras conseqüências da consideração da temperatura das asperezas são as reações de oxidação causadas pelo deslizamento, ou reações triboquímicas, que geram produtos na forma de óxidos metálicos segundo Hsu, Klau e Cheng (1988)³⁰ e Quinn, Sullivan e Rowson (1984)³¹. Considerando essas reações, uma teoria de desgaste oxidativo foi proposta por Quinn, Sullivan e Rowson (1984) assumindo o fluxo de calor do contato nas asperezas e, baseado na teoria de Arrhenius, usando a cinética da oxidação para estimar a quantidade de óxido formada na superfície de contato. A taxa de óxido obtida foi comparável à taxa de óxido removida por atrito. Segundo esta teoria, diversos casos de desgaste moderado e severo, sob condições de desgaste a seco foram descritos com sucesso. Neste sentido, as constantes cinéticas das reações do material, com o ar ou com lubrificante, são outros parâmetros a serem incluídos no modelo teórico do desgaste.

2.1.3 Mapas de desgaste

Por tudo que foi colocado, fica claro que uma única equação é insuficiente para abranger todos os tipos de processos de desgaste. Lim e Ashby (1987)²⁸ propuseram tratar o problema através de um conceito de mapas. Eles colocaram as

informações da literatura sobre o desgaste de aço em deslizamento a seco (ensaio pino-sobre-disco) num mapa de mecanismos de desgaste, apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Mapa de mecanismos de desgaste de aços em condições de deslizamento sem lubrificação [Lim e Ashby, 1987].

Para traçar este tipo de mapa, utilizaram como parâmetros os valores de carga e velocidade normalizadas e inúmeros dados de taxa de desgaste. A abscissa representa a velocidade normalizada (V_n) e a ordenada a pressão normalizada (P_n), definidas pelas Eqs. 2.3 e 2.4. A taxa de desgaste normalizada (W_n) é definida pela Eq. 2.5. A grandeza v é a velocidade de deslizamento, R_p é o raio do pino cilíndrico, D_t é a difusividade térmica do metal e A_n é a área nominal de contato.

$$V_n = \frac{(v)(R_p)}{D_t} \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$P_n = \frac{Q}{(A_n)(H)} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$W_n = \frac{W}{A_n} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Nesses mapas, a temperatura das asperezas foi a base para determinar os mecanismos de desgaste observados. Vale ressaltar que, nesse caso, os cálculos das temperaturas eram feitos para a escalas das asperezas, porém, o coeficiente de atrito obtido era considerado como sendo relativo a uma média para o macro-contato. A Figura 2.3 mostra o mesmo mapa com as curvas de taxa de desgaste que delimitam os mecanismos.

Figura 2.3: Mapa do mecanismo de desgaste de aço contra aço em deslizamento com configuração pino-sobre-disco [Lim e Ashby, 1987].

O conceito de mapa de desgaste foi simultaneamente utilizado por Hsu e colaboradores (1994)³² para materiais cerâmicos, dando ênfase à seleção de materiais e critérios de projeto. Os mapas de desgaste foram classificados segundo as condições de lubrificação, temperatura e níveis de desgaste. Um destes mapas de mecanismos de desgaste para a alumina está mostrado na Figura 2.4 apresentada por Wang, Hsu e Muuro, (1991)³³.

Figura 2.4: Mapa de mecanismos de desgaste para alumina em contato lubrificado com óleo de parafínico [Wang, Hsu e Muuro, 1991].

Observa-se que os mecanismos de desgaste dependem da velocidade e da carga, e a dependência se mostra diferente em função do par de materiais. Na Figura 2.4, como o óleo parafínico é relativamente neutro para a alumina, não produz produtos triboquímicos que ocorreriam na presença de água; além disso, o óleo atua como refrigerante da superfície. Essas características tornam o mapa praticamente exclusivo para as condições ensaiadas. Nesse caso, nota-se que as linhas no mapa da transição do desgaste moderado para o severo são praticamente verticais, demonstrando que são independentes da velocidade, mas dependentes da carga e, devido à alumina não reagir com óleo, não há mudança nos padrões do dano mecânico, como a oxidação nos pares metálicos.

Segundo Hsu (1991)³⁴, as temperaturas das asperezas são críticas também para a determinação das características químicas dos filmes superficiais. Hsu, Klau e Cheng (1988)³⁰ demonstraram que a aplicação da média do coeficiente de atrito ao nível do contato macroscópico é inadequada; se a velocidade entre as superfícies em contato aumenta continuamente, então a temperatura média no contato aumenta e pode provocar fenômenos como fusão superficial e choque por tensão térmica, entre outros fenômenos. Hsu e colaboradores (1994)³⁵

incorporaram a elevação da temperatura do contato em um modelo termo-mecânico de desgaste e observaram que a temperatura resultante no desgaste era consistente com aquela estimada pela análise das reações químicas superficiais. Assim, no modelo proposto na presente Tese, a constante da cinética da reação química será utilizada para prever a taxa de formação do filme de óxido nas asperezas.

Segundo Wang e colaboradores (1991)³⁶, a relação entre os eventos que ocorrem ao nível das asperezas e os parâmetros do sistema, tais como a carga, a velocidade e as condições de lubrificação, baseia-se no conceito de uma conformidade relativa da superfície, considerando que a rugosidade superficial é um parâmetro que sofre mudanças constantes durante o desgaste. Só quando a lubrificação é efetiva, obtém-se um estado estacionário de conformidade entre as superfícies em contato, possibilitando assim que as medições em condições de macro contato possam ser relacionadas aos contatos entre as asperezas. A conformidade das superfícies em contato é portanto um importante parâmetro para o modelamento do desgaste.

2.2 Mecanismos e teoria geral do desgaste oxidativo

2.2.1 Oxidação e regimes de desgaste

Em geral, um tribossistema consiste de quatro elementos, como mostrado na Figura 2.5. O movimento relativo entre corpo e contra-corpo origina o atrito e o desgaste, os quais podem ser caracterizados como causas de dissipação de energia e material.

Figura 2.5: Elementos componentes de um tribossistema.

A oxidação é a mais importante reação de corrosão em altas temperaturas. Os metais e ligas oxidam-se quando são aquecidos a temperaturas elevadas, no ar ou em meios oxidantes, onde os produtos e o meio possibilite a ocorrência das reações químicas (Quinn, 1992)³⁷.

A película de óxido formada é aderente ao metal e é extremamente fina. Na região onde se forma a película passiva o metal praticamente não é corroído.

O desgaste oxidativo é uma forma de desgaste que acontece num par deslizante, principalmente sob a ação da atmosfera ou sob condições de deslizamento com lubrificação em que a espessura do filme de óleo é menor que a rugosidade das superfícies em contato. Nesses casos, um filme de óxido é formado sobre as áreas reais de contato (“*hot-spot*”) a uma temperatura relativamente alta. Esta oxidação tribológica (tribooxidação) pode reduzir a taxa de desgaste em até mesmo duas ordens de magnitude, quando comparado com o desgaste do mesmo metal numa atmosfera inerte. No entanto, a redução na taxa de desgaste acontecerá somente se o filme de óxido for formado durante o deslizamento. Segundo Quinn (1983 e 1992)^{38, 39}, Dies estudou este tipo de desgaste em aços e mostrou que há uma diminuição no desgaste, que foi associada à formação de óxido $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, o qual protegeria a superfície contra o dano. A presença de óxidos nos produtos de desgaste foi observada tanto no deslizamento a seco como lubrificado. Nesse caso, o produto do desgaste são óxidos quando a espessura do filme de óleo é menor que a rugosidade da superfície.

Ainda segundo Quinn (1983), em 1935³⁸ Thum e Wunderlich mostraram que a oxidação era relevante para outros processos de desgaste como o “*fretting*”. Na mesma época, já se conhecia que a quantidade relativa dos diversos tipos de óxidos formados dependia da variação de pressão ou velocidade, também mostrado por Thum e Wunderlich. Quinn (1983)³⁸ reporta que Mailander e Dies, em 1943, chegaram a resultados similares.

Também segundo Quinn (1992)³⁸, em 1956, Archard e Hirst realizaram um trabalho sobre desgaste de metais em condições sem lubrificação e observaram desgastes tanto severos como moderados. Neste artigo, as condições de ensaio e os materiais usados não são reportados, porém, em termos da nomenclatura, diz-se que o desgaste pode ocorrer com uma taxa de perda de massa muito pequena, tal como ocorre nos casos de cargas baixas e/ou em sistemas lubrificados, sendo designado como desgaste moderado. Por outro lado, o processo de desgaste pode ser severo quando, durante o processo, desprender da superfície partículas de grandes dimensões e, conseqüentemente, com grandes perdas de massa. Segundo estes autores, o desgaste severo ocorre devido ao contato metal-metal, ou seja, contatos envolvendo eventos, tais como: adesão, deformação plástica, formação de junções e transferência de material, resultando também em encruamento das superfícies. Já o desgaste moderado ocorre durante o contato deslizante de superfícies cobertas por camadas de óxidos ou por camadas produzidas por reações triboquímicas (do metal com o meio) e as superfícies tendem a ficar polidas. Em geral, nos processos de desgaste severo, as perdas de massa são duas ordens de magnitude maiores do que no desgaste moderado segundo Quinn (1983)³⁸.

A Figura 2.6, reproduzida de Welsh (1965)⁴⁰, mostra uma curva de taxa de desgaste em função da carga aplicada, ilustrando diferenças entre desgaste moderado e severo para o par latão contra *Stellite*. Notam-se três regiões distintas:

a primeira, à esquerda da figura, corresponde a taxas de desgaste relativamente baixas e que se elevam linearmente com a carga aplicada. Nesta região, devido à presença de óxido formado ao ar, ocorre o desgaste por reação triboquímica (classificação da Norma DIN 50320), devido ao fato das superfícies sólidas em contato reagirem com o meio interfacial. O produto da reação ocupa o espaço entre as superfícies do par de desgaste. Também nesta região, a resistência elétrica do contato decresce, indicando que há uma camada composta por um filme de óxido e que esta camada vai sendo progressivamente rompida como a elevação da carga. O desgaste oxidativo pode ocorrer devido à ocorrência de pontos quentes (*“hot spots”*) no contato entre asperezas dos corpos, como consequência do contato do metal com o oxigênio e a umidade do ar.

Figura 2.6: Variação da taxa de desgaste e da resistência de contato com a carga para o par latão 60/40-Stellite (61% Co, 30% Cr). São observados os perfis de rugosidade da pista desgastada do pino [Welsh, 1965].

O autor relacionou a taxa de desgaste com a resistência elétrica do contato. Para um valor de carga suficientemente elevada, muitas regiões do contato entre os corpos em deslizamento poderão estar sem a camada de óxidos que as isole e, em decorrência, a resistência elétrica no contato atinge um valor mínimo, que se

mantém com posteriores elevações de carga. Observa-se que esta queda no valor da resistência corresponde à linha tracejada do gráfico. O valor mínimo da resistência elétrica corresponde à ocorrência do contato metal-metal, com possível atuação dos mecanismos de adesão e de deformação plástica, como por exemplo, microcorte, microsulcamento, fadiga de contato ou *scuffing*. Esta é a terceira região que se pode observar na parte superior direita da figura. É de se esperar que, tanto no regime de desgaste moderado quanto no regime de desgaste severo, ocorra abrasão causada por partículas de óxido (regime moderado) ou por material metálico encruado (regime severo), que são comprimidas e forçadas a deslizar entre os corpos em movimento.

Ainda segundo Welsh (1965)⁴⁰, as superfícies têm rugosidade características em cada região do gráfico. No regime moderado por exemplo, a aparência da superfície desgastada é lisa, demonstrado pelo perfil de rugosidade onde a altura das asperezas tem baixos valores ($0,5 \mu\text{m}$). Além disso, cada região apresenta valores diferenciados do coeficiente de atrito e os resíduos de desgaste também são diferentes: no desgaste severo os resíduos de desgaste (*debris*) são metálicos e grandes (20 a $200 \mu\text{m}$), enquanto que no desgaste moderado, são pequenos e formados principalmente por óxidos ($0,01$ a $1 \mu\text{m}$).

Na Figura 2.7 mostra-se uma curva com transição do desgaste descrita por Hutchings (1992)¹⁴.

Figura 2.7: Taxa de desgaste em ensaio de pino-sobre-disco com pino de aço 0,5 %C e disco de aço ferramenta; velocidade de 1 m/s. A: desgaste moderado, B: desgaste severo e C: desgaste moderado [Hutchings, 1992].

A região A apresenta um mecanismo de desgaste para cargas baixas onde as taxas de desgaste são pequenas, aumentando a medida que se aumenta a carga. Essa região foi relacionada à ocorrência de formação de filme de óxido entre as superfícies em contato. Nesse caso, o produto do desgaste são partículas de óxidos. Com o aumento subsequente da carga, ocorre uma transição do desgaste moderado para severo, indicando que o aumento da carga favorece a quebra das camadas de óxido. Nesse caso, as partículas de óxido atuam como abrasivo e a taxa de desgaste atinge valores mais altos, acontecendo nesta região predominantemente o mecanismo de abrasão e o contato é metal-metal e as partículas de desgaste são metálicas. A terceira região do gráfico mostra a ocorrência de uma outra transição do regime de desgaste com diminuição da taxa de desgaste, onde a temperatura do contato cresce devido aos altos valores de carga, permitindo uma nova oxidação das superfícies pela ação da temperatura elevada no contato. Observa-se com isso que podem ocorrer dois tipos de oxidação no desgaste por deslizamento de aços que depende do nível de carregamento e, conseqüentemente, da temperatura das superfícies em contato. Em geral, o desgaste oxidativo é relacionado ao regime de desgaste moderado.

No caso de materiais inoxidáveis, estudados também por Welsh (1965), essa segunda transição com redução da taxa de desgaste é resultado da transformação martensítica induzida por deformação; indicando que os mecanismos de desgaste não só dependem das condições de ensaio mas dos materiais envolvidos.

A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos dois regimes de desgaste, moderado e severo, a partir dos resultados da literatura consultada.

Tabela 2.2: Resumo das características de desgaste moderado e severo.

Parâmetros Considerados	Desgaste Moderado	Desgaste Severo
Resistência elétrica do contato	Alta	Baixa
Partículas de desgaste	Produzidas por reação com o meio; tamanho $\sim 10^{-4}$ mm	Metálicas; tamanho $\sim 10^{-2}$ mm
Análise microscópica da superfície	Superfícies extremamente lisas	Superfícies rugosas
Deformação dominante	Elástica	Plástica

2.2.2 Mecanismo de desgaste oxidativo

De acordo com Quinn (1983)³⁸, o desgaste oxidativo é moderado e é causado por descamação do filme de óxido das superfícies em atrito. Sob tais condições, o primeiro requisito para ocorrer o desgaste oxidativo é que os materiais em deslizamento possam reagir com o oxigênio para formar óxidos. Se isto é verdade, a maioria dos aços satisfazem este requisito. No entanto, as condições para que os diferentes aços sofram desgaste oxidativo são bastante diferentes. Por exemplo, é relativamente difícil encontrar desgaste oxidativo em superfícies de aço doce na prática, pois a carga normal de contato deve ser muito pequena (abaixo de 5 N, ou pressão na área aparente de contato menor que 0,28 MPa) e a velocidade de deslizamento muito alta (acima de 4 m/s). Para manter uma condição de desgaste oxidativo em ensaios de desgaste de aços liga, as faixas permissíveis de carga e de velocidade são maiores que para aço carbono. Essas constatações evidenciam

a dependência do desgaste oxidativo com a carga e a velocidade, e as faixas de variação dependem do material em questão.

Um outro requisito para que a superfície mantenha o desgaste oxidativo é que os materiais em contato tenham suficiente resistência a elevadas temperaturas, tal que a camada de óxido se forme sobre a área real de contato, mas o substrato abaixo do filme de óxido seja suficientemente resistente para evitar o cisalhamento. Se o material que está abaixo da camada de óxido é amolecido pela alta temperatura localizada nas asperezas e ocorre deformação plástica, então acontecerá o desgaste severo. Portanto, a ocorrência de uma quantidade tolerável de cisalhamento sobre a superfície em contato é o limite superior para o desgaste oxidativo.

As condições do desgaste oxidativo são governadas por muitos fatores, tais como: carga, velocidade e rugosidade do par de materiais. Em geral, quando a combinação da carga normal e da velocidade de deslizamento produz uma temperatura na área aparente de contato acima de 400 °C e o desgaste será severo.

O estudo do mecanismo de desgaste oxidativo em situações de deslizamento, é tópico de investigação desde os anos 1960 e tem sido objeto dos exames microscópicos e cristalográficos das superfícies desgastadas e das partículas de desgaste. Em geral, observa-se que no estado inicial dos processos o desgaste é severo. Durante este período, as superfícies em contato vão se conformando, até que a área de cada pico ou patamar em contato chegue ao tamanho estável, conforme a teoria de deformação plástica de Bowden e Tabor mencionado por Quinn (1992)³⁷, dada pela relação Q/H , onde Q é a carga aplicada e H é a dureza Brinell.

Quinn (1983)³⁸ fez uma revisão sobre as origens do estudo do desgaste oxidativo. Nesta revisão, atribuem a Fink, em 1930, o primeiro trabalho no qual a

oxidação foi identificada como componente do desgaste dos metais. O mesmo autor menciona que, posteriormente, Rosenberg e Jordan, em 1935³⁸, utilizando dois discos cilíndricos em ensaios de rolamento com 10% de escorregamento, mostraram que o aço carbono eutetóide apresenta uma taxa de desgaste 50 vezes maior numa atmosfera de hidrogênio que no ar. Eles foram os primeiros a analisar as partículas de desgaste usando a técnica da difração de raios-X e só encontraram ferro nas partículas das experiências em atmosfera de hidrogênio, enquanto que nas experiências realizadas ao ar, foram encontradas partículas de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ e Fe_3O_4 .

A teoria do mecanismo de desgaste oxidativo desenvolvida por Quinn, Sullivan, Molgard e outros pesquisadores, conforme historiado por Quinn (1984)³¹, foi estabelecida a partir dos resultados de estudos de aços de baixo carbono e de ferro fundido. De acordo com esta teoria, dois corpos em contato sem lubrificação, a uma determinada velocidade de deslizamento (v) e sob certa carga (Q), sofrem desgaste severo no estado inicial e as superfícies em contato adquirem conformabilidade, conforme descrito por Vardavoulias (1994)⁴¹. A área real de contato (A_r) será a somatória das áreas dos patamares que se encontram em contato (os de maior altura), como mostra a Figura 2.8.

Figura 2.8: Mecanismo de desgaste oxidativo [Vardavoulias, 1994]. a) Formação do patamar de óxido; b) Crescimento do patamar; c) Expansão dos óxidos; d) Quebra dos óxidos para formar partículas.

Devido ao atrito entre os patamares em contato, a temperatura nos mesmos aumentará até atingir a temperatura de formação de óxidos ou do contato (T_c),

conforme descrito por Quinn (1962)¹⁶, formando-se então um filme de óxido. Se o atrito continuar, as ilhas de óxido crescem, como mostrado na Figura 2.8b, e estendem-se em direção às outras ilhas sobre toda a área do corpo (Figura 2.8c), até atingir uma espessura crítica (ϵ), a partir da qual começa a se tornar instável e quebra-se formando partículas de desgaste ("*debris*") (Figura 2.8d). Depois, novos patamares começam a receber a carga e as superfícies metálicas limpas (livres de esforços) entram em contato e começa outro ciclo de oxidação.

Usando a microscopia óptica e de transmissão, Quinn (1983)³⁸ mostrou que, se o aquecimento por atrito for suficientemente elevado, os patamares em contato se oxidam. Estas superfícies são extremamente lisas e apresentam finas trincas de desgaste paralelas à direção de deslizamento, similar ao sistema de trincas por fadiga encontradas em mecânica da fratura. Cada patamar tem uma área de $0,01 \text{ mm}^2$ e uma altura de 3 a $4 \text{ }\mu\text{m}$.

Em termos das espécies de óxido formadas, as mesmas são diretamente relacionadas às temperaturas atuantes. São inúmeras as pesquisas realizadas para a determinação da temperatura da área real de contato num processo de desgaste oxidativo. Este parâmetro não é de fácil medição em tempo real. Para se conhecer, pelo menos a faixa da mesma, é possível através da análise da superfície da amostra e as partículas produzidas no desgaste por difração de raios-X. Com esta técnica, determina-se o tipo de óxido que se forma na zona de contato dos corpos em deslizamento pode-se intuir as temperaturas de contato, já que abaixo de $200 \text{ }^\circ\text{C}$, o constituinte que predomina é o óxido $\alpha'\text{Fe}_2\text{O}_3$; para temperaturas entre $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e $570 \text{ }^\circ\text{C}$, predomina o Fe_3O_4 e, acima de $570 \text{ }^\circ\text{C}$, o FeO , conforme relatados por Sullivan e Molgard, citado por Vardavoulis (1994)⁴¹ e Hong So (1995)¹⁷.

Já a espessura crítica do óxido depende de parâmetros, tais como o tipo de óxido, o material e as condições de deslizamento (carga, velocidade de

deslizamento e meio, entre outros). Para aços de baixa liga, a espessura de óxido crítica estaria entre 1 a 5 μm . Quinn, Rowson e Sullivan (1980)⁴² consideram que, com os aços de baixa liga En8 (0,4 wt% C; 0,6 - 1 wt% Mn) e En31 (1 wt% C; 0,2-0,4 wt% Si; 0,4-0,7 wt% Mn; 1,2-1,6 wt% Cr), a espessura crítica de óxido é aproximadamente constante e igual a 2 μm , observados em ensaios pino-sobre-disco com carga normal de 4 a 40 N e velocidade de deslizamento de 2 a 5 m/s.

Vardavoulas (1994)⁴¹ menciona que Sullivan e Athwal encontraram camadas de óxido entre 1 a 3 μm para o aço AISI 52100, usando cargas de 10 a 100 N. No trabalho desenvolvido por Vardavoulas (1994)⁴¹, foram observadas espessuras de óxido de 1 a 2 μm , em ferro fundido perlítico com grafita esferoidal e aço rápido HSS (1,1 C; 6,3 Mo; 5,0 W; 3,8 Cr; 2,7 V) com TiC. Em ambos os casos, o contracorpo foi uma esfera de alumina com diâmetro de 6 mm. Os ensaios foram realizados com carga normal de 10 N e velocidade de deslizamento de 0,1 m/s.

Hong So (1995)¹⁷ encontrou espessuras de filme de óxido de 3 a 10 μm , em ensaios de pino (diâmetro 4,75 mm) sobre disco (55,5 mm de diâmetro e 10,88 mm de espessura) usando aços com 1,4-1,6 %C; 0,5 %Mn; 0,4 %Ni, com cargas de 5 a 160 N e velocidades de 0,1 a 8 m/s.

Resultados de espessura da camada de óxido produzida pelo deslizamento estão apresentados na Tabela 2.3. A medição das camadas era feita em geral através da observação da superfície oxidada em corte transversal.

Tabela 2.3: Espessura das camadas de óxidos para as diferentes condições e materiais reportados na literatura.

Materiais em contato	Espessura do óxido (μm)	Carga (N)	Velocidade (m/s)	Meio
En8/En31 (Quinn, 1980)	1 - 5	4 - 40	2 - 5	Ar
52100/52100 (Sullivan e Atwal <i>apud</i> Vardavoulas, 1994)	1 - 3	10 - 100	2 - 3	Ar
Ferro Nodular/Alumina (Vardavoulas, 1994)	1,2 - 2	10	0,1	Ar
Aço rápido/Alumina (Vardavoulas, 1994)	1,2 - 2	10	0.1	Ar
Aço CrNi/CrNi (Hong So, 1995)	3 - 10	5 - 160	0,1 - 8	Ar

Baseado em Quinn, Hong So (1995)¹⁷ publicou os resultados de seus estudos experimentais sobre o mecanismo de desgaste oxidativo. Os trabalhos desse autor foram realizados numa máquina de ensaios do tipo pino-sobre-disco, com aços de meia e baixa liga. Análises das superfícies desgastadas e das partículas produzidas pelo desgaste (“*debris*”) foram feitas utilizando técnicas de análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X. Os resultados deste autor diferem em alguns pontos das conclusões dos trabalhos de Quinn, principalmente da dependência da taxa de desgaste com a velocidade e a carga. As observações através de MEV das partículas de desgaste mostraram que as áreas médias das partículas, resultantes dos ensaios com as cargas mais altas, foram maiores que as obtidas com as cargas mais baixas e que a espessura das partículas foi proporcional à carga normal aplicada. Foi notado que as espessuras das partículas não são iguais à espessura da película de óxido. Além disso, foi observado que as partículas grandes são geralmente quebradas em pequenos fragmentos, como mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9: Micrografias obtidas de MEV, mostrando as partículas de desgaste resultantes do ensaio de aço de alto carbono contra aço AISI 4340 a uma velocidade de 2 m/s [Hong So, 1995].

A força de atrito medida nesses ensaios variou em relação ao tempo. Em condições de baixa carga, a variação foi maior do que em condições de altas cargas. Relacionando essas constatações às observações microscópicas, obteve-se que as variações na força de atrito foram devidas ao mecanismo e à razão de formação das partículas de desgaste sobre a superfície do pino e do disco. Durante o processo de oxidação, forma-se primeiro o filme de óxido e, se a carga é baixa, este quebra-se em alguns pontos da superfície do pino após alguns ciclos de contato. As pequenas partículas de óxido são removidas com o prosseguimento do ensaio. Ao mesmo tempo, também iniciam-se trincas sobre a superfície do disco em deslizamento. Hong So (1995)¹⁷ não explica como ou porque as trincas teriam ocorrido, omitindo qualquer comentário a respeito. Algumas crateras produzem-se sobre a superfície, sobre a qual o filme de óxido é removido em pequenos pedaços, produzidos nas bordas de contato depois de muitos ciclos de contato. À medida que as partículas do filme de óxido são removidas, o atrito aumenta. Como as superfícies em contato deslizam sobre o filme de óxido, o atrito fica num nível baixo. Se várias partículas de desgaste são produzidas, o atrito aumenta até um máximo e, como a carga normal é baixa, o coeficiente de atrito pode ser comparativamente maior.

Já com cargas altas, a temperatura das superfícies em contato é elevada, resultando em produção de grandes quantidades de óxidos. Nestas condições, a nucleação e o crescimento das trincas em uma área grande do filme de óxido formado sobre a superfície do pino, são facilitadas. O filme trincado é removido pela força de atrito, formando grandes partículas de desgaste. Quando os grandes fragmentos de película de óxido são removidos, as superfícies limpas dos corpos em deslizamento entram diretamente em contato, iniciando o processo de formação de novos óxidos. Em correspondência, o coeficiente de atrito aumentará. Quando o contato ocorre sobre o filme de óxido, obtém-se uma menor força de atrito. Portanto, a variação no coeficiente de atrito é menos pronunciada com altas cargas do que com baixas cargas.

Assim sendo, nas condições normais de desgaste oxidativo, o valor médio do coeficiente de atrito, em regime estacionário, diminui quando a carga ou a velocidade aumentam, para o caso do aço de médio carbono. Isso é mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10: Coeficiente de atrito em função da carga normal [Hong So, 1995].

Ao contrário de Quinn¹⁶, Hong So¹⁷ observou que não há evidência de que o desgaste seja linear à carga normal sob condições de desgaste oxidativo¹. Nos

---

¹ A proporcionalidade da carga normal com o desgaste será descrita no próximo item, que apresenta a teoria do desgaste oxidativo de Quinn.

resultados de Hong So, a taxa de desgaste seguiu aparentemente uma lei exponencial em termos de carga normal, como mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Taxa de desgaste vs. carga, para aço de médio carbono, velocidades de ensaio de 1 e 4 m/s [Hong So, 1995].

Segundo o autor, quando a carga normal é aumentada até certos níveis, o aumento na velocidade de deslizamento provoca um aumento na razão de geração de calor devido ao atrito e, deste modo, a temperatura da superfície aumenta. Isto provoca um amolecimento do substrato dos metais em contato, debilitando a aderência entre o filme de óxido e o substrato, favorecendo assim a remoção do filme de óxido. Portanto, a taxa de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de deslizamento sob altas condições de carga.

O efeito da velocidade de deslizamento sobre a taxa de desgaste nos ensaios de Hong So foi bastante aleatório e dependeu tanto da carga normal atuante, como dos materiais que formavam o par tribológico. Um exemplo está mostrado na Figura 2.12. Pode-se notar que quando carga normal sobre passa certo valor, a taxa de desgaste tem um notável incremento com o aumento da velocidade para materiais de aço ferramenta e alto carbono, não sendo assim para aço médio carbono onde a taxa de desgaste diminui com aumento da velocidade.

Figura 2.12: Taxa de desgaste vs. velocidade de deslizamento, pressão normal de 1,1 MPa (19,8 N) [Hong So, 1995].

Em termos dos mecanismos de desgaste, baseado nas análises microscópicas, Hong So (1995) mencionou que a formação das partículas de desgaste é causada principalmente pela ruptura do filme de óxido. A velocidade de deslizamento relativa tem um efeito sobre a taxa de formação da película de óxido e governa o tipo de óxido formado, porém, tem menos efeito na velocidade de crescimento das trincas de fadiga e, portanto, no desprendimento do filme.

A importância do estudo de Hong So se deve ao fato de ter permitido notar alguns aspectos de diferenciação em relação às considerações de Quinn, o que mostra que a teoria proposta por Quinn não pode ser generalizada.

2.2.3 Papel da segunda fase no mecanismo de desgaste oxidativo moderado

Em geral, o comportamento do desgaste pode ser influenciado pela presença de uma segunda fase na matriz monofásica, ou pela presença de estruturas multifásica. As segundas fases podem afetar o desgaste por deslizamento, devido ao endurecimento da matriz e/ou por redução da área de contato entre os dois corpos em deslizamento. Estas fases podem também causar efeitos, como mudanças na tendência à adesão, alteração nas propriedades de fadiga, ou provocando abrasão.

As relações entre o mecanismo de desgaste oxidativo e a presença de segundas fases foi pesquisado por Vardavoulis (1994)⁴¹ em ensaios do tipo pino-sobre-disco. Os materiais estudados foram aços rápidos (HSS 1,1 C; 6,3 Mo; 5,0 W; 3,8 Cr; 2,7 V com TiC), com e sem adição de partículas cerâmicas de reforço, produzidas por metalurgia do pó. Diversas segundas fases, tais como carbonetos primários e carbonitreto, carbonetos secundários e partículas cerâmicas de quartzo, foram introduzidas na matriz metálica.

O tamanho das partículas de segunda fase, sua resistência mecânica e a sua coesão com a matriz metálica são os parâmetros mais importantes que determinam o papel destas partículas no desgaste oxidativo.

Os materiais ensaiados por Vardavoulis (1994) foram estudados usando disco de tungstênio e tungstênio-molibdênio, produzidos por metalurgia de pó sob dois regimes de desgaste. O primeiro foi relativamente severo, usando 10 N de carga aplicada em, esfera de alumina dureza de 2.500 HV e 6 mm de diâmetro e o segundo, em regime moderado, com pinos de aço rápido HSS, em superfície semi-esférica de 6 mm de diâmetro, de ferro fundido tratado termicamente (700 HV) e carga normal aplicada de 5 N. Para todos os casos, utilizou-se velocidade de deslizamento de 0,1 m/s e distância total de deslizamento de 1.400 m. Os esforços de contato de Hertz foram estimados entre 950 MPa e 1.550 MPa, respectivamente para os regimes de desgaste moderado e severo. Os esforços de contato finais foram de aproximadamente 1,5 e 6 MPa, respectivamente para os dois regimes devido ao aumento da área real de contato da superfície esférica dos pino ao longo do ensaio.

Como partículas de segunda fase dos materiais ensaiados, foram identificados carbonetos de tungstênio e de molibdênio, ricos em carbono, assim como carbonetos de vanádio e carbonitreto de titânio.

Durante os ensaios, a força tangencial foi medida e armazenada continuamente e calculou-se o coeficiente de atrito.

Os coeficientes de desgaste foram calculados segundo a Norma DIN 50321, dada por:

$$\text{Coef. de Desgaste } \left(\frac{\text{m}^2}{\text{N}} \right) = \frac{\text{Material Perdido (m}^3\text{)}}{\text{Carga Norma (N)} * \text{Distancia de Deslizamento (m)}} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Depois de um curto período de ensaio (1.000 e 2.000 ciclos), o mecanismo de desgaste oxidativo foi observado para todos os casos. Por meio de análises por difração de raios-X, das partículas de desgaste (“*debris*”) resultante dos ensaios, observou-se predominantemente o $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, além de pequenas quantidades de partículas metálicas e cerâmicas, como traços de carbonetos primários do tipo M_6C . A faixa de espessura de óxido crítica, antes da quebra para formar partículas de desgaste (“*debris*”), foi de 1 a 2 μm .

Vardavoulias (1994)⁴¹ observou que as partículas duras de segunda fase existentes na matriz têm um papel importante no comportamento do desgaste dos materiais estudados. O tamanho é o parâmetro mais importante, que determina a capacidade de promover proteção contra o desgaste da matriz. O autor verificou que as partículas de tamanho menor ou igual à espessura de óxido crítica, como os carbonetos secundários, ($d < 0,5 \text{ mm}$), carbonitreto do tipo MX ($d < 0,1 \text{ mm}$) ou carbonetos do tipo MC e M_6C ($d < 2 \text{ mm}$), são removidas quando o filme de óxido se quebra. Para partículas maiores que o filme de óxido, como os carbonetos primários de quartzo ($d > 5 \text{ mm}$) e partículas de TiC ($d = 10\text{--}60 \text{ mm}$) ou Al_2O_3 ($d = 30\text{--}60 \text{ mm}$), a facilidade de proteger a matriz metálica da carga aplicada dependerá da sua resistência mecânica da adesão à matriz.

Assim, propôs um modelo para explicar o papel da segunda fase no desgaste oxidativo. Quando o tamanho das partículas de segunda fase (d) é menor ou igual à espessura de óxido formada na superfície do material (ϵ), ou seja, quando $d \leq \epsilon$, as

partículas de segunda fase podem ser totalmente recobertas pela camada de óxido. Quando a camada de óxido se quebra, para formar as partículas de desgaste (mostrado na Figura 2.13), as segundas fases também são removidas e, portanto, quase não protegem a matriz.

Figura 2.13: Desenvolvimento dos óxidos em presença de segunda fase [Vardavoulas, 1994]. (a) partículas rodeadas por óxido; (b) partículas arrastadas pelo óxido, quebrando e formando "debris".

Quando o tamanho médio das partículas de segunda fase é apenas um pouco maior que a espessura de óxido ($\epsilon < d < 3\epsilon$), ocorre uma etapa de transição no mecanismo (Figura 2.14).

Figura 2.14: Desenvolvimento de óxido na presença de segundas fases duras [Vardavoulas, 1994]. (a) partículas rodeadas por óxido; (b) partículas ficam no substrato e sobressaem na superfície; (c) partículas provocam desgaste por abrasão; (d) quebras da partícula; (e) saída da segunda fase da matriz.

Nesse caso, uma pequena quantidade de partículas de segunda fase pode ser removida junto com o óxido. Quando os óxidos rompem, mais partículas de segunda fase ficam no substrato e sobressaem na superfície, como mostrado na Figura 2.14b. Depois, o contra-corpo desliza sobre estas partículas e uma interação do contra-corpo com a segunda fase acontece por algum tempo. Durante esta fase, a qual pode se chamar de segunda etapa do desgaste (a primeira é a formação e quebra da camada de óxido), a matriz não interfere no processo de desgaste.

Nesse caso, os parâmetros mais importantes contra o desgaste são a resistência mecânica das partículas de segunda fase e a força de coesão entre a matriz metálica e a segunda fase. Essa etapa do desgaste pode ser acompanhada por desgaste de alta abrasão do contra-corpo (Figura 2.14c). A duração da segunda etapa do desgaste é muito rápida e então a primeira etapa do desgaste da matriz se repete. Se a força de coesão entre a matriz metálica e a segunda fase não for muito forte, as partículas da segunda fase podem ser rapidamente separadas e depois se quebram (Figura 2.14e). Nesse caso, a taxa de desgaste de ambos os corpos em deslizamento é provavelmente aumentada, uma vez que as partículas soltas podem funcionar como terceiros corpos abrasivos.

Quando as partículas de segunda fase têm tamanho maior que a espessura da camada de óxido crítica ($d > \delta_c$), ocorre um aumento significativo na proteção da matriz no desgaste oxidativo. Quando os óxidos se quebram, as partículas de segunda fase permanecem incrustadas na matriz metálica (Figura 2.15). Como as partículas duras maiores estão rodeadas pela matriz metálica, a quebra ocorre com maior dificuldade e o desprendimento da matriz é quase impossível.

Figura 2.15: Desenvolvimento do óxido em presença de partículas duras de segunda fase, com tamanho de partícula maior que a espessura crítica dos óxidos [Vardavoulis, 1994]. a) óxidos se formam; b) partículas duras não são influenciadas pela ruptura dos óxidos.

Por outro lado, os carbonetos precipitados no aço rápido (HSS) não aumentam a resistência ao desgaste oxidativo, especialmente quando os óxidos crescem a partir da interface óxido-metal até o substrato. Nesse caso, ao final da primeira etapa do desgaste, quando a camada de óxido chega à espessura crítica, o precipitado de carbonetos que está situado próximo à superfície de deslizamento

do material é rodeado pelo óxido, como mostrado na Figura 2.15a. Quando os óxidos se rompem, os mesmos são transportados em forma de partículas de carbonetos (Figura 2.15b). A oxidação da superfície virgem reinicia-se e o fenômeno é repetido.

Em conclusão, a presença de segundas fases influencia significativamente o processo de desgaste por deslizamento.

2.2.4 Teoria geral do desgaste oxidativo

A teoria do desgaste oxidativo de Quinn partiu do modelo de oxidação, aliado às observações experimentais com a expressão de Archard para o desgaste. Segundo Archard (1961)⁴³, a taxa de desgaste (W) pode ser determinada pela Eq. 2.7:

$$W = K A_r \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde:

K = probabilidade de produzir uma partícula de desgaste durante o encontro das asperezas,

A_r = área real de contato entre as superfícies.

A área real de contato (A_r) pode ser dada pela seguinte relação:

$$A_r = \frac{Q}{H} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde:

Q = carga aplicada;

H = dureza da superfície.

Substituindo a Eq. 2.8 na Eq. 2.7, origina-se a expressão anteriormente descrita na Eq. 2.1. Uma outra expressão para a área A_r , baseada no contato entre asperezas, pode ser dada por:

$$A_r = N\pi(r_a)^2 \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde:

r_a = raio de uma aspereza em contato,

N = número de contatos circulares.

As variáveis que se utilizam para modelar o desgaste oxidativo levam em consideração a expressão da Eq. 2.7, ou seja, a área real de contato com uma relação linear da carga e inversamente proporcional à dureza. Observa-se que isto corresponde a processos onde só considerasse o material, mais mole ou do menor limite de escoamento, porém, é importante ressaltar que o desgaste oxidativo apresenta-se durante os processos de desgaste moderado onde as superfícies ficam polidas, tendendo a um comportamento predominantemente elástico já que as altura das aspereza tendem a ser menores provocando um aumento da resistência à deformação nas aspereza; com isso, o par de atrito não é levado em conta, pois somente se considera a dureza de um dos materiais em contato e nem sequer se considera uma possível relação entre as durezas de ambos os corpos.

(COMENTÁRIO 1)

A constante K da expressão, chamada de coeficiente de desgaste, é sempre menor que a unidade ($K < 1$). Archard (1961)⁴³ apresentou valores típicos de K para alguns materiais deslizando contra um aço ferramenta, mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Coeficiente de desgaste (K) para vários materiais deslizando contra aço ferramenta em ensaio de pino-sobre-disco sem lubrificação [Archard, 1961].

Material	Coeficiente de Desgaste (K)
aço baixo carbono	7×10^{-3}
cobre	6×10^{-4}
PTFE	$2,5 \times 10^{-4}$
aço ferramenta duro	$1,3 \times 10^{-4}$
aço inoxidável	$1,7 \times 10^{-5}$

A Tabela 2.4 apresenta resultados em materiais de aço ferramenta os quais também são apresentados na Tabela 2.1 mas os resultados são diferentes podemos concluir, que ao, parecer os pesquisadores não fazem as mesmas considerações para calcular o coeficiente K da equação de Archard. (COMENTÁRIO 2)

Fazendo uso da expressão do desgaste de Archard, Quinn^{37,38,39,44,45,46} obteve a equação do desgaste oxidativo. apresentado a seguir.

Segundo Quinn, o tempo (t) para produzir um filme de óxido pode ser dado por:

$$t = \frac{\tau}{K} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Onde:

t = tempo para produzir um filme de óxido,

τ = tempo unitário de duração do contato entre as asperezas.

O tempo τ é dado pela seguinte relação:

$$\tau = \frac{2r_a}{v} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Onde:

r_a = raio de uma aspereza em contato,

v = velocidade de deslizamento.

Quinn^{37,38,39,47,48,49} assume o aumento da massa de óxido como uma função parabólica, tal que:

$$(\Delta m)^2 = k_p t \quad \text{Eq. 2.12}$$

Onde:

Δm = aumento de massa do filme de óxido produzido no metal,

k_p = constante da cinética de oxidação parabólica.

A constante k_p está relacionada com a temperatura de oxidação da aspereza (T_c) por relação exponencial, dada pela Eq. 2.13:

$$k_p = A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right) \quad \text{Eq. 2.13}$$

Onde:

T_c = temperatura do contato para oxidação da aspereza,

A_p = constante de Arrhenius,

Q_p = energia de ativação da reação para a oxidação parabólica,

R = constante universal dos gases.

A massa do filme de óxido por unidade de área é dada por:

$$\Delta m = f_o \varepsilon_o \rho_o \quad \text{Eq. 2.14}$$

Onde:

f_o = fração de massa de oxigênio no óxido,

ε_o = espessura do filme de óxido,

ρ_o = densidade de óxido.

Substituindo as equações (2.13) e (2.14) em (2.12):

$$f_o^2 \varepsilon_o^2 \rho_o^2 = A_p \left(\frac{2r_a}{vK}\right) \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right) \quad \text{Eq. 2.15}$$

E a partir da qual obtém-se o coeficiente de Archard (K):

$$K = \left(\frac{2r_a}{vf_o^2 \varepsilon_o^2 \rho_o^2}\right) A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right) \quad \text{Eq. 2.16}$$

Substituindo as equações (2.8) e (2.12) em (2.7):

$$W = \left[\frac{Q2r_a}{\varepsilon_o^2 \rho_o^2 f_o^2 vH}\right] A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{RT_c}\right) \quad \text{Eq. 2.17}$$

O maior problema na aplicação da equação (2.17) é quanto ao procedimento de determinação dos parâmetros r_a e ε e dos parâmetros de oxidação A_p e Q_p . A temperatura do contato (T_c) também não é fácil de se medir num processo de deslizamento. Esta temperatura é, em geral, obtida em estudos experimentais por aproximação, através da determinação dos óxidos presentes nas superfícies, depois de submetidas ao contato com deslizamento, calculando T_c através de modelos teóricos utilizando a temperatura da superfície T_s . Analisando as partículas de desgaste e a superfície desgastada de metais, resultantes de ensaios de deslizamento, Quinn(1983)³⁸ mostrou, por difração de raios-X, que T_c encontra-se aproximadamente a 200 °C acima da temperatura da superfície (T_s) em ensaios com baixas velocidades; nos ensaios a altas velocidades, a faixa de T_c é de 300 °C a 450 °C acima de T_s . Estes resultados diferem muito da temperatura prevista por Archard, de 1.000 °C. É provável que esta diferença seja resultado das simplificações do modelo original empregado por Archard.

Em outro trabalho, Hong, Hochman e Quinn(1992)³⁷ fizeram uma dedução alternativa da equação do desgaste oxidativo. Esta equação é uma simples equivalência entre o volume total de desgaste e o volume de óxido formado sobre a área real de contato no tempo necessário para estabelecer uma espessura de óxido crítica, dada por:

$$A_r \varepsilon_o = W_v t \quad \text{Eq. 2.18}$$

Esta teoria assume que o aumento da massa de oxigênio por unidade de área em função do tempo pode ser parabólico ou linear. Da suposição que a reação é controlada só pelo intercâmbio de átomo na interface propõem uma função linear, através da seguinte equação:

$$D_{po} f_o \varepsilon_o = k_l t \quad \text{Eq. 2.19}$$

Onde:

D_{po} = densidade média dos patamares oxidados,

k_l = constante da razão de oxidação linear.

Relacionando-se as equações (2.8), (2.16) e (2.19), as seguintes expressões são obtidas:

$$W = \frac{k_l Q}{D_{po} f_o v H} \quad \text{Eq. 2.20}$$

$$k_l = A_l \exp - \frac{Q_l}{RT_c} \quad \text{Eq. 2.21}$$

Onde:

A_l = constante de Arrhenius da oxidação linear,

Q_l = energia de ativação da oxidação linear.

Entretanto, a teoria de Quinn usando o aumento da massa de oxigênio por unidade de área em função do tempo do tipo parabólico é a mais utilizada na literatura como modelo do desgaste oxidativo.

Voltando à formulação de Quinn para o desgaste oxidativo, expressa na Eq. 2.17, observa-se que a taxa de desgaste varia inversamente com a velocidade v , quando $v=0$, a taxa de desgaste tende para infinito. Portanto, ressalta-se a limitação dessa função, sendo válida somente para casos onde a velocidade é diferente de zero (*COMENTÁRIO 3*).

Uma outra crítica a ser considerada à equação de Quinn é que as constantes de oxidação não são realmente uma constante do ponto de vista do processo de desgaste real, pois a mesma é dependente do tipo de óxido formado. Ou seja, para a aplicação da teoria, seria necessário conhecer previamente o resultado do ensaio quanto ao tipo de óxido, não sendo portanto uma teoria aplicável para previsão do desgaste. (*COMENTÁRIO 4*). Isso é ainda mais evidente quando se observa que muitas das variáveis necessárias para o modelo, por exemplo, a espessura de

óxido formado e a fração volumétrica do óxido, entre outras, são conseqüências do mecanismo e não a sua causa.

A Tabela 2.5. mostra como as constantes de oxidação variam em função da temperatura T_c segundo Quinn, (1983) e (1992).

Tabela 2.5: Constantes de oxidação estática do aço En31 [Quinn, 1983 e 1992].

Limites de temperatura (T_c , °C)	Tipo de óxido	Energia de ativação (Q_p) (kJmol^{-1})	Constante de Arrhenius (A_p) ($\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{s}^{-1}$)	Constante tribológica de Arrhenius (k_p) ($\text{kg}^2 \text{m}^{-4} \text{s}^{-1}$)
< 400	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Romboédrica)	208	$1,5 \times 10^6$	10^{16}
400 - 600	Fe_3O_4 (Spinélio)	96	$3,2 \times 10^{-2}$	10^3
> 600	FeO (Wüstita)	210	$1,1 \times 10^5$	10^8

Nota-se pela Tabela que as variações nas constantes não são proporcionais para uma mesma variação da condição de oxidação, ou seja, indo de uma faixa a outra de T_c , as variações proporcionais em Q_p , A_p e k_p são distintas. Em termos da cinética de oxidação estática, somente há mudanças em k_p quando ocorre uma transição de óxido em experimentos de oxidação estática. A energia de ativação usada na teoria de Quinn, no deslizamento, é a mesma da oxidação estática. Nesse caso, os valores da energia de ativação obtidos estaticamente podem ser aplicados em situações tribológicas.

Quinn e colaboradores (1984) mostraram que as constantes de oxidação da Tabela 2.5 podem ser usadas para prever a taxa de desgaste de outros aços de baixa liga e dar informações sobre a variação de o número de contatos (N), a espessura do filme de óxido (ε_0) e a temperatura do contato (T_c) com a carga, em várias velocidades. Eles empregaram o aço En8 e velocidades de deslizamento de 2, 3 e 4 m/s, com cargas entre 4 e 60 N. O desgaste foi sempre moderado (ou seja, a teoria do desgaste oxidativo aplicou-se sempre). As partículas produzidas pelo desgaste foram analisadas, identificando-se claramente os três tipos de óxido. Os resultados para a menor velocidade estão mostrados nos gráficos da Figura 2.16. A

Figura 2.16a é muitas vezes utilizada como um guia da taxa de desgaste esperada nos tribossistemas do tipo aço-contra-aço. Na Figura 2.16b, mostra-se a variação da temperatura, dá uma noção da temperatura geral que pode ser esperada na superfície e no contato^{II}. A Figura 2.17 mostra o comportamento do desgaste e da temperatura de contato obtidos com as demais velocidades. Nota-se que a formação dos óxidos atinge diferentes regiões considerando a carga de ensaio, fato que está relacionado com a dependência da temperatura da superfície com a velocidade e com a carga. Uma observação a ser ressaltada é a diferença marcante desses resultados de Quinn (1983) com aqueles obtidos por Hong So (1995), mostrados anteriormente na Figura 2.11 e na Figura 2.12. Esse fato indica que a teoria de Quinn não pode ser capaz de descrever o desgaste de maneira generalizada.

Figura 2.16: Efeito da carga sobre: (a) Taxa de desgaste, (b) Temperatura na superfície, (c) Temperatura de contato, (d) Número de asperezas; aço En8, velocidade de 2 m/s [Quinn, 1983].

^{II} O procedimento de cálculo dessas temperaturas está apresentado no item a seguir.

Figura 2.17: Taxa de desgaste e temperatura da superfície em função da carga para o aço En8 para velocidades de 2, 3 e 4 m/s [Quinn, 1983].

Dos gráficos dessas Figuras (2.11) e (2.17), pode-se notar que:

- A taxa de desgaste e a temperatura da superfície são proporcionais linearmente à carga entre cada uma das transições de formação dos diferentes óxidos.
- As transições na taxa de desgaste tendem a ser associadas com variação temperatura da superfície que, por sua vez, depende da, carga e da velocidade. Quinn menciona que houve mudanças na morfologia das partículas de desgaste que acompanharam as transições.
- A temperatura de contato (T_c) tende a aumentar com o aumento da carga entre as transições e sua razão de aumento é similar à variação de aumento da temperatura geral da superfície (T_s).

Quanto à espessura de óxido crítica (ε_0), o autor (Quinn) informa que a mesma foi de $1,66 \pm 0,49 \mu\text{m}$ e é aproximadamente constante com as mudanças da carga para todos os ensaios realizados a 2 m/s. Um ponto a ser ressaltado na

medição da espessura da camada de óxido é quanto a erros experimentais que podem ser introduzidos na medição da camada de óxido como é a escolha de uma região representativa para a medição, pois o teste foi feito pelo exame da seção transversal com microscópio óptico. Esse procedimento permite apenas a observação de pontos localizados da região do contato, porém, a espessura da camada de óxido não é necessariamente constante ao longo de toda a região de contato.

Segundo os resultados das pesquisas, foi verificado que o valor da constante de Arrhenius para a formação de FeO, durante o desgaste, é de três ordens de magnitude maior do que para a oxidação estática, enquanto que para Fe₃O₄ são cinco ordens de magnitude, e para o α -Fe₂O₃ a diferença é de dez ordens de magnitude. Este último tipo de óxido foi o predominante nas partículas de desgaste, e foi o que permitiu a previsão mais exata do número de contatos, da espessura crítica e da temperatura de contato, e uma melhor correlação entre os resultados teóricos e experimentais.

Sullivan e Hodgson (1988)⁵⁰ ensaiaram um outro material (AISI 52100) em velocidades menores e obtiveram as curvas de taxa de desgaste apresentadas na Figura 2.18. Nota-se que nessa faixa de cargas, quanto maior a velocidade do ensaio, menor é a taxa de desgaste para uma mesma carga. Porém, quanto maior a carga, menor é a velocidade para a ocorrência da transição do desgaste. O resultado evidencia novamente a influência da temperatura da superfície e sua dependência simultânea da carga e da velocidade.

Figura 2.18: Taxa de desgaste vs. velocidade para o aço AISI 52100 em deslizamento sem lubrificação [Sullivan e Hodgson, 1988].

2.3 Considerações finais

As informações coletadas da literatura indicam que a formulação de Quinn para o desgaste oxidativo não pode ser generalizada, pois são encontrados resultados experimentais que não são explicados pelo modelo de Quinn, como aqueles obtidos por Hong So (1995).

Em termos dos fenômenos considerados, foi possível perceber que o modelo de Quinn não leva em conta a presença de segunda fase no material daí que não pode prever a influência das partículas duras no mecanismo de desgaste oxidativo.

O modelo de Quinn não se aplica para a previsão do desgaste oxidativo, uma vez que o mesmo depende de parâmetros que não são a causa e sem o efeito do processo de desgaste, como a espessura da camada de óxido e o tipo de óxido formado. Além disso, alguns parâmetros são de medição complexa, como a própria espessura.

Uma outra consideração a ser ressaltada é que, com a inclusão da propriedade mecânica de dureza do material, o modelo de Quinn faz uso implícito

do conceito da ocorrência de deformação plástica, já que só considera o material mais mole, quando o fenômeno de oxidação poderia estar relacionado à ocorrência de deformação elástica principalmente.

Além da consideração da dureza, proveniente do uso da expressão de Archard, a conseqüente aplicação da constante de desgaste de Archard (K) indica que, assim como na expressão de Archard, o modelo não indica diferenças nas variáveis consideradas para o desgaste severo e para o moderado.

As observações acerca da denominada teoria geral do desgaste oxidativo de Quinn indicam a necessidade de investigação para o aprimoramento da teoria. Também observou-se que, em muitos casos, não se especifica o método de preparação e o acabamento superficial das amostras, sendo interessante determinar a influência dos mesmos na taxa de desgaste oxidativo.

CAPÍTULO 3. PROPOSTA DE MODELO DE DESGASTE OXIDATIVO BASEADO EM PARÂMETROS TERMODINÂMICOS

A maioria dos metais é termodinamicamente instável quando expostos ao ar e reagem com oxigênio para formar óxido, que pode agir como protetor através de uma barreira que isola o metal do meio. Normalmente, este processo é controlado pela difusão do oxigênio na camada de barreira e é, conseqüentemente, dependente da temperatura através de uma relação exponencial entre a taxa de difusão e a temperatura. Também é dependente da presença de defeitos da camada de barreira. Portanto, o desgaste oxidativo depende fortemente tanto dos materiais em contato como do meio.

Em princípio, qualquer variação na posição relativa dos átomos ou das moléculas que compõem um material traz vinculada uma variação da energia de interação a nível atômico; assim, se ocorre alguma transformação no material, a diferença de energia entre a configuração inicial e final deve se manifestar de forma macroscópica. No processo de desgaste moderado, a superfície dos materiais se encontra em estado estacionário com a fase gasosa do ar ambiente. Este fato pode ser, por exemplo, relacionado com a nucleação de uma fase sobre um substrato, baseado nas leis termodinâmicas que governam o equilíbrio químico dos sistemas heterogêneos segundo Martínez e colaboradores (1986)⁵¹.

O fenômeno da difusão ao longo da superfície nos materiais está diretamente relacionado com a estrutura da superfície segundo Bokshtein (1980)⁵². A superfície real é heterogênea e caracteriza-se por um complexo de micro-relevos, apresentando diferentes tipos de “lugares” ou sítios preferenciais que podem ser ocupados pelos átomos da superfície no processo de difusão.

Para o desgaste oxidativo, parte-se do critério de que a oxidação dos materiais em contato tem como mecanismo básico a nucleação e o crescimento de óxido na superfície, tal como é abordada por muitos autores, como Porter (1980)⁵³ e Hornbogen (1969)⁵⁴. A idéia da teoria clássica da nucleação foi exposta por Gibbs (1878)⁵⁵. O aumento da entropia do sistema deslizante resultante do processo de oxidação pode ser calculado supondo-se (1) que a superfície do metal contém sítios preferenciais para nuclear óxido, devido à superfície do metal não ser idealmente plana, e (2) que os vales das asperezas são a fonte da nucleação dos óxidos. A combinação matemática para a nucleação pode ser dada por $\frac{n_o!}{(n_o - n)!n!}$, onde n_o são os sítios preferenciais para nucleação e n são os sítios de nucleação. A variação da entropia na superfície, ΔS_s , devida aos núcleos de óxido formados na superfície com n_o posições ocupáveis, será dada por:

$$\Delta S_s = K_b \ln \left(\frac{n_o!}{(n_o - n)!n!} \right) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

K_b = constante de Boltzmann.

A variação da energia livre (ΔG) devido aos núcleos de óxido será dada por:

$$\Delta G = \Delta H_s - T_c \Delta S_s = n \Delta G_s - K_b T_c \ln \left(\frac{n_o!}{(n_o - n)!n!} \right) \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde:

ΔH = variação da entalpia. ($\Delta H_s = n \Delta G_s$ Toda a entalpia na superfície, esta associada à nucleação dos sítios).

T_c = temperatura do contato.

O termo $\text{Ln}\left(\frac{n_o!}{(n_o - n)!n!}\right)$ pode ser transformado empregando a aproximação

de Stirling, ou seja, se $M \gg 1$, então $\text{Ln}(M!) \approx M \text{Ln}(M) - M$. Assim, tem-se:

$$\Delta G = n\Delta G_s - K_b T_c [n_o \text{Ln}(n_o) - (n_o - n) \text{Ln}(n_o - n) - n \text{Ln}(n)] \quad \text{Eq. 3.3}$$

E tem-se, portanto:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial n}\right)_{T_c} = \Delta G_s - K_b T_c \text{Ln}\left(\frac{n_o - n}{n}\right) \quad \text{Eq. 3.4}$$

Na condição de equilíbrio, ΔG deve ser mínimo, ou seja, $\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial n}\right)_{T_c} = 0$.

Logo:

$$\frac{\Delta G_s}{K_b T_c} = -\text{Ln}\left(\frac{n}{n_o - n}\right) \quad \text{Eq. 3.5}$$

Se $n_o \gg n$, essa equação transforma-se em:

$$n = n_o \exp\left(-\frac{\Delta G_s}{K_b T_c}\right) \quad \text{Eq. 3.6}$$

A concentração de núcleos de óxido na superfície do material está relacionada com o volume dos sítios para a nucleação e crescimento do óxido, onde a área de nucleação é a superfície (micro-relevo). A espessura relativa a este volume compreende a região ativada dentro do material onde pode ocorrer a difusão dos átomos para a superfície.

Multiplicando-se e dividindo-se a equação acima pelo volumes final (V) e inicial (V_0) dos sítios da nucleação do óxido na superfície, a equação resultante tem a forma:

$$V = V_o \left(\frac{n_o V}{n V_o} \right) \exp \left(- \frac{\Delta G_s}{K_b T_c} \right) \quad \text{Eq. 3.7}$$

Onde:

$$\frac{n_o}{V_o} \approx C_o = \text{concentração de sítios de nucleação de óxido.}$$

Considerando uma distribuição homogênea da nucleação, pode-se supor que todos os sítios de nucleação são ocupados pelo mesmo óxido. Nesse caso, tem-se

$$\frac{n_o}{V_o} \approx \frac{n}{V}, \text{ o que resulta em } \frac{n_o V}{n V_o} \approx 1. \text{ Assim, tem-se:}$$

$$V_w = \kappa v_i \exp \left(- \frac{\Delta G_i}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.8}$$

Onde:

V_w = volume de óxido que cresceu no sítio de nucleação,

κV_i = V_o

κ = razão entre as áreas de contato real e nominal. Considera-se que a nucleação dos sítios de oxidação na área de contato é proporcional à área de contato real,

v_i = volume ocupado pelo oxigênio nos sítios de nucleação de óxido. Considera-se neste modelo que os vales das asperezas em contato são os sítios mais favoráveis para a nucleação e o crescimento do óxido e não as asperezas propriamente ditas,

ΔG_i = variação da energia de Gibbs do material no vale da aspereza i. Ou seja, é a barreira de energia de ativação da nucleação,

E_c = $R \cdot T_c$ = energia de contato, onde R é a constante universal dos gases e T_c a temperatura do contato^{III}.

Para o volume V_o , considera-se que, quando ocorre atrito no contato entre as superfícies, há uma geração de calor que se transmitirá para o interior do material até a uma certa profundidade ou espessura (Hamilton e Goodman, 1966, e Suh, 1973). Essa região é onde ocorre a difusão dos átomos do material para a

---

^{III} R substitui K_b da Eq. 3.7 por se tratar do oxigênio.

superfície ou a difusão do oxigênio para dentro do material. Considerando-se essa espessura, tem-se o volume v_i dado por:

$$v_i = \varepsilon_o A_n$$

Onde:

ε_o = máxima espessura do volume afetado pelo processo de deslizamento,
 A_n = área nominal do contato.

Considerando que a região compreendida pela nucleação de óxidos depende da área real de contato, define-se κ como a relação entre as áreas de contato nominal e real, dada por:

$$\kappa = \frac{A_r}{A_n} \quad \text{Eq. 3.9}$$

Com isso, tem-se $V_0 = \kappa \cdot v_i = \varepsilon_o \cdot A_r$ na Eq. 3.8.

Com o tempo, as camadas de óxido podem sofrer alterações e a energia de Gibbs também pode ser alterada com a variação das condições tribológicas. Nos aços, diferentes tipos de óxidos podem ser formados, tendo-se assim diferentes valores nas variáveis da Eq. 3.8. Como início da reação de oxidação do ferro do metal, considera-se:

Dependendo das condições do contato, pode passar para:

Obtendo-se, na presença de água:

Na presença de oxigênio, tem-se:

Pode-se considerar que as reações de oxidação durante sucessivos deslizamentos ocorrem de maneira que o volume de óxido V_i crescerá sobre o volume de óxido anteriormente formado V_{i-1} , tal que:

$$V_1 = V_0 \exp(x_0)$$

$$V_2 = V_1 \exp(x_1) = V_0 \exp(x_0) \cdot \exp(x_1)$$

$$V_3 = V_2 \exp(x_2) = V_0 \exp(x_0) \cdot \exp(x_1) \cdot \exp(x_2)$$

·
·
·

$$V_n = V_0 \prod_{j=0}^{n-1} \exp(x_j) = V_0 \exp\left(\sum_{j=0}^{n-1} x_j\right) \quad \text{Eq. 3.10}$$

$$\text{Onde } x_0 = x_1 = x_2 = \dots = \frac{\Delta G_i}{E_c}.$$

Assim, a expressão da Eq. 3.8, que descreve o volume de óxido que cresce considerando apenas uma camada de óxido, pode ser aplicada para k camadas, obtendo-se a seguinte expressão do volume das k camadas oxidadas:

$$V_n = \varepsilon_0 A_r \exp\left(-\frac{\sum_{j=1}^k (\Delta G_i)_j}{E_c}\right) \quad \text{Eq. 3.11}$$

A taxa de desgaste resultante do processo de deslizamento, pode ser calculada segundo Norma ASTM G 99 (1990)⁵⁶ e Hutchings (1992)¹⁴ considerando o volume afeitado ou deteriorado no deslizamento pela equação:

$$W = \frac{V_n}{2r_a} \quad \text{Eq. 3.12}$$

Onde:

V_n = volume total afetado pelo deslizamento,

r_a = raio de contato entre asperezas.

Substituindo todos os parâmetros, a equação da taxa de desgaste resultante do volume afetado pelo deslizamento é dada por:

$$W = \frac{\varepsilon_o A_r}{2r_a} \exp \left(- \frac{\sum_{j=1}^k (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.13}$$

A correspondência desta função com a equação de Archard (Eq. 2.7) é possível, considerando que $A_r = Q/H$ (Eq. 2.8) e a constante K (coeficiente de desgaste) como dependente das propriedades do material que determinam ε_o e das condições do contato (r_a , E_c e ΔG), como mostrado na Eq. 3.14.

$$K = \frac{\varepsilon_o}{2r_a} \exp \left(- \frac{\sum_{j=1}^k (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.14}$$

A Eq. 3.13 se refere ao desgaste considerando apenas um sítio de oxidação. A expressão considerando todas as asperezas do contato toma a forma:

$$W = \frac{\varepsilon_o A_r}{2r_a} N \exp \left(- \frac{\sum_j (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.15}$$

Onde N é o número de asperezas em contato.

Na Eq. 3.15, considera-se que também que todas as asperezas têm o mesmo tipo de camadas de óxido, o que pode não ser verdade, pois as reações químicas para a formação de um dado tipo de óxido pode variar para as diferentes regiões no contato, já que o contato não é uniforme. No entanto, para simplificar o modelo,

será considerado que todos os sítios de nucleação e crescimento de óxido têm o mesmo número e tipo de camadas.

Segundo Hamilton e Goodman (1966)⁵⁷, a espessura onde está localizada a tensão máxima no carregamento estático com geometria de contato, do tipo esfera-plano, pode ser dada por $\varepsilon \approx 0,47 r_a$, que é a zona onde se tem a máxima tensão de cisalhamento. Essa espessura compreende a região afetada pelo contato mecânico com deformação elástica. Quando há deslizamento, essa espessura diminui, ou seja, a distância entre a zona de cisalhamento máximo e a superfície diminui segundo Hamilton e Goodman (1966). Para o modelo, será assumido que $\varepsilon_0 = 0,47 r_a$, ou seja, adotou-se para simplificação que a espessura da zona afetada pelo deslizamento, onde ocorrem as reações de difusão do oxigênio, corresponderá à espessura da zona até a máxima tensão de cisalhamento resultante da deformação elástica de um contato esfera-plano sob carregamento na condição estática. Com isso, uma das principais consequências é que a taxa de desgaste no deslizamento predeterminada segundo esse critério será sempre maior que a realmente originada durante o deslizamento, já que a espessura real afetada pelo deslizamento é tal que $\varepsilon_0 < 0,47 r_a$ ^{IV}.

Considerando que todo micro-contato é não conforme e puramente elástico, como é o caso do desgaste oxidativo [Pezdirnk et al., 1999]⁵⁸, pode-se aplicar o modelo de Hertz [Timoshenko, 1970]⁵⁹ para a obtenção da relação de A_r e r_a :

$$A_r = 4\pi r_a^2, \text{ com } r_a = \left(\frac{3Q\hat{r}}{4E_v} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Onde:

$\hat{r}$ = raio das asperezas,

Q = carga aplicada,

---

^{IV} Isso resulta do balanço energético (energias mecânica e térmica) em cada ponto da zona afetada na região do contato.

E_v = módulo de Young equivalente do contato; calculado a partir dos módulos elásticos E_1 e E_2 e dos coeficientes de Poisson ν_1 e ν_2 dos materiais em contato, tal que $\frac{1}{E_v} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$.

Substituindo essas relações na Eq 3.15, a expressão para a taxa de desgaste oxidativo toma a seguinte forma:

$$W = 0.94\pi N \left(\frac{3Q\hat{r}}{4E_v} \right)^{\frac{2}{3}} \exp \left(- \frac{\sum_j (\Delta G_i)_j}{E_c} \right) \quad \text{Eq. 3.16}$$

O valor do raio das asperezas $\hat{r}$ é modelado considerando-se as hipóteses propostas por Greenwood e Williamson (1966)⁶⁰: (1) As asperezas são rígidas e indeformáveis. (2) Considera-se o contato entre um plano e uma superfície nominalmente plana que apresenta um grande número de rugosidades com extremidades esféricas. (3) Assume-se que todos os topos das rugosidades têm o mesmo raio ($\hat{r}$) e suas alturas variam aleatoriamente, de forma que a probabilidade de uma dada aspereza ter uma altura entre z e $(z+dz)$, acima de um plano de referência, é dada por $\phi(z)dz$. Com o uso da distribuição de alturas, o comportamento elástico de uma aspereza individual pode ser determinado a partir das equações de Hertz [Timoshenko,1970] e a pressão total no contato pode ser calculada pela expressão⁶⁰:

$$P = \frac{4}{3} NE_v \hat{r}^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (z - d)^{\frac{3}{2}} \phi(z) dz \quad \text{Eq. 3.17}$$

Onde

$\phi(z)$ = função de distribuição de alturas das asperezas, que, para este trabalho, será considerada do tipo gaussiana,

N = número de asperezas.

O modelo de contato de Greenwood e Williamson se encontra detalhado no Anexo 1.

3.1 Cálculo da energia de contato

Durante o desgaste oxidativo, a energia de contato ($E_c = RT_c$), definida como a energia térmica produzida durante o contato com atrito entre as asperezas, depende da temperatura do contato (T_c). Muitos trabalhos^{61,62}, têm sido desenvolvidos acerca deste tema. A maioria destes trabalhos concorda que a temperatura no contato (T_c) é dependente do tamanho e da forma da área real de contato, além do coeficiente de atrito, da carga normal, da velocidade de deslizamento e das propriedades térmicas dos corpos em contato, sendo definida de maneira genérica como a soma da temperatura pontual ou localizada nas asperezas, T_f (“*flash temperatura*”), e da temperatura do corpo em contato, T_b (“*bulk temperatura*”), dada por Cowan e Winer (1995)⁶³:

$$T_c = T_b + T_f \quad \text{Eq. 3.18}$$

A Eq 3.18 é citada em toda a literatura consultada do tema; onde a temperatura pontual T_f é considerada o incremento da temperatura no contato. Os itens a seguir apresentam os cálculos das temperaturas T_b e T_f .

3.1.1 Temperatura da superfície de contato

Lim e Ashby (1987)²⁸ modelaram a temperatura da superfície, estudando o fluxo de calor gerado na interface por unidade de área por segundo durante o deslizamento do pino sobre o disco, segundo a equação:

$$q = \frac{\mu Q v}{A_n}, \text{ em unidades de } \left[N \left(\frac{m}{s} \right) \frac{1}{m^2} \right] \quad \text{Eq. 3.19}$$

Onde:

q = fluxo de calor gerado na superfície,

μ = coeficiente de atrito,

Q = carga normal,

v = velocidade de deslizamento,

A_n = área nominal de contato.

O coeficiente de atrito μ é usado para poder modelar a temperatura do contato conforme proposto por Lim e Ashby (1987), dado por:

$$\mu = \mu_e - 0.13 \log \left(\frac{v r_a}{a} \right) \quad \text{Eq. 3.20}$$

Onde:

r_a = raio de contato entre asperezas,

$a = \frac{K_m}{\rho c}$ = difusividade térmica do metal e K_m , ρ e c definidos abaixo

K_m = condutividade térmica do metal,

ρ = densidade do metal,

c = capacidade calorífica do metal,

μ_e = coeficiente de atrito estático.

A temperatura do corpo do pino é calculada empregando a primeira lei do fluxo do calor, considerando que uma parte da fração do calor (α) é absorvida pelo pino durante o contato e uma parte deste calor é perdido na forma de radiação, obtendo a equação:

$$T_b = T_o + \alpha \frac{\mu Q v L_b}{A_n K_m} \quad \text{Eq. 3.21}$$

Onde α é um coeficiente que representa a partição do calor que é absorvida pelo pino durante o contato, dado pela Eq 3.22:

$$\alpha = \sqrt{\frac{8.a.r_a}{32.a.r_a + \pi.L_b^2.v}} \quad \text{Eq. 3.22}$$

Os parâmetros T_o e L_b representam a temperatura medida e a distância do ponto de medição até o contato e estão apresentados na Figura 3.1.

Figura 3.1: Esquema das regiões características num ensaio pino-disco.

3.1.2 Temperatura local do contato

Cowan e Winer (1995)⁶³ apresentaram um procedimento para o cálculo da temperatura local do contato, partindo da consideração dos microcontatos elásticos calculados a partir da teoria do contato Hertziano e do número de Péclet, adimensional que representa a transferência do calor e que depende de parâmetros do contato, como as propriedades térmicas dos corpos, dada por:

$$Pe = \frac{2vr_a}{a} \quad \text{Eq. 3.23}$$

Segundo esses autores, a temperatura local é dependente do fluxo de calor gerado na superfície (conforme Eq 3.19), do tempo do contato e de parâmetros térmicos do material, dada por:

$$T_f = F \frac{\alpha q}{b} \sqrt{t} \quad \text{Eq. 3.24}$$

Onde:

$$b = \frac{K_m}{\sqrt{a}},$$

t = tempo do contato.

O coeficiente F, segundo Cowan e Winer (1995)⁶³, é dependente da forma da distribuição do calor, tendo como resultados experimentais os seguintes valores:

F = 1,11 para um contato semi-elíptico,

F = 1,13 para um contato numa linha e

F = 0,50 quando o contato é circular.

A Eq 3.24 assume que os corpos têm a mesma temperatura na superfície e, dependendo do raio do contato e se as deformações no contato foram elásticas ou plásticas, apresenta diferentes formatos. No caso do desgaste oxidativo, que ocorre sob condições de deformações elásticas, onde as superfícies ficam polidas, as equações são dadas por:

Para baixas velocidades (Pe < 0,2):

$$T_f = 0,50\mu Q^{\frac{2}{3}}v \left(\frac{1}{K_m} \right) \left(\frac{E_v}{\hat{r}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 3.25}$$

Para altas velocidades (Pe > 200):

$$T_f = 0,50\mu Q^{\frac{1}{2}}v^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{K_m\rho c}} \right) \left(\frac{E_v}{\hat{r}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 3.26}$$

3.1.3 Energia de Gibbs no desgaste oxidativo

Termodinamicamente, um óxido é formado na superfície de um metal quando o potencial de oxigênio no meio é maior que a pressão parcial do oxigênio em equilíbrio com o óxido. A variação da energia livre pode ser determinada a partir da

pressão parcial do oxigênio (P_{O_2}) em equilíbrio com o óxido, através de uma reação dada por:

A expressão para a variação de energia livre é dada por:

$$\Delta G_s = -RT_c \ln \left(\frac{a_{MO_2}}{a_M P_{O_2}} \right) \quad \text{Eq. 3.28}$$

Onde:

R = constante universal dos gases,

T_c = temperatura de contato,

P_{O_2} = pressão parcial do oxigênio,

a_{MO_2} = atividade química do óxido,

a_M = atividade química do metal.

Segundo Birks e Meier (1993)⁶⁴ e Kofstad (1998)⁶⁵, a variação da energia livre de Gibbs em função da temperatura é como apresentado na Figura 3.2, onde notam-se diferentes tendências dependendo do elemento da reação de oxidação.

Figura 3.2: Energia livre para a formação de diferentes tipos de óxidos em função da temperatura [Birks e Meier, 1993].

No caso de aços AISI M2 ^V, Kelley, Prohet e Janaf (1971)⁶⁶ obtiveram a variação da energia de Gibbs com a temperatura partindo dos valores da entalpia ΔH e da entropia ΔS para a formação dos óxidos estáveis para esses aços, sabendo que $\Delta G = \Delta H_s - T_c \Delta S_s$. Na Tabela 3.1 são mostrados os valores e quatro reações de oxidação são observadas, sendo três com o ferro e um com o cromo presente no aço.

^V Composição do aço ferramenta M2 (segundo a norma AISI):

C(%)	Mn(%)	Si(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)	W(%)	V(%)
0,95-1,05	0,15-0,40	0,20-0,45	3,15-4,50	Máx 0,30	4,50-5,50	5,50-6,65	1,75-2,20

Tabela 3.1: Reações que podem ocorrer no aço AISI M2 [Kelley, Prohet e Janaf, 1971].

Reações	ΔH (J)	ΔS (J)	T_c ($^{\circ}C$)
$2Fe + O_2 \leftrightarrow 2FeO$	-258,168	63,102	773 a 1.333
$4Fe + 3O_2 \leftrightarrow 2Fe_2O_3$	-797,778	245,631	25 a 1.500
$3Fe + 2O_2 \leftrightarrow Fe_3O_4$	-1.080,063	301,108	25 a 1.500
$6Cr + 2O_2 \leftrightarrow 2Cr_2O_3$	-327,508	62,525	900 a 1.750

Na Figura 3.3, apresenta-se a forma e os tipos de óxidos no caso de ligas de Fe-Cr apresentada por Wright (1987)⁶⁷. Essa Figura caracteriza a estrutura de formação das várias camadas de óxido, como descrito anteriormente na Eq. 3.10.

Figura 3.3: Efeito do % Cr em ligas Fe-Cr na taxa de oxidação e estrutura do óxido formado, resultante da oxidação isotérmica a 1000 $^{\circ}C$ e 0,13 atm O_2 [Wright, 1987].

Como pode se observar na Figura 3.3, as ligas Fe-Cr com o percentual de cromo próximo ao do aço AISI M2 apresentam uma estrutura de oxidação mais complexa da apresentada na Tabela 3.1. Entretanto, para simplificação, as reações de oxidação apresentadas nessa Tabela serão as utilizadas na modelagem do desgaste oxidativo proposta na presente Tese.

Na Figura 3.4 apresenta-se o fluxograma da modelagem, o programa se encontra no Anexo II.

Figura 3.4: Fluxograma do programa para a modelagem do desgaste oxidativo.

3.2 Compatibilidade com os resultados da literatura

3.2.1 Parâmetros da modelagem

O modelo proposto foi testado através de uma simulação para a obtenção do desgaste oxidativo resultante de ensaios de pinos e discos de aço ferramenta AISI M2. Para tanto, foram utilizados dados de temperatura descritos em ensaios pino-sobre-disco de materiais metálicos reportados na literatura [Quinn e Quinn, Rowson e Sullivan^{16,31}, onde a temperatura da superfície do metal, medida a uma distância de 1 milímetro a partir da superfície de contato, variou durante o ensaio entre 30 e

300 °C. Tomou-se como os parâmetros do material AISI M2 três valores de coeficiente de atrito estático μ_e , e valores médios do módulo de Young E, da condutividade térmica K_m , da densidade do material ρ , do coeficiente de Poisson ν e da capacidade calorífica do metal c^{68} . Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros dos materiais em contato aço M2, [Metals Handbook 68].

μ_e	E (N / m ²)	K_m (W / m K)	ρ (kg / m ³)	c (J / kg K)	ν
0,45	210x10 ⁶	22	7.833	460	0,3
0,55					
0,78					

Incorporando os dados e calculando os parâmetros necessários da Eq. 3.16, utilizou-se o programa MATLAB 5.3 (vide Anexo II) para testar o modelo proposto, estudando a influência da carga, da velocidade, da energia de Gibbs e do coeficiente de atrito estático na taxa de desgaste. Os resultados encontrados estão apresentados a seguir.

3.2.2 Influência da carga, velocidade e coeficiente atrito estático na taxa de desgaste

A Figura 3.5, mostra a dependência da taxa de desgaste com a carga e a velocidade, como os reportados na literatura, para o desgaste oxidativo de materiais metálicos, apresentados no Capítulo 2 (vide Figuras 2.16 e 2.17 de Quinn (1983)).

Essa simulação mostra claramente que a taxa de desgaste depende do coeficiente de atrito estático e, quanto maior o seu valor, maior é a sua dependência com a velocidade. Pode-se associar esta dependência às interações devidas ao fenômeno de adesão no contato e à rugosidade do material, que ocorrem no contato nos instantes iniciais do ensaio.

Figura 3.5: Dependência da taxa de desgaste com o coeficiente de atrito estático, a carga, a velocidade e a temperatura do contato.

Além disso, os resultados da simulação mostram que a influência da velocidade na taxa do desgaste se torna mais apreciável quando se aumenta a carga. Parte dos resultados concordam com os relatados na literatura, como os de Quinn (1983) e Hong So (1995) sendo que os resultados de Hong So não mostraram linearidade com a velocidade. O efeito da velocidade, combinado ao da carga, na taxa de desgaste pode ser explicado pela influência do fator térmico, já que à medida que a carga aumenta, a temperatura do contato aumenta. A profundidade da zona do contato termicamente afetada pode aumentar, permitindo, portanto, aumentar a ocorrência de reações entre o metal e o óxido e, conseqüentemente, o crescimento da camada de óxido. O processo eletroquímico na superfície é normalmente controlado pela taxa de difusão dos cátions no material que, por sua vez, depende da natureza do óxido que atua como barreira.

3.2.3 Influência da energia de Gibbs na taxa de desgaste

A Figura 3.6 mostra a influência na taxa de desgaste da presença de diferentes óxidos que formaram nas superfícies, evidenciando que a natureza do óxido afeta os valores da taxa de desgaste. O estabelecimento de uma camada de óxido numa liga ocorre por um processo de nucleação e crescimento, considerando que quando o componente limpo, sem óxidos, é exposto a gás rico em oxigênio, óxidos termodinamicamente estáveis se desenvolvem na forma de pequenos núcleos na superfície. À medida que crescem, a temperatura na região pode também contribuir para aumentar a possibilidade de novas formações de óxido e crescimento. Nessa situação, a formação de vários tipos de óxido pode ocorrer simultaneamente, a taxas de desgaste menores, o que pode ser explicado considerando que as superfícies tendem a se oxidar muito rapidamente devido à ação da temperatura e, portanto, diminuir o valor da taxa de desgaste. O óxido formado pode atuar como barreira que impede a penetração dos cátions do material para a barreira de óxido, como no caso do Fe_3O_4 e Fe_2O_3 , por questões de equilíbrio e deve prevalecer à presença dos óxidos mais estáveis para as dadas condições. A presença de óxido de cromo poderia aumentar a taxa de oxidação, porém isso depende de alguns fatores, como o conteúdo de cromo na liga, como mostrado na Figura 3.3, e da temperatura. Os resultados da simulação apresentados na Figura 3.6, a presença do óxido de cromo aparentemente não altera a taxa de desgaste, quando se compara os dois gráficos superiores desta Figura.

Figura 3.6: Dependência da taxa de desgaste com a energia de Gibbs e temperatura do contato. $\mu_e=0.78$

Ainda na Figura 3.6, os dois gráficos inferiores mostram o resultado da simulação considerando um processo de deslizamento onde a formação de Fe_2O_3 é cíclica, ou seja ocorre a nucleação e o crescimento do óxido, havendo a sua remoção pelo desgaste e em seguida um novo ciclo de nucleação, crescimento e remoção, tudo numa mesma camada. Observa-se como resultado dessa simulação que o comportamento da taxa de desgaste aumenta em instabilidade, visto claramente no gráfico inferior direito da Figura 3.6. A explicação disso é que, durante o efeito cíclico de formação, crescimento e remoção do óxido, ocorre uma deterioração do material, ou seja, já não há somente uma degradação superficial e sim do próprio material, que está além da região oxidada, o qual é removido das superfícies. Se o comportamento do desgaste fosse dependente apenas das variações da carga, a curva da taxa do desgaste poderia ser ajustada a uma reta,

mas os pontos dispersos no gráfico inferior direito da Figura 3.6 indicam que, durante o deslizamento, existem variações do mecanismo de oxidação, devido a outros efeitos que foram introduzidos indiretamente pela carga aplicada. O item seguinte trata do efeito da carga em outros parâmetros do contato, tais como número de contatos reais, espessura de óxido e área real de contato e também no coeficiente de atrito.

3.3 Influência da carga nos parâmetros do contato e no atrito

Na Figura 3.7 pode-se observar a dependência dos parâmetros do contato e do coeficiente de atrito com a carga normal aplicada. Para a obtenção do comportamento do coeficiente de atrito apresentado nessa Figura, partiu-se do modelo proposto por Lim e Ashby (1987), apresentado na Eq. 3.20. Pode ser observado que o comportamento do coeficiente de atrito resultante é muito similar ao obtido por Hong So (1995) (Figura 2.10), ou seja, o coeficiente de atrito diminui à medida que a carga e a velocidade aumentam. Esse fato indica que o modelo de Lim e Ashby consegue descrever o comportamento do atrito no desgaste oxidativo. Este modelo foi utilizado para verificar como o coeficiente de atrito estático, ou seja, as condições iniciais do contato, influenciam a resposta do desgaste oxidativo.

Figura 3.7: Influência da carga sobre parâmetros do contato: coeficiente de atrito, espessura de óxido, número de contatos e área real de contato.

Os parâmetros do contato (espessura de óxido, número de contatos e área real de contato) mostrados na Figura 3.7, também são resultados da simulação do modelo proposto neste trabalho. Nota-se que a espessura de óxido e a área real de contato aumentam à medida que a carga aumenta. O aumento da espessura se deve ao fato de que à medida que a carga aumenta, a temperatura do contato aumenta, o que está relacionada à carga e à velocidade, pois a ação destas contribuem diretamente para a geração do calor na superfície do material. O aumento da temperatura aumenta a difusão de cátions do material para a superfície e diminui a energia de Gibbs e daí ocorrendo a nucleação e crescimento do óxido.

O número de contatos tende a diminuir e a área de contato real tende a aumentar devido à diminuição da rugosidade, assim como, pelo crescimento das camadas de óxido nas duas superfícies, provocando no limite, um contato do tipo

“plano contra plano”. Esse resultado discorda dos obtidos por Quinn, mostrados na Figura 3.8.

Obs.: dados obtidos segundo TFJ Quinn Oxidational Wear, ASM Handbook, V18, p.280-289, 1992, TFJ Quinn, Computational methods applied to oxidational wear, Wear, 199, p.169-180, 1996 e TFJ Quinn, Oxidational wear modelling part III, Wear, 216, p.262-275, 1998. Este contém os mesmos dados que o artigo de 1996.

Figura 3.8: Dependência do número de contatos com a carga segundo resultados obtidos por Quinn (1992, 1996 e 1998).

CAPÍTULO 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de verificar experimentalmente o modelo proposto, foram realizados ensaios de desgaste com materiais metálicos em um equipamento laboratorial. Os itens a seguir apresentam os materiais e a metodologia empregada.

4.1 Materiais

4.1.1 Caracterização dos materiais

O material dos pinos foi o aço AISI M2 temperado e revenido, com dimensões de $\varnothing 3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ e os discos foram de aço ABNT 1045 austemperado, com $\varnothing 38 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.

O tratamento térmico dos materiais foi feito na empresa BRASIMET. Os discos foram austenitizados a $830 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e austemperados num banho de sal de nitrato de potássio a $370 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. O tratamento dos pinos de AISI M2 consistiu de um pré-aquecimento a $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e a $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, austenitizado a $1.180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e temperado ao ar, seguido de três revenidos a $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em banho de sal,. Esses são tratamentos comumente usados na indústria para estes tipos de aço.

4.1.1.1 Composição química

A análise química dos materiais foi feita por via úmida e os resultados estão apresentados na Tabela 4.1. As quantidades de carbono (C) e de enxofre (S) foram medidas pelo método gasovolumétrico na empresa VILLARES SIDENOR Construção Mecânica S.A.

Tabela 4.1: Composição química dos materiais usados.

Materiais	C(%)	S(%)	P(%)	Mn(%)	Si(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)	W(%)	V(%)
Pino (M2)	0,79	0,02	0,01	0,24	0,24	4,25	-	5,35	6,65	1,97
Disco (1045)	0,44	0,2	0,02	0,52	0,17	-	-	-	-	-

4.1.1.2 Exame metalográfico

A preparação metalográfica dos corpos-de-prova consistiu de lixamento com lixas d'água, progressivamente de granas 100, 120, 220, 320, 400, 600 e 1000 e polimento com pasta de diamante de 6 e 3 μm . A observação dos constituintes microestruturais foi feita após ataque químico com uma solução diluída a 2 % de ácido nítrico e 98 % de álcool etílico anidro (ataque Nital 2 %) durante 10 segundos.

As microestruturas foram observadas num microscópio óptico LEICA, com uma câmera acoplada para aquisição digital da imagem. Nas Figura 4.1 e 4.2 apresentam-se as microestruturas dos materiais.

Figura 4.1: Microestrutura bainítica presente no material do disco. a) 500x, b) 200x. Atacado com Nital 2%.

A microestrutura observada no material do disco é típica de um tratamento térmico em banho de sal a uma temperatura constante (processo isotérmico), apresentando regiões com bainita inferior e superior.

Figura 4.2: Microestrutura de martensita revenida com presença de carbonetos no material dos pinos. a) 1000x, b) 500x. Atacado com Nital 2%.

A microestrutura observada no material dos pinos foram martensita revenida com austenita retida e presença de carboneto.

4.1.1.3 Dureza

4.1.1.3.1 Macro dureza Rockwell C

Foram realizados ensaios de dureza Rockwell C para os materiais dos pinos e dos discos, com um durômetro universal, usando uma pré-carga de 10 kg e carga de ensaio de 150 kg, com penetrador cônico de diamante de 120°, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Valores de dureza Rockwell C do pino.

Dureza HRC					
Nº do ensaio	1	2	3	4	5
HRC	65	65	64	65	65
Média	64,8 ±0,4				

Tabela 4.3: Valores de dureza do disco.

Dureza HRC					
Nº do ensaio	1	2	3	4	5
HRC	40	41	41	40	41
Média	40,6 ±0,5				

4.1.1.3.2 Nanodureza

Foram feitas medidas de nanodureza dinâmica das fases presentes nos materiais com o equipamento FISCHER HV 100. A diferença desse tipo de medida de dureza com relação à microdureza convencional reside no fato do instrumento realizar medidas de força e deslocamento durante a indentação.

As Tabela 4.4 e 4.5 apresentam os resultados de dureza dos pinos e dos discos. Os valores de nanodureza são reportados como dureza Vickers (HRV) e Dureza Universal (HRU).

Tabela 4.4: Valores de nanodureza do material do disco.

Nanodureza (Carga = 300 mN)						Media
HRV	449,5	499,2	449,6	443,3	451,1	450±48
	403,7	425,9	550,1	441,9	391,2	
HRU (MPa/mm ²)	338,1	354,1	406,6	365,6	327,7	360±30
	367,4	401,8	369,7	362,5	367,7	

Os valores de nanodureza variaram de forma que se permite assegurar a existência de micro-regiões com durezas que diferem muito pouco entre si.

Tabela 4.5: Valores de nanodureza do material do pino.

Nanodureza (Carga = 750 mN)						Media
HRV	1036,9	914,8	1180,6	1133,6	1232,2	1090 ±90
	1070	1014,5	1129,5	1111,8	1104	
HRU	645,2	588,3	713,7	685,7	696,1	670±90
	663,3	638,4	690,5	682	689,6	

4.2 Metodologia experimental

4.2.1 Ensaios pino-sobre-disco

Os ensaios de desgaste foram do tipo pino-sobre-disco, com equipamento modelo TE-67, de fabricação PLINT & PARTNERS LTD, composto pelas seguintes partes:

Microcomputador. Com software de aquisição de dados, e controle e monitoramento dos parâmetros de interesse tribológico, tais como: velocidade angular, número total de ciclos, força de atrito média, raio da pista de ensaio, tempo de ensaio, entre outros. O software também calcula a velocidade tangencial, a distância percorrida e o coeficiente de atrito.

Máquina de ensaio tipo pino-sobre-disco (Figura 4.3): Permite trabalhar com uma velocidade tangencial entre 0,01 m/s e 1,6 m/s, velocidade angular de 0 a 2.000 rpm e carga de contato de 0,1 N até 1.000 N. A aplicação da carga foi feita pelo sistema pneumático. As forças sobre o pino são medidas por duas células de carga, uma na posição de aplicação da carga e outra na base de fixação do pino, com as quais se medem a carga normal e a força de atrito.

Figura 4.3: Máquina de ensaio de desgaste pino-contra-disco Plint TE 67.

Os ensaios de desgaste foram divididos em duas etapas, sendo a primeira denominada etapa de assentamento, e caracterizou-se pela manutenção das superfícies em contato sob uma carga de 15 N durante 30 minutos a uma rotação constante de 756 rpm e com uma pista do disco com raio de 10 mm. O acabamento das superfícies dos pino e dos discos foram respectivamente brutos de retifica e

polidos. Esta etapa objetivou minimizar o tempo de assentamento das superfícies, que ocorre nos instantes iniciais do ensaio denominado de “*running-in*”.

A segunda etapa dos ensaios teve um tempo de duração de 3 horas; a carga foi crescente em função do tempo com velocidade angular constante de 756 rpm. A pista de deslizamento do pino sobre o disco foi de 13,5 mm, a superfície do disco polida e a do pino foi a da final da etapa de assentamento. O acabamento superficial dos discos foi realizado por lixamento com lixas de granas 180, 240, 320, 400, 600 e 1000, e com polimento final com pastas de diamante de 6 μm e 3 μm .

Objetivando avaliar a influência da taxa de aplicação da carga, foram feitos três conjuntos de ensaios, nos quais a carga final da segunda etapa dos ensaios foi de 40, 80 ou 120 N.

Durante os ensaios, foram medidas a força de atrito, a carga aplicada, a distância de deslizamento do pino sobre o disco, o potencial de contato (proporcional à resistividade elétrica do contato), o deslocamento vertical do pino (daqui em diante denominado “desgaste (μm)”) e a temperatura do pino. Esta será utilizada também para calcular a dilatação dos materiais, a fim de eliminar o erro imposto pela dilatação na medida do “desgaste (μm)”. O coeficiente de atrito entre as duas superfícies será calculado a partir da relação das forças normal e tangencial.

A Figura 4.4 esquematiza o procedimento adotado durante os ensaios de desgaste. A distância total percorrida foi a mesma para todos os ensaios.

Figura 4.4: Esquema dos ensaios de desgaste mostrando a variação da carga.

4.2.2 Metodologia de análise dos resultados

Os ensaios tribológicos geralmente são de longa duração e por causa disso ainda não é regularmente realizado, em escala industrial, como técnica de controle da qualidade, para caracterização de desempenho dos materiais. As medições das taxas de desgaste são feitas de forma direta, partindo da massa perdida dos materiais durante o ensaio.

Para obter o comportamento da dependência do desgaste com a carga ou a distância percorrida, é usual repetir os ensaios com amostras diferentes mais de 5 vezes; além disso, para se obter por exemplo, o efeito dessas duas variáveis, são necessários pelo menos dois pacotes de ensaios. Portanto, para se obter uma caracterização dos materiais mediante duas variáveis, são necessárias no mínimo 20 amostras.

Além disso, o tempo para cada ensaio geralmente é superior a uma hora de duração, podendo chegar a dias, e normalmente considera-se somente a parte do ensaio na qual o coeficiente de atrito ou a perda de massa se estabilizam; ou seja, a parte inicial dos ensaios (etapa de “*running-in*”) geralmente é descartada, já que normalmente se considera que nesta região de instabilidade atuam mecanismos

diferentes dos quais se desejam estudar e que possam caracterizar o comportamento do material.

Uma forma de representar os mecanismos de desgaste que atuam nos materiais é através dos denominados mapas de desgaste, os quais são construídos a partir de resultados obtidos para várias condições de carga e velocidade. Nestes mapas, as diferentes regiões de atuação de cada mecanismo de desgaste são destacadas. Na literatura, encontra-se dois tipos de mapa, uma com a “carga normal contra a velocidade de deslizamento” e “velocidade de deslizamento normalizada contra a pressão de contato normalizada”, tendo como variável dependente destas condições o desgaste sob cada condição, como mostrado no Cap. 2 do presente trabalho.

Para a construção de mapas de desgaste, é necessário a realização de grande quantidade de ensaios, de forma geral, demorados. Por isso, os mapas reportados na literatura, Lim e Ashby (1987), Quinn (1992) e Blau (1996), em geral, reúnem resultados de vários pesquisadores, embora a literatura tenha mostrado que os resultados apresentam, grande dispersão, quando não são realizados no mesmo equipamento e com condições extremamente próximas.

Impulsionado pelas dificuldades apresentadas, quanto à caracterização de materiais quanto ao desgaste, desenvolveu-se nova técnica de análise dos resultados onde se caracteriza os dados gerados pelo ensaio de desgaste estatisticamente segundo Pantaleón e colaboradores (2001)⁶⁹. A metodologia consiste em, a partir dos dados adquiridos durante o ensaio, calcular os valores das variáveis estatísticas dos dados, a saber:

- média (M_d),
- desvio-padrão (STD), e
- variância (RMS).

Tratando-se de sinais adquiridos que variam, ou seja, apresentam flutuações ao longo do tempo, as flutuações que ocorrem nas variáveis estatísticas mencionadas também foram estudadas, para obter dados que informem a evolução dos parâmetros ao longo do ensaio, que são:

- variação da média (ΔMd),
- variação do desvio-padrão (ΔSTD), e
- variação da variância (ΔRMS).

Quanto à variância (RMS e ΔRMS), o procedimento de cálculo está apresentado no Anexo III, porém, os valores obtidos não serão utilizados no presente trabalho. A Figura 4.5 mostra uma indicação das variáveis estatísticas tomadas para estudo.

Figura 4.5: Desenho representativo do dado obtido no ensaio e as variáveis estatísticas tomadas para estudo.

Os cálculos foram realizados para cada uma das grandezas medidas a temperatura, a carga, o “desgaste (μm)”, o potencial de contato e o coeficiente de atrito. Os valores foram equacionados da seguinte forma:

$$Md = \frac{\sum_{i=1}^n P(i)}{n}$$

Eq. 4.1

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P(i) - P_o)^2}{n}}$$

Eq. 4.2

$$\text{RMS} = \frac{\sum_{i=1}^n (P(i) - P_o)^2}{n}$$

Eq. 4.3

$$\Delta \text{Md}(i) = \text{Md}(i + 1) - \text{Md}(i)$$

Eq. 4.4

$$\Delta \text{STD}(i) = \text{STD}(i + 1) - \text{STD}(i)$$

Eq. 4.5

$$\Delta \text{RMS}(i) = \text{RMS}(i + 1) - \text{RMS}(i)$$

Eq. 4.6

O fluxograma para a análise e obtenção dos valores estatísticos está apresentado na Figura 4.6 e o programa se encontra no Anexo III

Figura 4.6: Fluxograma do programa de análise dos dados obtidos do ensaio na máquina pino-sobre-disco.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal objetivo dos ensaios propostos é avaliar o modelo proposto no Cap. 3, obtendo a tendência da taxa de desgaste oxidativo em função da carga. Assim, os ensaios tiveram como prioridade obter uma situação onde aconteça o mecanismo de desgaste oxidativo, e as técnicas auxiliares de análise empregadas estiveram direcionadas para avaliar a presença dos mecanismos de desgaste.

5.1 Ensaios pino-contra-disco: desgaste linear, coeficiente de atrito e potencial de contato

Na Figura 5.1 observam-se curvas típicas dos valores do coeficiente e da força de atrito, do desgaste e do potencial de contato em função do tempo, que resultaram das três tipos de carregamento, caracterizadas pelas três faixas de variação de carga, de 20 a 40 N, 20 a 80 N e 20 a 120 N. Observando os gráficos, nota-se que o coeficiente de atrito tem uma flutuação irregular e de amplitude elevada nos primeiros 3.000 s, para os diferentes tipos de carregamento e, a partir desse instante, a amplitude dos valores do coeficiente de atrito tende a variar numa faixa mais estreita. Esse fato pode estar relacionado à transição de uma etapa de assentamento para um estágio de desgaste estável.

Figura 5.1: Valores do coeficiente de atrito, força de atrito, desgaste e potencial de contato, obtidos da máquina de ensaio. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

Pelo gráfico das curvas da força de atrito dessa Figura, observa-se que todas as curvas se comportaram de maneira crescente durante todo o período do ensaio com o aumento progressivo da carga normal aplicada. Porém, no coeficiente de atrito, não se nota uma relação aparente com a carga aplicada, e o comportamento, em função do tempo foi distinto para cada tipo de carregamento.

Quanto aos resultados de desgaste, observa-se uma evolução crescente em função do tempo de ensaio para os três tipos de carregamento. Nota-se um elevado aumento do desgaste, logo nos instantes iniciais dos ensaios com as faixas de carregamentos menores. As maiores perdas ocorreram para as menores faixas de variação de carga (curvas verde e vermelha). Esse fato poderia ser explicado pela ocorrência do processo de oxidação nas superfícies ser predominante no ensaio com a maior variação da carga, o qual tendeu a diminuir a perda de material nessa condição.

Quanto ao comportamento do potencial de contato, as curvas mostradas nessa Figura, indicam que não houve uma dependência característica do potencial

com a evolução da carga durante o ensaio. Por outro lado, os maiores valores evidenciados no ensaio, com a maior variação de carga (curva azul), podem também estar relacionados com a ocorrência de um filme de óxido que teria provocado um isolamento das superfícies de contato com esse tipo de carregamento. Esse fato concorda com o resultado correspondente ao desgaste. Entretanto, a observação do coeficiente de atrito, correspondente à curva azul, indica que se o filme de óxido existiu, o mesmo não afetou o valor médio do coeficiente de atrito de maneira significativa. Um fato curioso é que as curvas da força de atrito apresentaram níveis de flutuação da amplitude dos valores que puderam estar claramente relacionadas com os tipos de carregamento.

Também se pode observar da Figura que, no ensaio com a maior variação da carga (curvas azuis), as flutuações na amplitude dos valores das curvas de todos os parâmetros foram significativamente maiores. Esse fato poderia estar associado à maior instabilidade do sistema nessa condição de ensaio, porém, existe a hipótese de que as flutuações, e mesmo as suas variações, possam estar associadas aos fenômenos característicos de cada faixa de variação de carga.

No item a seguir, tenta-se caracterizar e discutir aspectos acerca dessas flutuações e também das variações dessas flutuações.

5.2 Relações estatísticas dos valores dos parâmetros tribológicos com a carga e a distância

5.2.1 Médias do desgaste linear, coeficiente de atrito e potencial de contato

Na Figura 5.2 apresentam-se as médias (M_d) globais do coeficiente de atrito, do potencial de contato e do desgaste resultante para cada tipo de carregamento

utilizado no ensaio. O método para a obtenção dos valores encontra-se descrito no Anexo III.

Figura 5.2: Médias globais (Md) dos parâmetros tribológicos para cada tipo de carregamento utilizado no ensaio.

Essa Figura resume as tendências descritas no item anterior em termos dos valores médios de cada parâmetro. Nota-se também uma acentuada diferença no desgaste nas três faixas de carga. Esse fato indica a ocorrência de mecanismos de desgaste distintos para cada tipo de carregamento estudado.

Para melhorar a visualização das tendências dos parâmetros, foram obtidas médias dos valores do coeficiente de atrito, do desgaste e do potencial de contato, onde cada ponto representa 15 medições. O resultados estão mostrados na Figura 5.3. Observa-se que a variação do coeficiente de atrito tende a diminuir à medida que o tempo de ensaio aumenta. No início, as variações oscilam com diferenças do coeficiente de atrito de até 0,12 e, ao final dos ensaios, estas atingem diferenças menores que 0,03. O potencial de contato não apresenta características tão marcantes, não sendo uma boa medida obter informações deste parâmetro através desse procedimento.

Figura 5.3: Valores das médias parciais do coeficiente de atrito e do potencial de contato. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

5.2.2 Variações das médias e dos desvios-padrões do desgaste, coeficiente de atrito e potencial de contato

Considerando que os resultados obtidos na máquina de ensaio são sinais aleatórios no tempo, então, pode-se aplicar os conceitos estatísticos, onde se define que um processo aleatório é constante se seus momentos estatísticos são constantes. No caso dos ensaios, se a variação das médias e dos desvios-padrões são constantes a partir de certo ponto, pode-se concluir que o “processo” correspondente, ou seja, os fenômenos referentes ao parâmetro analisado (coeficiente de atrito, potencial de contato ou desgaste) se tornam constantes a partir desse ponto.

Na Figura 5.4 e 5.5 apresentam-se respectivamente as variações das médias (ΔMd) e dos desvios-padrões (ΔSTD) entre dois dados consecutivos de cada parâmetro tribológico resultantes dos diferentes tipos de ensaio.

Figura 5.4: Variação da média (ΔMd) dos parâmetros tribológicos para cada tipo de ensaio. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

A variação da média do coeficiente de atrito, como pode ser observado, tem um determinado instante onde passa a ser considerado constante. Nos primeiros 3.000 s, a variação da média apresenta valores que decrescem, tendo o mesmo comportamento para as diferentes cargas de ensaio, ou seja, a variação passou a ser constante e nula. Logo, deduz-se que os mecanismos do contato levaram a um processo de atrito constante após 3.000 s.

A variação da média do potencial de contato se dá com maiores oscilações e permanece além dos 3.000 s, mas ao final do ensaio, sua variação torna-se constante. Os instantes com instabilidade da variação da média do potencial indicam que os mecanismos existentes no contato permaneceram instáveis quanto às características elétricas do contato.

A variação da média (ΔMd) do desgaste tendeu a constante, em tempos menores do que para o coeficiente de atrito e para o potencial de contato, o que permite concluir que, se o coeficiente de atrito não é constante ao mesmo tempo

que o desgaste, os mecanismos de desgaste levaram a uma mesma taxa de desgaste, mas com diferentes valores de coeficiente de atrito.

Na Figura 5.5 mostra-se a variação dos desvios-padrões (Δ STD) do coeficiente de atrito. Como se pode observar, estas variações passam a ser constantes após um determinado ponto.

Com ambos os resultados (Figura 5.4 e 5.5), pode-se concluir que o processo de desgaste tende a estabilizar a partir dos 3.000 s, já que tanto a variação das médias como dos desvios-padrões tenderam a ser constante, podendo-se, portanto, concluir que o mecanismo de desgaste permaneceu constante a partir desse instante.

Figura 5.5: Variação do desvio-padrão (Δ STD) dos parâmetros tribológicos para cada tipo de ensaio. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

5.2.3 Perda de massa

A massa das amostras foi medida antes e depois dos ensaios, com o objetivo de obter o desgaste do pino e do disco. As Tabelas 5.1 à 5.3 apresentam as medições da massa.

Tabela 5.1: Medições da variação da massa, ensaios de 20-120 N.

Pino (g)		Disco (g)	
Antes	Depois	Antes	Depois
0,3305	0,3125	48,2621	48,2157
0,3305	0,3127	48,2622	48,2158
0,3304	0,3126	48,2623	48,2159
$\Delta m = 0.0178 \pm 0,0003$		$\Delta m = 0.0464 \pm 0,0002$	

Tabela 5.2: Medições da variação da massa, ensaios de 20-80 N.

Pino (g)		Disco (g)	
Antes	Depois	Antes	Depois
0,3342	0,3259	47,2997	47,2086
0,3343	0,3259	47,2990	47,2088
0,3343	0,3259	47,2922	47,2089
$\Delta m = 0.0083 \pm 0,0005$		$\Delta m = 0.0882 \pm 0,0004$	

Tabela 5.3: Medições da variação da massa, ensaios de 20-40 N.

Pino (g)		Disco (g)	
Antes	Depois	Antes	Depois
0,3315	0,3237	46,9851	46,8963
0,3316	0,3240	46,9852	46,8963
0,3316	0,3240	46,9853	46,8965
$\Delta m = 0,0076 \pm 0,00005$		$\Delta m = 0,0888 \pm 0,0004$	

A fração do desgaste representa a contribuição do pino e do disco na perda de massa total. A Tabela 5.4 mostra as frações de massa perdida do pino e do disco.

Tabela 5.4: Frações de perda de massa do pino e do disco.

Carga Final (N)	Δm Pino (g)	Δm Disco (g)	Δm total (g)	% Δm Pino	% Δm Disco
40	0,0076	0,0888	0,0964	8%	92%
80	0,0083	0,0882	0,0965	9%	91%
120	0,0178	0,0464	0,0642	28%	72%

A Figuras 5.6 e a 5.7 apresentam as frações da perda de massa assim como da fração de desgaste do pino e do disco.

Observa-se que a perda de massa do disco diminui com o aumento da carga, enquanto que no pino observa-se aumento do desgaste à medida que a carga aumenta, embora o desgaste do disco apresente valores relativamente maiores.

Figura 5.6: Fração da perda de massa por desgaste do disco e variação da massa total do disco em função da carga atingida nos ensaios.

Figura 5.7: Fração da perda de massa por desgaste do pino e variação da massa total do pino em função da carga atingida nos ensaios.

5.2.4 Taxa de desgaste em função da carga normal

A taxa de desgaste foi calculada considerando a área de contato nominal do disco e do pino multiplicada pela profundidade de desgaste e dividida pela distância percorrida, assim as dimensões deste parâmetro ser de (m^3/m). Foi elaborado um

programa para obter estes resultado, que está apresentado no Anexo III. A expressão da taxa de desgaste do pino ou do disco é dada por:

$$T_{\text{desg}} = C \frac{P_d A_n}{D_p} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde:

T_{desg} : Taxa de desgaste calculada do pino ou do disco (m^3/m).

P_d : Profundidade de desgaste total (= desgaste (μm)).

A_n : Área nominal de contato (m^2).

D_p : Distância percorrida (m).

C : Fração de contribuição na profundidade de desgaste do pino ou do disco.

Para a profundidade de desgaste total, utilizou-se os dados de desgaste obtidos do equipamento a partir do instante em que a variação da média (ΔM_d) do coeficiente de atrito passa a ser constante. Admitiu-se que o desgaste correspondente a essa faixa não está influenciado pelo desgaste da etapa de assentamento das superfícies. Procurou-se descartar a faixa inicial pois, como discutido anteriormente, os mecanismos de desgaste ainda são variáveis. Do total de dados de desgaste obtidos, em cada ensaio na faixa relativa à região com variação constante do coeficiente de atrito, foram tomados valores médios, onde cada valor representa a média de 15 dados. A Figura 5. 8 mostra a região tomada para o cálculo dos valores médios do desgaste.

Figura 5. 8: Localização dos dados tomados para o cálculo dos valores médios do desgaste desconsiderando os dados provenientes da etapa de assentamento.

Para se determinar a contribuição na profundidade do desgaste correspondente ao desgaste do pino e do disco, fez-se uma correlação com a fração de perda de massa respectiva do pino e do disco, admitindo-se que a fração do desgaste linear é proporcional à fração do desgaste em massa.

Cabe ressaltar que na Eq. 5.1 foi assumida a área nominal. A área real tornaria o resultado mais preciso. Um outro aspecto é a introdução de erros devido à desconsideração da dilatação térmica dos corpos no valor do desgaste linear das amostras medido pelo equipamento. Assim, os resultados calculados devem apresentar valores maiores que os reais. A área real e a dilatação térmica aumentam com a carga, influenciando diretamente estes parâmetros, aumentando os pontos de contato e aumentando também a temperatura no contato.

Na Figura 5.9 apresenta-se a dependência do desgaste do disco em função da carga. A taxa de desgaste para o ensaio que atinge os 40 N é maior do que as taxas de desgaste para 80 e 120 N, assim o mecanismo de desgaste que prevalece é diferente do que acontece para os ensaios de 80 e 120 N.

Figura 5. 9: Representação dos resultados da taxa de desgaste do disco.
Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

A Figura 5.10 apresenta a dependência do desgaste do pino em função da carga. A taxa de desgaste para o ensaio que atinge os 120 N é maior do que a taxa de desgaste para 80 e 40 N, assim, o mecanismo de desgaste que prevalece para os ensaios deve ser mais generalizado para a carga de 120 N. Este resultado avalia o resultado previsto pelo modelo na Figura 3.6.

Figura 5. 10: Representação dos resultados da taxa de desgaste do pino.
Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

5.3 Mapa dos mecanismos de desgaste

Com os resultados da variação do desvio-padrão (Δ STD) do coeficiente de atrito e do desgaste linear total, construiu-se a Figura 5.11, tomando em consideração as variações dos desvios-padrões do desgaste de todo o ensaio, inclusive com a etapa de assentamento (“running-in”).

Esta Figura também mostra as diferentes regiões de regimes e mecanismos de desgaste.

Cabe ressaltar que, para entender os resultados deste tipo de gráfico bidimensional, os parâmetros que afetam o coeficiente de atrito, como a temperatura de contato é também, afetada pela velocidade, pela carga aplicada e pelo meio.

Os valores das variações dos desvios Δ STD do coeficiente de atrito correspondentes às taxas de desgaste maiores são pontos correspondentes à

etapa de “running-in” e corresponderam a um mecanismo de desgaste severo. Já os pontos com menores valores de variação do desvio do coeficiente de atrito e do desgaste corresponderam ao mecanismo de desgaste oxidativo.

O mecanismo de desgaste adesivo não foi evidenciado nos ensaios mas pode ser deduzido, já que neste mecanismo pode-se ter taxas de desgaste muito altas, mas com valores pequenos dos desvio do coeficiente de atrito; por exemplo, em materiais em que ocorre a fusão no contato, o coeficiente de atrito diminui por causa da ocorrência da fase fluida de material, mas os valores de desgaste são elevados por causa da adesão de um material no outro. A Figura 5.11 contém 240 pontos e cada ponto é a média de 15 medições.

Figura 5. 11: Mapa de desgaste correlacionando os valores das variações dos desvios-padrões (Δ STD) do coeficiente de atrito e do desgaste linear (posicionamento do pino no disco). Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N

Os limites das regiões foram estabelecidos a partir de uma regressão linear dos pontos característicos do runnin-in para os ensaios de 80 N ($\Delta STD(W) = 825 \Delta STD(\mu) + 1.5$) e de 40 N ($\Delta STD(W) = 225 \Delta STD(\mu) + 0.5$).

A Figura 5.12 é uma ampliação da Figura 5.11, para valores onde acontece o desgaste oxidativo e onde se aglomera a maior quantidade de pontos. Esta Figura apresenta as cores dos diferentes ensaios representados pela cor azul para os ensaios com carga máxima de 120 N, vermelho para 40 N e verde para 80 N. Notam-se dois tipos de desgaste oxidativo: um que acontece para os ensaios de 40 e 80 N e que pode ser considerado desgaste oxidativo moderado, pois apresentam os menores valores. Outro é o desgaste oxidativo severo, que acontece principalmente para o ensaio que atinge os 120 N.

Figura 5. 12: Ampliação do mapa de desgaste correlacionando os valores das variações dos desvios-padrões (ΔSTD) do coeficiente de atrito e do desgaste. Azul: 20-120 N, Verde: 20-80 N, Vermelho: 20-40 N.

5.4 Caracterização superficial das amostras ensaiadas

O exame das superfícies ensaiadas foi realizado utilizando-se a microscopia óptica e eletrônica de varredura (elétrons secundários), tanto na etapa de “running in” como a etapa onde ocorre o desgaste estável. A Figura 5.13 mostra regiões oxidadas, observando-se camadas de óxido sobre a superfície com um aspecto de lâminas trincadas. Este tipo de camada foi observado para os ensaios onde a carga atinge 40 e 80 N. Já para os ensaios onde a carga atinge 120 N, a camada de óxido tem uma morfologia diferente, com um aspecto mais globular, como apresentada na Figura 5.14. A presença deste tipo de camadas permite diferenciar os tipos de desgaste oxidativo, sendo o moderado o que forma as lâminas trincadas e o severo onde as camadas apresentam forma globular.

Figura 5. 13: Morfologia típica da superfície resultante dos ensaios de 40 e 80 N, camadas de óxido trincadas. MEV

Figura 5. 14: Morfologia da superfície resultante do ensaio de 120 N, camadas quebradas, presença de óxidos globulares. MEV.

Na Figura 5.15 apresenta-se o aspecto observado com microscópio óptico da superfície do disco e pino do ensaio de 120 N, onde nota-se que as camadas de óxidos estão dispersas na superfície de contato. Isso permite constatar que as camadas se formam em regiões localizadas no contato, onde as condições sejam mais favoráveis para a oxidação, ou seja, onde a temperatura de contato, assim como as condições do material, propiciem a nucleação e o crescimento de óxido. A Figura 5.16 mostra o desgaste severo observado nas superfícies na etapa de assentamento.

Figura 5. 15: Morfologia das superfícies resultantes do ensaio de 120 N, presença de óxidos. Microscopia óptica. a) Disco b) Pino.

Figura 5. 16: Morfologia das superfícies do pino e disco na etapa de assentamento, observando-se superfícies riscadas, evidenciando um mecanismo de desgaste severo, com presença de pequenas regiões de óxidos. Microscopia óptica. a) Disco b) Pino.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os valores das espessuras de óxido em cada tipo de ensaio. A espessura foi obtida com o microscópio óptico, através da medida da profundidade de campo, focalizando a superfície do óxido e depois a superfície do metal. No procedimento de medição adotado, vários campos foram analisados ao longo de toda a superfície de contato. Pode-se observar na Tabela 5.5 que as médias das alturas das camadas de óxido tornam-se maiores à medida que a carga aumenta, aumentando também o seu desvio-padrão, confirmando novamente a previsão feita pelo modelo na Figura 3.8.

Tabela 5.5: Espessura dos óxidos formados medida através de microscópio óptico.

Altura dos picos de óxido (μm)										Média (μm)	Desvio-Padrão (μm)
Ensaio de 120 N											
0,5	1,0	3,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	3,0	2,0	1,7	0,8
Ensaio de 80 N											
1,0	0,5	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,5	1,0	2,0	1,3	0,5
Ensaio de 40 N											
1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,2

A Figura 5.17 apresenta o resultado dos EDX, para duas superfícies de pino, uma com a presença de camada de óxido produzida no ensaio na região estável do coeficiente de atrito (Figura 5.17b) e uma outra superfície riscada, resultante da etapa de “running-in” (Figura 5.17a), ambas de ensaios que atingiram os 120 N. Nota-se o pico de oxigênio bem evidenciado no espectro da superfície oxidada, enquanto que na superfície resultante da etapa de “running-in” esse pico era reduzido.

Figura 5. 17: EDX da superfície do pino x após o ensaio de 120 N. a) superfície do running-in b) região oxidada.

5.5 Considerações Gerais

5.5.1 Comparação dos modelos da literatura com o proposto.

As diferenças entre os modelos da literatura e do presente trabalho estão apresentadas na Tabela 5.6 e Tabela 5.7, onde pode-se observar que os da literatura têm seu ponto de partida no modelo de Archard, procurando o valor da

constante K. O modelo proposto parte da teoria de nucleação e crescimento de óxido.

Tabela 5.6: Modelos desenvolvidos para o desgaste oxidativo.

Autor	Modelo	Área real de contato	Variáveis
Archard	$W = KA_r$	$A_r = \frac{Q}{H}$	Carga, dureza
Quinn	$W = KA_r$, onde $K = \frac{2r_a}{\varepsilon_{ox}^2 \rho_{ox}^2 f_{ox}^2 V} \exp\left[-\frac{Q_{ox}}{kT_c}\right]$	$A_r = \frac{Q}{H}$	Carga, velocidade dureza
Hong So	$W = KA_r$, onde $K = \frac{2r_a}{\varepsilon_{ox} \rho_{ox} f_{ox} V} \exp\left[-\frac{Q_{ox}}{kT_c}\right]$	$A_r = \frac{Q}{H}$	Carga, velocidade dureza
Esta Tese	$W = KA_r$, onde $K = \frac{\varepsilon_o}{2r_a} \exp\left[-\frac{(\Delta G_i)_j}{E_c}\right]$	$A_r = \pi \left(\frac{3Q\hat{r}}{4E}\right)^{\frac{2}{3}}$ $\varepsilon_o = 0.47r_a$	Propriedades elásticas, energia de contato do sistema

O modelo proposto evidencia que o desgaste é uma propriedade do sistema, o qual contribui nas características topográficas da superfície que são apresentadas neste pelos raios das asperezas, e com as propriedades mecânicas dos materiais, e à energia no contato.

Tabela 5.7: Diferenças dos critérios teóricos de partida nos modelos de desgaste oxidativo.

Autor	Critério teórico de partida	Diferenças Físicas
Quinn	$(\Delta m)^2 = k_p t$	Uma lei parabólica de oxidação está relacionada com uma reação controlada pela difusão em volume
Hong So	$\Delta m = k_p t$	Uma lei linear de oxidação está relacionada com uma reação controlada pelo intercâmbio de átomo só na interface
Esta tese	$n_n = n_o \exp\left(-\frac{\Delta G}{K_b T}\right)$	Reação de oxidação acontece somente em alguns sítios "favorecidos" ou "privilegiados" do sistema, os quais decrescem gradualmente no transcurso da reação

O modelo consegue prever a dependência linear da taxa de desgaste com a carga, bem como a sua dispersão, devido às condições iniciais do ensaio, que é modelada partindo-se de valores do coeficiente de atrito estático, como apresentado na Figura 5.18. Os ensaios realizados com medições da temperatura

tiveram como finalidade minimizar o erro do cálculo da taxa de desgaste, por efeito da dilatação, para se comparar os resultados experimentais e teóricos.

Na Figura 5.18 apresentam-se as curvas teóricas que mais se aproximam dos valores experimentais a partir de um coeficiente de atrito estático de 0,55, o qual permite concluir que os valores topográficos influenciam os resultados dos ensaios.

Figura 5. 18: Dependência da taxa de desgaste com a carga, com os resultados teórico e prático.

A modelagem feita por elementos finitos, para obter a temperatura no contato permite assegurar que a temperatura, que é a força motriz da oxidação, é a temperatura média no contato e não a temperatura “flash”. A modelagem foi feita assumindo-se processo adiabático, já que o tempo durante o contato entre asperezas é desprezível, onde os fenômenos de conversão, radiação, etc, podem ser desprezados (vide Anexo IV).

O modelo também prevê o aumento da espessura com a carga, o que foi verificado nos ensaios realizados. Na Figura 5.19, a dispersão dos valores da espessura de óxido pode ser atribuída do método de medição, o qual não garante que a espessura do óxido seja a mesma, mas pode se considerar válido para a avaliação já que todas as amostras são medidas usando a mesma técnica, e os desvios-padrões podem ser interpretados como sendo devido ao crescimento das camadas de óxido não uniforme e depende dos sítios onde nucleam e crescem.

Figura 5. 19: Dependência da espessura de óxido com a carga.

No modelo proposto, parte-se do princípio de que os óxidos nucleam em sítios favoráveis, visto que a superfície não é regular, como mostrado na Figura 5.20 e, evidenciado na Figura 5.15, onde o óxido não esteve presente em todas as regiões do pino ou disco.

Figura 5. 20: Topografias de uma superfície real.

O modelo proposto está resumido na Figura 5.21, onde a etapa inicial do processo é a oxidação das superfícies de contato, nos pontos de entre as

asperezas, passando para a formação dos núcleos de óxido nos vales das asperezas e, a partir do aumento da temperatura, permitindo o crescimento do óxido até chegar numa espessura crítica, e a superfície oxidada, exposta a tensões do contato, fica sujeita a trincas e descolamentos das camadas de óxido, formando as partículas de desgaste (“debris”).

Figura 5. 21: Etapas de oxidação previstas pelo modelo proposto. a) contato entre as asperezas, b) formação dos núcleos de óxido nos vales das asperezas, c) crescimento dos patamares de óxidos d) quebras das camadas de óxido (debris).

5.5.2 Limitações do modelo proposto

Um sistema termodinâmico, ainda que esteja em equilíbrio, sofre flutuações de suas propriedades físicas em termos de seus valores médios. Em muitas situações em sistemas em equilíbrio termodinâmico, estas flutuações podem ser desprezadas e o modelo é apresentado desta forma. Além disso, o modelo proposto assume hipóteses, as quais incorporam limitações:

1. No modelo. o óxido presente está em equilíbrio com o substrato, não sendo considerado o processo instável como ocorre na realidade.
2. O modelo considera a distribuição da nucleação homogênea, sendo que, na realidade, a oxidação pode não acontecer simultaneamente em todo o sistema.

3. O processo de crescimento do filme de óxido está relacionado com a espessura atingida pela energia de contato, assim a sua modelação, em função do raio de contato.
4. O modelo não considera a remoção do óxido.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

1. A taxa de desgaste oxidativo apresenta uma dependência linear com a carga normal aplicada, satisfazendo tanto os resultados da literatura, quanto os deste trabalho.
2. A taxa de desgaste apresenta uma dispersão de seus valores que depende das condições iniciais dos ensaios (coeficiente de atrito estático), assim como da velocidade de ensaio.
3. A taxa de desgaste oxidativo depende do sistema $(\Delta G, \varepsilon_o)$ onde ocorre o contato, sendo a temperatura do contato (calor do atrito) a força motriz para as reações de oxidação.

A análise estatística dos resultados de desgaste permite:

1. Estudar de uma forma quantitativa os fenômenos de desgaste permitindo, com poucos ensaios, ter uma avaliação do sistema tribológico.
2. Como o mecanismo de desgaste apresentam uma faixa de valores das médias e dos desvios-padrões do coeficiente de atrito e do “desgaste (μm)”, podem ser quantificados os mecanismos de desgaste.
3. As variações dos momentos estatísticos de segunda ordem, do coeficiente de atrito versus o deslocamento do pino sobre o disco, carregam as informações acerca dos mecanismos de desgaste.

6.1 Trabalhos futuros

1. Estudar a influência da atividade química na taxa de desgaste, segundo os resultados do modelo.
2. Partindo dos resultados estatísticos, desenvolver um método que possibilite a quantificação dos mecanismos de desgaste nas etapas dos ensaios.

ANEXOS

ANEXO I “CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES NOMINALMENTE PLANAS”

(Informações baseadas em J.A. Greenwood e J.B.P. Williamson; Proc. Roy. Soc. Lond., A295, 300, 1966)

I Modelo Matemático

Considera-se o contato entre um plano e uma superfície nominalmente plana que apresenta um grande número de rugosidades com extremidades esféricas. Assume-se que todas as extremidades das rugosidades têm o mesmo raio β , e que suas alturas variam aleatoriamente, de forma que a probabilidade de uma rugosidade particular tenha uma altura entre z e $(z+dz)$, acima de algum plano de referência, será $\phi(z)dz$. A figura 1 mostra o tipo de contato considerado. O comportamento de uma rugosidade individual é conhecido a partir das equações de Hertz. O raio de contato a_1 , a área A_1 e a carga P_1 podem ser expressos em termos da acomodação w , como:

$$a_1 = \beta^{\frac{1}{2}} w^{\frac{1}{2}} \quad , \quad A_1 = \pi \beta w \quad , \quad P_1 = \frac{4}{3} E' \beta^{\frac{1}{2}} w^{\frac{3}{2}}$$

Onde:
$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

Figura I.1: Contato entre superfícies rugosas. A carga é suportada pelas rugosidades cujas alturas são maiores que a separação entre os planos de referência.

Se duas superfícies se aproximam até que seus planos de referência fiquem separados por uma distância d , então haverá contato em qualquer rugosidade com tamanho original maior que d . Assim, a probabilidade de haver contato em qualquer rugosidade de altura z , é:

$$prob(z > d) = \int_d^{\infty} \phi(z) dz$$

E se existem no total N rugosidade, o número esperado de contatos será:

$$n = N \int_d^{\infty} \phi(z) dz$$

Desde que $w = z - d$ e $A_1 = \pi \beta w$, então a área média de contato é dada por:

$$\int_d^{\infty} \pi \beta (z - d) \phi(z) dz$$

E a área total de contato esperada será:

$$A = \pi N \beta \int_d^{\infty} (z - d) \phi(z) dz$$

De forma similar, encontra-se que a carga total esperada é:

$$P = \frac{4}{3} N E \beta^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (z - d)^{\frac{3}{2}} \phi(z) dz$$

E assumindo-se que há contato elétrico em toda a área de contato mecânico, então, uma vez que a condutância em um contato simples é $G_1 = 2a/\rho$, onde ρ é a resistividade, a condutância total esperada será:

$$G = 2N \rho^{-1} \beta^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (z - d)^{\frac{1}{2}} \phi(z) dz$$

Introduzindo variáveis normalizadas e descrevendo alturas em termos do desvio padrão σ da distribuição de altura, temos que:

Número de pontos de contato: $n = \eta A F_0(h)$;

Condutância total: $G = 2\eta A \rho^{-1} \beta^{\frac{1}{2}} F_{\frac{1}{2}}(h)$

Área total de contato: $A = \pi \eta A \beta \sigma F_1(h)$

Carga: $P = \frac{4}{3} \eta A E' \beta^{\frac{1}{2}} \sigma^{\frac{3}{2}} F_{\frac{3}{2}}(h)$

Onde η é a densidade de rugosidades superficiais, $N = \eta A$, sendo A área de contato nominal, h , a separação normalizada, é igual a d/h e

$$F_n(h) = \int_h^{\infty} (s-h)^n \phi^*(s) ds$$

Onde $\phi^*(s)$, a distribuição normalizada de altura.

I.1 Distribuição exponencial de alturas de rugosidades

Quando as alturas seguem uma distribuição exponencial, que é um exemplo conveniente em que as equações acima podem ser tratadas com exatidão, $\phi^*(s) = e^{-s}$ e as funções $F_n(h) = n!e^{-h}$, de forma que:

$$n = \eta A e^{-h}$$

$$G = \pi^{1/2} \eta \rho^{-1} (\beta \sigma)^{1/2} A e^{-h}$$

$$A = \pi (\eta \beta \sigma) A e^{-h}$$

$$P = \pi^{1/2} (\eta \beta \sigma) E' (\sigma/\beta)^{1/2} A e^{-h}$$

Eliminando a separação h , encontra-se que existe uma exata proporcionalidade entre a carga e o número de pontos de contato, a condutância e a área de contato. Assim, o tamanho médio de pontos de contato e a pressão de contato são independentes da carga.

I.2 Distribuição gaussiana de alturas de rugosidade

Os resultados experimentais mostram que, para a muitas superfícies, a distribuição de alturas é gaussiana, com uma boa aproximação. Nesse caso, tem-se que:

$$\phi^*(s) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2}s^2}$$

e, também:

$$F_n(h) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_h^\infty (s-h)^n e^{-\frac{1}{2}s^2} ds$$

As funções $F_{1/2}(h)$ e $F_{3/2}(h)$ não têm sido tabeladas, e somente foram calculadas por integração da equação diferencial satisfeita por $\exp(-\frac{1}{2}h^2)F_n(h)$, isto é: $y''-hy'-(n+1)y(h)=0$, trabalhando-se de modo inverso a partir dos maiores valores de h , que podem ser encontrados a partir de expansões assintóticas.

Figura 1.2: (a) Relação entre separação e carga. A curva mostra o valor da carga para uma dada separação, assumindo uma distribuição gaussiana de alturas de rugosidade. (b) Relação entre área de contato e carga. A curva sólida, para área nominal de 10 cm^2 , e a curva tracejada, para área nominal de 1 cm^2 , mostram que a área real de contato independe da área nominal.

ANEXO II “PROGRAMA PARA CÁLCULO TAXA DE DESGASTE OXIDATIVO”

```
% Variável

%function En_ext=desgaoxidativo;

clear all

%Dados de entrada

N=15; %input('Entre com o valor de pontos =>');

ti=30; %input('Entre com o valor de Temperatura inicia (C)=>');

tf=300; %input('Entre o valor da Temperatura final Lida a (C) To=>');

L=1e-3; %input('Entre a distancia onde se toma a temperatura(mm)=>');

dis=1.8e-6; %input('Distancia entre planos da superfícies(m)=>');

vi=1; %input('Entre com o valor de velocidade inicia (m/s) =>');

vf=4; %input('Entre com o valor de velocidade final (m/s)=>'); %

tr=700; % input('Entre o valor da temperatura de recristlização (C)');

pc=0.4; % input('Entre o valor da parâmetro da fase');

Dc=1.5582; % input('Entre o valor da parâmetro de estabilidade da fase');

E1=210e6; %input('Entre com o valor do Modulo de Young Material 1 (Pa)=>');

E2=210e6; %input('Entre com o valor do Modulo de Young Material 2 (Pa) =>');

v1=0.3; %input('Entre com o valor do coeficiente de poisson 1 =>');

v2=0.3; %input('Entre com o valor do coeficiente de poisson 2 =>');

q1=5; %input('Entre com o valor da carga inicial (N) =>');

q2=120; %input('Entre com o valor da carga final (N) =>');

A_nom=7.06e-6; %input('Área nominal de contato (m^2) =>');

mo1=0.78; %input('Coeficiente de atrito estático 1=>');

mo2=0.55; %input('Coeficiente de atrito estático 2=>');

mo3=0.45; %input('Coeficiente de atrito estático 3=>');
```

```

k=22; %input('condutividade térmica (W/m*K)=>');
ca=460; % input('Capacidade calorifica (J/Kg*K)=>');
den=7833; %input('Densidade do material(kg/m^3)=>');
ac=0.5;% input('Atividade Química do meio (0-1)=>'); J.F Elliot, M. Gleiser
en=dis/2;% Valor da profundidade do desgaste

%Vetores

vi2=linspace(vi,vf,N); % Vetor de velocidade

q=linspace(q1,q2,N); % Vetor da Carga

z=linspace(dis,2*dis,N); %Vetor de alturas de pico

Ti=linspace(ti,tf,N);% Vetor de temperaturas medida

Tres=tr+273.15;%*ones(size(vi2)); % Temperatura Recristalização

x=linspace(0,sqrt(4*A_nom/3.14),N);% Vector do densidade de picos

%Matrizes

[v,C]=meshgrid(vi2,q);% Matriz Velocidade e Carga

[v,Z]=meshgrid(vi2,z);% Matriz Velocidade e altura de aspereza

[v,Ti2]=meshgrid(vi2,Ti);% Matriz Velocidade e altura de aspereza

% Cálculo de parâmetros tribológicos vectoriais

E=(E1*E2)/(E1*(1-v2)+E2*(1-v1));% Modulo de Young Equivalente

perfil=sqrt(abs((z-dis).^3)).*exp(-(z).^2);% Densidade de alturas das
asperezas

asp=trapz(perfil);%alturas das asperezas entre d e 2d

FunZ=dis/asp;% Numero de aspereza com alturas entre d e 2d

perfil2=A_nom^-1.*exp(-(A_nom.*x.^2));% Função da densidade de aspereza

dasp=100*trapz(perfil2);%Densidade de aspereza por milímetro quadrado

n=A_nom.*dasp;% Número de asperezas

r=sqrt(3*q./(4*n*E*FunZ));% raios das aspereza segundo (GW)

A_real=4*pi*(3*q.*(4*E)).^0.6; % Área Real

```



```

r_cont=((3*q.*r)/(4*E)).^0.3; % raio de contato
esp_o=(0.47.*r_cont).*en; % Espessura de influencia
N_cont=(A_nom)./(4*pi*r_cont.^2); % Número de contato
a=k/(den*ca);%Coeficiente de difusividade térmica
Pe=vi2.*r_cont./2*a;

%Calculo de parâmetros tribológicos Matriciais
rt=sqrt(3*C./(4*n*E.*FunZ));% raios das asperezas
r_con=((3*C.*rt)/(4*E)).^0.3; % raio de contato
Pec=v.*r_con/2*a;%Numero de Peclet
A_rea=4*pi*(3*C.*rt/(4*E)).^0.6; % Área Real
esp=(0.47.*r_con).*en; % Espessura de influência
N_con=(A_nom)./(4*pi*r_con.^2);% Numero de contato

%Coeficiente de atrito segundo Lim, Ashby

%Vectorial
m_l_a=mo1.*ones(size(vi2))-0.13.*log10((vi2.*sqrt(4*A_real/3.14))./a);
m1=m_l_a;%mo=0.78

%Matricial (Segundo Lim e Ashby)
m_L_A=mo1.*ones(size(v))-13.*log10((v.*sqrt(4*A_rea/3.14))./a);
m_L_A1=mo2.*ones(size(v))-13.*log10((v.*sqrt(4*A_rea/3.14))./a);
m_L_A2=mo3.*ones(size(v))-13.*log10((v.*sqrt(4*A_rea/3.14))./a)
m2=m_L_A;%mo1=0.78
m22=m_L_A1;%mo2=0.55
m21=m_L_A2;%mo3=0.45

%Calculo da Temperatura de contato segundo Lim, Ashby e Cowan and Winer

%vectorial
un=ones(size(Pe));

alfa=1./(2+L*(3.14*Pe./(4.*r_cont.^2)).^0.5);% coeficiente de partição do calor

```

```
Tf=(Ti+((alfa.*m1.*q.*vi2.*L)./(A_nom*k))+2*273.15.*un)+0.50.*m1.*(q.^0.66).*(a*Pe.
/r_cont).*(E./(r)).^0.3*(1/k).*un; %.*ones(size(vi2)); % Temperatura de contato
```

```
%Matricial
```

```
alfa2=1./(2+L*(3.14*Pec./(4.*r_con.^2)).^0.5);%Coeficiente de partição do calor
```

```
un1=ones(size(v));
```

```
T=(Ti2+((alfa2.*m2.*C.*v.*L)./(A_nom*k))+2*273.15.*un1)+0.50*m2.*(C.^0.66).*(a*P
ec./r_con).*(E./(rt)).^0.3*(1/k).*un1; % Temperatura de contato
```

```
T1=(Ti2+((alfa2.*m21.*C.*v.*L)./(A_nom*k))+2*273.15.*un1)+0.50*m21.*(C.^0.66).*(
a*Pec./r_con).*(E./(rt)).^0.3*(1/k).*un1; % Temperatura de contato
```

```
T2=(Ti2+((alfa2.*m22.*C.*v.*L)./(A_nom*k))+2*273.15.*un1)+0.50*m22.*(C.^0.66).*(
a*Pec./r_con).*(E./(rt)).^0.3*(1/k).*un1; % Temperatura de contato
```

```
%Calculo da energia do contato
```

```
En_ext=8.82*N_cont.*Tf.*(1+log10(ac)); % Energia do Contato vectorial
```

```
En_xt=8.82*N_con.*T.*(1+log10(ac)); %Energia do Contato Matricial
```

```
En_xt1=8.82*N_con.*T1.*(1+log10(ac)); %Energia do Contato Matricial
```

```
En_xt2=8.82*N_con.*T2.*(1+log10(ac)); %Energia do Contato Matricial
```

```
%Energia Gibb
```

```
%vectorial
```

```
%En_ma=8.82*Tf.*ent_a; %Contribuição magnética vectorial
```

```
En_cor1=-194.580.*ones(size(Tf))-59.91.*Tf;%Contribuição corrosão vectorial(Fe2O3)
```

```
En_cor2=-263.430.*ones(size(Tf))-73.46.*Tf;%Contribuição corrosão vectorial(Fe3O4)
```

```
En_cor3=-75.700.*ones(size(Tf))-17.35.*Tf;%Contribuição corrosão(Cr2O3)
```

```
En_cor11=-194.580.*ones(size(Tf))-59.91.*cos(Tf);%Contribuição ciclica(Fe2O3)
```

```
En_cor22=-263.430.*ones(size(Tf))-73.46.*cos(Tf);%Contribuição cíclica(Fe3O4)
```

```
En_cor33=-75.700.*ones(size(Tf))-17.35.*cos(Tf);%Contribuição cíclica(Cr2O3)
```

```
En_int=4.18*(En_cor11);%+En_cor2);%+En_cor3);%+En_ma;%Energia livre de
Gibbs vectorial
```

```

%Matricial

%En_mag=8.82*T.*ent_o; %Contribuição magnética

En_corr=-194.580.*ones(size(T))-59.91.*T;%Contribuição corrosão (Fe2O3)
En_corr1=-194.580.*ones(size(T1))-59.91.*T1;%Contribuição corrosão (Fe2O3)
En_corr12=-194.580.*ones(size(T2))-59.91.*T2;%Contribuição corrosão (Fe2O3)
En_corr2=-263.430.*ones(size(T))-73.46.*T;%Contribuição corrosão (Fe3O4)
En_corr3=-75.700.*ones(size(T))-17.35.*T;%Contribuição corrosão(Cr2O3)
En_corr11=-194.580.*ones(size(T))-59.91.*cos(T);%Contribuição cíclica (Fe2O3)
En_corr22=-263.430.*ones(size(T))-73.46.*cos(T);%Contribuição cíclica(Fe3O4)
En_corr33=-75.700.*ones(size(T))-17.35.*cos(T);%Contribuição cíclica(Cr2O3)
En_nt=4.18*(En_corr11);%+En_corr22;%Energia livre de Gibbs
En_nt2=4.18*(En_corr+En_corr2);%Energia livre de Gibbs
En_nt3=4.18*(En_corr+En_corr2+En_corr3);%Energia livre de Gibbs

%Função Taxa de desgaste

%Vectorial

Tdesg=N_cont.*((esp_o.*A_real)./(2.*r_cont)).*exp(-En_int./En_ext);

%Matricial (Mapas de desgaste)

D=N_con.*((esp.*A_rea)./(2.*r_con)).*exp(-En_corr./En_xt1);
D2=N_con.*((esp.*A_rea)./(2.*r_con)).*exp(-En_corr12./En_xt);
D3=N_con.*((esp.*A_rea)./(2.*r_con)).*exp(-En_corr1./En_xt2);
D1=N_con.*((esp.*A_rea)./(2.*r_con)).*exp(-En_nt2./En_xt);
D22=N_con.*((esp.*A_rea)./(2.*r_con)).*exp(-En_nt3./En_xt);
D33=N_con.*((esp.*A_rea)./(2.*r_con)).*exp(-En_nt./En_xt);

%Gráficos

figure(1)%para publicar

subplot(2,2,1)

plot(C,D)

```

```

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

title('Coeficiente de Atrito Estatico 0.78','FontSize',10,'FontName','Arial')

xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Taxa de Desgaste((m)^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%gtext('Min Velocidade')

%gtext('Max Velocidade')

subplot(2,2,2)

plot(C,D2)

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

title('Coeficiente de Atrito Estatico 0.55 ','FontSize',10,'FontName','Arial')

ylabel('Taxa de Desgaste((m)^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%gtext('Min Velocidade')

%gtext('Max Velocidade')

subplot(2,2,3)

plot(C,D3)

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

title('Coeficiente de Atrito Estático 0.45','FontSize',10,'FontName','Arial')

xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Taxa de Desgaste((m)^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%gtext('Min Velocidade')

%gtext('Max Velocidade')

subplot(2,2,4)

surf(v(:,,:),T(:,,:),C(:,,:),D(:,,:));

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

title('Mapa de Desgaste f=0.78','FontSize',10,'FontName','Arial')

xlabel('Velocidade (m/s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

```

ylabel('Temperatura de Contato (K)','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

view([45 45])

colorbar

%gtext('9,41')

%gtext('9,39')

figure(2)%para publicar

subplot(2,2,1)

surf(v(:,,:),T(:,,:),C(:,,:),D1(:,,:));

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

title('Oxidos Fe2O3, Fe3O4, Cr2O3; f=0.78','FontSize',10,'FontName','Arial')

xlabel('Velocidade (m/s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Temperatura de Contato (K)','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

view([45 45])

colorbar

%gtext('5,6')

%gtext('4,8')

subplot(2,2,2)

surf(v(:,,:),T(:,,:),C(:,,:),D22(:,,:));

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

title('Oxidos Fe2O3, Fe3O4; f=0.78','FontSize',10,'FontName','Arial')

xlabel('Velocidade (m/s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Temperatura de Contato (K)','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

view([45 45])

colorbar

```

```

%gtext('4,0')

%gtext('4,8')

subplot(2,2,3)

surf(v(:,,:),T(:,,:),C(:,,:),D33(:,,:));

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

    title('Oxidos Ciclicos Fe2O3 f=0.78','FontSize',10,'FontName','Arial')

    xlabel('Velocidade (m/s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    ylabel('Temperatura de Contato (K)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    zlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    view([45 45])

    colorbar

    %gtext('1,64')

    %gtext('1.65')

subplot(2,2,4)

    plot(q,Tdesg)

    set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

    title('Oxido Cíclicos Fe2O3 f=0.78','FontSize',10,'FontName','Arial')

    xlabel('Carga (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    ylabel('Taxa de Desgaste((m)^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

ANEXO III “PROGRAMA PARA O CALCULO DA TAXA DE DESGASTE DO ENSAIO PINO DISCO

```
clear all
```

```
% DADOS DE ENTRADA
```

```
D=11880;% input('Tempo total do ensaio (s)=>');
```

```
step=15;% input('Divisões do ensaio =>');
```

```
a_m=0.0005;% input('Menor valor de comparação da media do Atrito>');
```

```
m=7;% input('Fator de ajuste para eliminar running =>');
```

```
v=0.9;% input('Velocidade de ensaio(m/s) =>');
```

```
dp=3e-3;% input('Diâmetro do pino(m) =>');
```

```
dd=13.5e-3;% input('Raio menor da pista no disco(m) =>');
```

```
c1=40;% input('Carga final do primeiro ensaio (N) =>');
```

```
c2=80;% input('Carga final do segundo ensaio (N)=>');
```

```
c3=120;% input('Carga final do Terceiro ensaio (N) =>');
```

```
mpi40=0.3316;% input('Massa inicial do pino do ensaio de 40 N (g) =>');
```

```
mpf40=0.3239;% input('Massa final do pino do ensaio de 40 N (g) =>');
```

```
mpi80=0.3257;% input('Massa inicial do pino do ensaio de 80 N (g) =>');
```

```
mpf80=0.3161;% input('Massa final do pino do ensaio de 80 N (g) =>');
```

```
mpi120=0.3306;% input('Massa inicial do pino do ensaio de 120 N (g) =>');
```

```
mpf120=0.3126;% input('Massa final do pino do ensaio de 120 N (g) =>');
```

```
mdi40=46.9852;% input('Massa inicial do disco do ensaio de 40 N (g) =>');
```

```
mdf40=46.8964;% input('Massa final do disco do ensaio de 40 N (g) =>');
```

```
mdi80=47.8777;% input('Massa inicial do disco do ensaio de 80 N (g) =>');
```

```
mdf80=47.8306;% input('Massa final do disco do ensaio de 80 N (g) =>');
```

```
mdi120=48.2619;% input('Massa inicial do disco do ensaio de 120 N (g) =>');
```

```
mdf120=48.2155;% input('Massa final do disco do ensaio de 120 N (g) =>');
```

```

%Im=0.611;% input('Momento de inércia de massa do disco (gm^2)=>');

Rt=756;%input('Rotação do disco (rpm)=');

wr=2*pi*Rt;% Freqüência

% Calculo da energia cinética

Ei40=(mdi40*v^2/2)+(wr^2*mdi40*(dd)^2)/2;

Ei80=(mdi80*v^2/2)+(wr^2*mdi80*(dd)^2)/2;

Ei120=(mdi120*v^2/2)+(wr^2*mdi120*(dd)^2)/2;

% CARGAR FICHEROS DE DADOS

    load 120393.txt;

    load 40391.txt;

    load 80392.txt;

    %load 10039_2.txt;

es=[c1 c2 c3];

% SINAIS DOS ENSAIOS

%Ensaio 120 N

%sample11=X120393(:,1);

%sample22=X120393(:,2);

sample33=X120393(:,3);

sample44=X120393(:,4);

sample55=X120393(:,5);

sample66=X120393(:,6);

sample77=X120393(:,7);

sample88=X120393(:,8);

Eto120=Ei120.*ones(size(sample55))+sample55.*sample66.*1e-6;

%Ensaio 80 N

%sample118=X80392(:,1);

%sample228=X80392(:,2);

```



```

sample338=X80392(:,3);
sample448=X80392(:,4);
sample558=X80392(:,5);
sample668=X80392(:,6);
sample778=X80392(:,7);
sample888=X80392(:,8);
Eto80=Ei80*ones(size(sample558))+sample558.*sample668.*1e-6;

% Ensaio 40 N
%sample114=X40392(:,1);
%sample224=X40391(:,2);
sample334=X40391(:,3);
sample444=X40391(:,4);
sample554=X40391(:,5);
sample664=X40391(:,6);
sample774=X40391(:,7);
sample884=X40391(:,8);
Eto40=Ei40*ones(size(sample554))+sample554.*sample664.*1e-6;

% NUMEROS DE PONTOS
N1=max(size(sample33));

% PARTE ESTAVEL Ap DOS ENSAIOS
Par=round(N1/step);

% TEMPO E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM
Te=D/(N1-1); %Tempo de amostragem
Fsample=1/Te; %Duração do sinala1 (D=(N-1)*Te)
df=Fsample; % Frequência de amostragem
t1=0:Te:D;% Vetor de tempo
f=0:df:df*(N1-1);% Vetor de Frequência

```

```
%Dist=mean(sample22);
```

```
% CALCULO DA PERCA DE MASSA NOS ENSAIO
```

```
%Pino
```

```
Vmp_40=mpi40-mpf40;
```

```
Vmp_80=mpi40-mpf40;
```

```
Vmp_120=mpi40-mpf40;
```

```
%Disco
```

```
Vmd_40=mdi40-mdf40;
```

```
Vmd_80=mdi80-mdf80;
```

```
Vmd_120=mdi120-mdf120;
```

```
%Vetor perca de massa
```

```
Vmp=[Vmp_40 Vmp_80 Vmp_120];
```

```
Vmd=[Vmd_40 Vmd_80 Vmd_120];
```

```
%Fração de contribuição ao desgaste do pino/ disco
```

```
%Pino
```

```
Fp_40=abs(Vmp_40/(Vmp_40+Vmd_40));
```

```
Fp_80=abs(Vmp_80/(Vmp_80+Vmd_80));
```

```
Fp_120=abs(Vmp_120/(Vmp_120+Vmd_120));
```

```
%Disco
```

```
Fd_40=abs(Vmd_40/(Vmd_40+Vmd_40));
```

```
Fd_80=abs(Vmd_80/(Vmd_80+Vmd_80));
```

```
Fd_120=abs(Vmd_120/(Vmd_120+Vmd_120));
```

```
%Vetor Fração de desgaste
```

```
Fp=[Fp_40 Fp_80 Fp_120];
```

```
Fd=[Fd_40 Fd_80 Fd_120];
```

```
% CALCULO DA MEDIA, STD E RMS TOTAL DO ENSAIO
```

%ATRITO

%MEDIA total

Atro=mean(sample33);

Atr8o=mean(sample338);

Atr4o=mean(sample334);

%STD total

Atros=std(sample33);

Atr8os=std(sample338);

Atr4os=std(sample334);

%RMS total

Atror=rms(sample33);

Atr8or=rms(sample338);

Atr4or=rms(sample334);

%DESGASTE

%MEDIA total

Wearo=mean(sample66);

Wear8o=mean(sample668);

Wear4o=mean(sample664);

%STD total

Wearos=std(sample66);

Wear8os=std(sample668);

Wear4os=std(sample664);

%RMS total

Wearor=rms(sample66);

Wear8or=rms(sample668);

Wear4or=rms(sample664);

%POTENCIAL DE CONTATO

%MEDIA total

Pot_co=mean(sample77);

Pot_calco=mean(sample88);

Pot_cal8o=mean(sample888);

Pot_cal4o=mean(sample884);

%STD total

Pot_calos=std(sample88);

Pot_cal8os=std(sample888);

Pot_cal4os=std(sample884);

%RMS total

Pot_calor=rms(sample88);

Pot_cal8or=rms(sample888);

Pot_cal4or=rms(sample884);

% SINAL CENTRADO

% ATRITO

sample3=sample33-Atro;

sample3a=sample338-Atr8o;

sample3b=sample334-Atr4o;

% POTENCIAL DE CONTATO

sample8=sample88-Pot_calco;

sample8a=sample888-Pot_cal8o;

sample8b=sample884-Pot_cal4o;

%AUTOCORRELAÇÃO DO ENSAIO GERAL

%Atrito

autocorr12=xcorr2(sample3);

autocorr8=xcorr2(sample3a);

autocorr4=xcorr2(sample3b);

```

%Potencial de contato

autocorr12p=xcorr2(sample8);

autocorr8p=xcorr2(sample3a);

autocorr4p=xcorr2(sample8b);


% CICLO DE TRABALHO

Fen=Par-1;

for i=1:Fen

    div(i)=[round(i*step)];

end

for i=1:Fen-1

    %VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

    %VARIAÇÃO DA MEDIA

    %ATRITO

    Atr(i)=[mean(sample33(1:div(i+1)))-mean(sample33(1:div(i)))];

    Atr8(i)=[mean(sample338(1:div(i+1)))-mean(sample338(1:div(i)))];

    Atr4(i)=[mean(sample334(1:div(i+1)))-mean(sample334(1:div(i)))];

    %DESGASTE

    Wear(i)=[mean(sample66(1:div(i+1)))-mean(sample66(1:div(i)))];

    Wear8(i)=[mean(sample668(1:div(i+1)))-mean(sample668(1:div(i)))];

    Wear4(i)=[mean(sample664(1:div(i+1)))-mean(sample664(1:div(i)))];

    %POTENCIAL DE CONTATO

    Pot_c(i)=[mean(sample77(1:div(i+1)))-mean(sample77(1:div(i)))];

    Pot_cal(i)=[mean(sample88(1:div(i+1)))-mean(sample88(1:div(i)))];

    Pot_cal8(i)=[mean(sample888(1:div(i+1)))-mean(sample888(1:div(i)))];

    Pot_cal4(i)=[mean(sample884(1:div(i+1)))-mean(sample884(1:div(i)))];

    %VARIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO

```

%ATRITO

Atrs(i)=[std(sample33(1:div(i+1)))-std(sample33(1:div(i)))];

Atr8s(i)=[std(sample338(1:div(i+1)))-std(sample338(1:div(i)))];

Atr4s(i)=[std(sample334(1:div(i+1)))-std(sample334(1:div(i)))];

%DESGASTE

Wears(i)=[std(sample66(1:div(i+1)))-std(sample66(1:div(i)))];

Wear8s(i)=[std(sample668(1:div(i+1)))-std(sample668(1:div(i)))];

Wear4s(i)=[std(sample664(1:div(i+1)))-std(sample664(1:div(i)))];

%POTENCIAL DE CONTATO

Pot_cals(i)=[std(sample88(1:div(i+1)))-std(sample88(1:div(i)))];

Pot_cal8s(i)=[std(sample888(1:div(i+1)))-std(sample888(1:div(i)))];

Pot_cal4s(i)=[std(sample884(1:div(i+1)))-std(sample884(1:div(i)))];

% VARIAÇÃO DO RMS

%ATRITO

Atrr(i)=[rms(sample33(1:div(i+1)))-rms(sample33(1:div(i)))];

Atr8r(i)=[rms(sample338(1:div(i+1)))-rms(sample338(1:div(i)))];

Atr4r(i)=[rms(sample334(1:div(i+1)))-rms(sample334(1:div(i)))];

%DESGASTE

Wearr(i)=[rms(sample66(1:div(i+1)))-rms(sample66(1:div(i)))];

Wear8r(i)=[rms(sample668(1:div(i+1)))-rms(sample668(1:div(i)))];

Wear4r(i)=[rms(sample664(1:div(i+1)))-rms(sample664(1:div(i)))];

%POTENCIAL DE CONTATO

Pot_calr(i)=[rms(sample88(1:div(i+1)))-rms(sample88(1:div(i)))];

Pot_cal8r(i)=[rms(sample888(1:div(i+1)))-rms(sample888(1:div(i)))];

Pot_cal4r(i)=[rms(sample884(1:div(i+1)))-rms(sample884(1:div(i)))];

% MEDIA DA FORÇA DE ATRITO

F_AT(i)=[mean(sample44(1:div(i+1)))-mean(sample44(1:div(i)))];

%VARIAÇÃO REAL DOS PARÂMETROS

% VARIAÇÃO DA MEDIA

%ATRITO

Atrm(i)=[mean(sample33(div(i):div(i+1)))];

Atr8m(i)=[mean(sample338(div(i):div(i+1)))];

Atr4m(i)=[mean(sample334(div(i):div(i+1)))];

%DESGASTE

Weamr(i)=[mean(sample66(div(i):div(i+1)))];

Weamr8(i)=[mean(sample668(div(i):div(i+1)))];

Weamr4(i)=[mean(sample664(div(i):div(i+1)))];

%POTENCIAL DE CONTATO

Pot_cm(i)=[mean(sample77(div(i):div(i+1)))];

Pot_calm(i)=[mean(sample88(div(i):div(i+1)))];

Pot_calm8(i)=[mean(sample888(div(i):div(i+1)))];

Pot_calm4(i)=[mean(sample884(div(i):div(i+1)))];

% VARIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO

%ATRITO

Atrms(i)=[std(sample33(div(i):div(i+1)))];

Atr8ms(i)=[std(sample338(div(i):div(i+1)))];

Atr4ms(i)=[std(sample334(div(i):div(i+1)))];

%DESGASTE

Wearms(i)=[std(sample66(div(i):div(i+1)))];

Wear8ms(i)=[std(sample668(div(i):div(i+1)))];

Wear4ms(i)=[std(sample664(div(i):div(i+1)))];

%POTENCIAL DE CONTATO

Pot_calms(i)=[std(sample88(div(i):div(i+1)))];

Pot_cal8ms(i)=[std(sample888(div(i):div(i+1)))];

```

Pot_cal4ms(i)=[std(sample884(div(i):div(i+1))))];

%MEDIA DA FORÇA DE ATRITO
F_ATm(i)=[mean(sample44(div(i):div(i+1))))];

        end

        % PROCURA DA PARTE ESTÁVEL

%Atrito

ai=(min(find(Atrs<=a_m & Atrs>=-a_m)))*step+m*step;
a8i=(min(find(Atr8s<=a_m & Atr8s>=-a_m)))*step+m*step;
a4i=(min(find(Atr4s<=a_m & Atr4s>=-a_m)))*step+m*step;

        %TEMPO CALCULADO

tc=[Te*div];
tc2=tc(2:Fen);

        % CALCULO DA MEDIA DOS PARAMETROS NA REGIÃO
ESTAVEL

    % Atrito

    Atr_mec=mean(sample33(ai:end));
    Atr8_mec=mean(sample338(a8i:end));
    Atr4_mec=mean(sample334(a4i:end));

    %Desgaste

    Wear_mec=mean(sample66(ai:end));
    Wear8_mec=mean(sample668(a8i:end));
    Wear4_mec=mean(sample664(a4i:end));

    %Potencial de contato

    Pot_cal_mec=mean(sample88(ai:end));
    Pot_cal8_mec=mean(sample888(a8i:end));
    Pot_cal4_mec=mean(sample884(a4i:end));

        % MATRIZES DA MEDIA , STD E RMS TOTAL NOS ENSAIOS

```


%Atrito

ato=[Atr4o Atr8o Atror];

atstdo=[Atr4os Atr8os Atros];

atrmso=[Atr4or Atr8or Atror];

%Desgaste

wmo=[Wear4o Wear8o Wearor];

wstdo=[Wear4os Wear8os Wearos];

wrmso=[Wear4or Wear8or Wearor];

% Potencial de contato

ptmo=[Pot_cal4o Pot_cal8o Pot_calor];

ptstdo=[Pot_cal4os Pot_cal8os Pot_calos];

ptrmso=[Pot_cal4or Pot_cal8or Pot_calor];

% MATRIZES DA MEDIA DOS PARAMETROS NA REGIÃO

ESTAVEL

%Atrito

at_mec=[Atr4_mec Atr8_mec Atr_mec];

%Desgaste

wm_mec=[Wear4_mec Wear8_mec Wear_mec];

%Potencial de contato

ptm_mec=[Pot_cal4_mec Pot_cal8_mec Pot_cal_mec];

% MATRIZES DA VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARAMETROS

DURANTE OS ENSAIOS

%Atrito

at=[Atr4 ; Atr8 ; Atr];

atstd=[Atr4s ; Atr8s ; Atrs];

atrms=[Atr4r ; Atr8r ; Atrr];

% Desgaste

```

wm=[Wear4 ; Wear8 ; Wear];

wstd=[Wear4s ; Wear8s ; Wears];

wrms=[Wear4r ; Wear8r ; Wearr];

% Potencial de contato

ptm=[Pot_cal4 ; Pot_cal8 ; Pot_cal];

ptstd=[Pot_cal4s ; Pot_cal8s ; Pot_cals];

ptrms=[Pot_cal4r ; Pot_cal8r ; Pot_calr];

        % MATRIZES DA VARIAÇÃO DOS PARAMETROS DURANTE OS
ENSAIOS

%Atrito

atm=[Atr4m ; Atr8m ; Atrm];

atmstd=[Atr4ms ; Atr8ms ; Atrms];

%Desgaste

wmm=[Weamr4 ; Weamr8 ; Weamr];

wmstd=[Wear4ms ; Wear8ms ; Wearms];

% Potencial de contato

ptmm=[Pot_calm4 ; Pot_calm8 ; Pot_calm];

ptmstd=[Pot_cal4ms ; Pot_cal8ms ; Pot_calms];

        % GRÁFICOS

        figure(1);

        subplot(2,2,1)

        plot(t1,sample33,t1,sample338,t1,sample334),grid

        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

        %title('Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

        xlabel('Tempo (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

        ylabel('Coeficiente de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

        %axis([0 10880 0 1])

```

```

subplot(2,2,2)

plot(t1,sample44,t1,sample448,t1,sample444),grid

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Força de Atrito (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([0 10880 0 40 ])

subplot(2,2,3)

plot(t1,sample66,t1,sample668,t1,sample664),grid

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo (t)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([0 10880 0 2200 ])

subplot(2,2,4)

plot(t1,sample88,t1,sample888,t1,sample884),grid

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo (t)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Potencial de Contato (mV)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([0 10880 0 30])

figure(2)

subplot(2,1,1)

plot(t1',autocorr12(N1:end),t1',autocorr8(N1:end),t1',autocorr4(N1:end))

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

%title('Auto correlação do Atrito do ensaio
completo','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

```

xlabel('Tempo','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Auto correlação do C. Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(2,1,2)

plot(t1',autocorr12p(N1:end),t1',autocorr8p(N1:end),t1',autocorr4p(N1:end))

set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')

%title('Auto correlação do Atrito do ensaio
completo','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Auto correlação do P. Contato (mV)^2','FontSize',10,'FontName','Arial');

figure(3)

subplot(3,1,1)

plot(tc2,atm(3,:)', tc2,atm(2,:)', tc2,atm(1,:')),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIAÇÃO DA MEDIA','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Tempo de ensaio (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('C.Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(atm(3,:))) max(abs(atm(1,:)))])

subplot(3,1,2)

plot(tc2,ptmm(3,:)',tc2,ptmm(2,:)',tc2,ptmm(1,:')),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Ensaio','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('P.Contato','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(ptmm(1,:))) max(abs(ptmm(3,:)))])

subplot(3,1,3)

plot(tc2,wmm(3,:)',tc2,wmm(2,:)',tc2,wmm(1,:')),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

```

```

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo de ensaio (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(wmm(3,:))) max(abs(wmm(1,:)))])

figure(4)

subplot(3,1,1)

plot(tc2,at(3,:), tc2,at(2,:), tc2,at(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MEDIA','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Tempo de ensaio (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do C.Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(at(3,:))) max(abs(at(1,:)))])

subplot(3,1,2)

plot(tc2,ptm(3,:),tc2,ptm(2,:),tc2,ptm(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Ensaio','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do P.Contato','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(ptm(1,:))) max(abs(ptm(3,:)))])

subplot(3,1,3)

plot(tc2,wm(3,:),tc2,wm(2,:),tc2,wm(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo de ensaio (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do Desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(wm(3,:))) max(abs(wm(1,:)))])

figure(5)

```

```

subplot(3,1,1)

plot(tc2,atstd(3,:),tc2,atstd(2,:),tc2,atstd(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO DESVIO
PADRÃO','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo de ensaio (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('STD do C.Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(atstd(3,:))) max(abs(atstd(1,:)))])

subplot(3,1,2)

plot(tc2,ptstd(3,:),tc2,ptstd(2,:),tc2,ptstd(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Ensaio','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('STD do P.Contato','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(ptstd(1,:))) max(abs(ptstd(3,:)))])

subplot(3,1,3)

plot(tc2,wstd(3,:),tc2,wstd(2,:),tc2,wstd(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo de ensaio (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('STD do Desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(wstd(3,:))) max(abs(wstd(1,:)))])

figure(6)

subplot(3,1,1)

plot(tc2,atrms(3,:),tc2,atrms(2,:),tc2,atrms(1,:)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO RMS','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

```

xlabel('Tempo de ensaio (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');
ylabel('RMS do C.Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');
%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(atrms(3,:))) max(abs(atrms(1,:)))])
subplot(3,1,2)
plot(tc2,ptrms(3,:)',tc2,ptrms(2,:)',tc2,ptrms(1,:)'),grid
set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')
%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');
xlabel('Ensaaios','FontSize',10,'FontName','Arial');
ylabel('RMS do P.Contato','FontSize',10,'FontName','Arial');
%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(ptrms(1,:))) max(abs(ptrms(3,:)))])
subplot(3,1,3)
plot(tc2,wrms(3,:)',tc2,wrms(2,:)',tc2,wrms(1,:)'),grid
set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')
%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');
xlabel('Tempo de ensaio (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');
ylabel('RMS do Desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');
%axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(wrms(3,:))) max(abs(wrms(1,:)))])
figure(7)
subplot(3,1,1)
bar(es,abs(ato)),grid
set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')
title('MEDIAS      DOS      PARÂMETROS      NO      ENSAIO
TOTAL','FontSize',10,'FontName','Arial');
xlabel('Carga final dos ensaios (N) ','FontSize',10,'FontName','Arial');
ylabel('Media do C.Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');
%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(abs(ato)) max(abs(ato))])
subplot(3,1,2)

```

```

bar(es,abs(ptmo)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Ensaios','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do P.Contato','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(abs(ptmo)) max(abs(ptmo))])

subplot(3,1,3)

bar(es,abs(wmo)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga final dos ensaios (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do Desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(abs(wmo)) max(abs(wmo))])

figure(8)

subplot(3,1,1)

bar(es,abs(at_mec)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('MEDIAS      DOS      PARÂMETROS      NA      REGIÃO
ESTÁVEL','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Carga final dos ensaios (N) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do C.Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(abs(at_mec)) max(abs(at_mec))])

subplot(3,1,2)

bar(es,abs(ptm_mec)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Ensaios','FontSize',10,'FontName','Arial');

```



```

ylabel('Media do P.Contato','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(abs(ptm_mec)) max(abs(ptm_mec))])

subplot(3,1,3)

bar(es,abs(wm_mec)),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga final dos ensaios (N)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Media do Desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(abs(wm_mec)) max(abs(wm_mec))])

figure(9)

subplot(3,1,1)

plot(tc2,abs(Wear),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIAÇÃO DO DESGASTE','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo do ensaio de 120 N (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Variação do desgaste (10^-6 m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(tc2) max(tc2) min(abs(Wear)) max(abs(Wear))])

subplot(3,1,2)

plot(tc2, abs(Wear8),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Variação do desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo do ensaio de 80 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Variação do desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(tc2) max(tc2) min(abs(Wear8)) max(abs(Wear8))])

subplot(3,1,3)

plot(tc2, abs(Wear4),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

```

```

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Tempo do ensaio de 40 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Variação do desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(tc2) max(tc2) min(abs(Wear4)) max(abs(Wear4))])

figure(10)

subplot(3,1,1)

plot(abs(Atrm),abs(Wear),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('MEDIA DO C. DE ATRITO CONTRA MEDIA DO
DESGASTE','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Media do atrito do ensaio de 120 N (s)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atrm)) max(abs(Atrm)) min(abs(Wear)) max(abs(Wear))])

subplot(3,1,2)

plot(abs(Atr8m), abs(Wear8),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Variação do desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Media do atrito do ensaio de 80 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atr8m)) max(abs(Atr8m)) min(abs(Wear8)) max(abs(Wear8))])

subplot(3,1,3)

plot(abs(Atr4m),abs(Wear4),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Media do atrito do ensaio de 40 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

```

%axis([min(abs(Atr4m)) max(abs(Atr4m)) min(abs(Wear4)) max(abs(Wear4))])

figure(11)

subplot(3,1,1)

plot(abs(Atrs),abs(Wears),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIAÇÃO DOS DESVIO PADRÕES DO C. DE ATRITO E O
DESGASTE','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('C, de atrito do ensaio de 120 N (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atrm)) max(abs(Atrm)) min(abs(Wear)) max(abs(Wear))])

subplot(3,1,2)

plot(abs(Atr8s), abs(Wear8s),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Variação do desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('C. de atrito do ensaio de 80 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atr8m)) max(abs(Atr8m)) min(abs(Wear8)) max(abs(Wear8))])

subplot(3,1,3)

plot(abs(Atr4s),abs(Wear4s),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('C de atrito do ensaio de 40 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atr4m)) max(abs(Atr4m)) min(abs(Wear4)) max(abs(Wear4))])

figure(12)

subplot(3,1,1)

```

```

plot(abs(Atrs),abs(Wear),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('VARIACÃO DO DESVIO DO C. DE ATRITO E MEDIA DO
DESGASTE','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('C, de atrito do ensaio de 120 N (s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atrm)) max(abs(Atrm)) min(abs(Wear)) max(abs(Wear))])

subplot(3,1,2)

plot(abs(Atr8s), abs(Wear8),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Variação do desgaste','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('C. de atrito do ensaio de 80 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atr8m)) max(abs(Atr8m)) min(abs(Wear8)) max(abs(Wear8))])

subplot(3,1,3)

plot(abs(Atr4s),abs(Wear4),'r+'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('Atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('C de atrito do ensaio de 40 N (s)','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atr4m)) max(abs(Atr4m)) min(abs(Wear4)) max(abs(Wear4))])

figure(13)

plot(abs(Atr4s),abs(Wear4s),'ro',abs(Atr8s),abs(Wear8s),'g*',abs(Atrs),abs(We
ars),'bs'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('MAPA DE DESGASTE','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Desvios Padrões do C. de atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

```

ylabel('Desgaste (10^-6 m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(Atrm)) max(abs(Atrm)) min(abs(Wear)) max(abs(Wear))])

figure(14)

plot(abs(Atr4s),abs(Wear4s),'ro',abs(Atr8s),abs(Wear8s),'g*',abs(Atrs),abs(Wear8s),'bs'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('ZOOM DO MAPA DE DESGASTE','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Desvios Padrões do C. de atrito','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgaste (10^-6 m) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

axis([0 0.001 0 1.5]);

graf1=[abs(Wears') abs(Atrs') abs(Wear8s') abs(Atr8s') abs(Wear4s')
abs(Atr4s')];

graf2=[abs(Wear') abs(Atrs') abs(Wear8') abs(Atr8s') abs(Wear4') abs(Atr4s')];

graf3=[abs(Wear') abs(Atrm') abs(Wear8') abs(Atr8m') abs(Wear4')
abs(Atr4m')];

dlmwrite('ats_d_S1.txt',graf1,'\t');

dlmwrite('ats_d_M1.txt',graf2,'\t');

dlmwrite('atm_d_M1.txt',graf3,'\t');

%CALCULO DO DESGASTE TOTAL

areT=abs(trapz(sample66));

areT8=abs(trapz(sample668));

areT4=abs(trapz(sample664));

%CALCULO DO DESGASTE OXIDATIVO OU MODERADO

%Sinal do Desgaste oxidativo

are=(sample66(ai:end)-min(sample66(ai:end))*ones(size(sample66(ai:end))));

are8=(sample668(a8i:end)-
min(sample668(a8i:end))*ones(size(sample668(a8i:end))));

```

```

are4=(sample664(a4i:end)-
min(sample664(a4i:end))*ones(size(sample664(a4i:end))));

% Tempo de desgaste oxidativo
tox=t1(ai:end)-min(t1(ai:end))*ones(size(t1(ai:end)));
t8ox=t1(a8i:end)-min(t1(a8i:end))*ones(size(t1(a8i:end)));
t4ox=t1(a4i:end)-min(t1(a4i:end))*ones(size(t1(a4i:end)));

% Cargas do desgaste oxidativo
Cox=sample55(ai:end);
C8ox=sample558(a8i:end);
C4ox=sample554(a4i:end);

% Energia de contato
E120ox=Eto120(ai:end);
E80ox=Eto80(a8i:end);
E40ox=Eto40(a4i:end);


% NUMEROS DE PONTOS DO SINAL ESTAVEL

N120=max(size(Cox));
N80=max(size(C8ox));
N40=max(size(C4ox));
N2=min([N120 N80 N40]);

% PARTE ESTAVEL Ap DOS ENSAIOS
%Pare=round((N2)/step);
Pare1=round((N120)/step);
Pare2=round((N80)/step);

```

```

Pare3=round((N40)/step);

% CICLO DE CALCULO DO DESGASTE

Fn=Pare1-1;

for k=1:Fn

    dv(k)=[round(k*step)];

end

for k=1:Fn-1

% DESGASTE DO PINO

tc1=[Te*dv];

tox1=tc1(1:k);

Wearoxp(k)=Fp_120*(((abs(mean(trapz(are(dv(k):dv(k+1))))))*pi*dp^2)/(max(to
x1)*4*v));

% DESGASTE DO DISCO

Wearoxd(k)=Fd_120*(((abs(mean(trapz(are(dv(k):dv(k+1))))))*pi*(dp^2+2*dp*d
d))/(max(tox1)*2*v));

%Carga

Cmox(k)=[mean(Cox(dv(k):dv(k+1)))];

% Energia

E120mox(k)=[mean(E120ox(dv(k):dv(k+1)))];

end

Fn=Pare2-1;

for k=1:Fn

    dv(k)=[round(k*step)];

end

for k=1:Fn-1

% DESGASTE DO PINO

tc2=[Te*dv];

```

```

tox2=tc2(1:k);

Wear8oxp(k)=Fp_80*(((abs(mean(trapz(are8(dv(k):dv(k+1))))))*pi*dp^2)/(max(t
ox2)*4*v));

% DESGASTE DO DISCO

Wear8oxd(k)=Fd_80*(((abs(mean(trapz(are8(dv(k):dv(k+1))))))*pi*(dp^2+2*dp*
dd))/(max(tox2)*2*v));

%Carga

Cm8ox(k)=[mean(C8ox(dv(k):dv(k+1)))];

% Energia

E80mox(k)=[mean(E80ox(dv(k):dv(k+1)))];

end

Fn=Pare3-1;

for k=1:Fn

    dv(k)=[round(k*step)];

end

for k=1:Fn-1

% DESGASTE DO PINO

tc3=[Te*dv];

tox3=tc3(1:k);

Wear4oxp(k)=Fp_40*(((abs(mean(trapz(are4(dv(k):dv(k+1))))))*pi*dp^2)/(max(t
ox3)*4*v));

% DESGASTE DO DISCO

Wear4oxd(k)=Fd_40*(((abs(mean(trapz(are4(dv(k):dv(k+1))))))*pi*(dp^2+2*dp*
dd))/(max(tox3)*2*v));

%Carga

Cm4ox(k)=[mean(C4ox(dv(k):dv(k+1)))];

% Energia

```



```

E40mox(k)=[mean(E40ox(dv(k):dv(k+1)))];

end

%TEMPO DESGASTE

    figure(15)

    subplot(1,2,1)

    plot(Cm4ox,Wear4oxp,'ro',Cm8ox,Wear8oxp,'g*',Cmox,Wearoxp,'bs'),grid

    set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

    title('DESGASTE NO PINO (ESTAVEL)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    %xlabel('Carga(N) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

    ylabel('Desgate (m^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    %axis([min(abs(tc2)) max(abs(tc2)) min(abs(atstd(3,:))) max(abs(atstd(1,:)))])

    subplot(1,2,2)

    plot(tox3,Wear4oxp,'ro',tox2,Wear8oxp,'g*',tox1,Wearoxp,'bs'),grid

    set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

    %title('VARIAÇÃO DO DESGASTE OXIDATIVO COM RESPEITO DO
TEMPO NO PINO',10,'FontName','Arial');

    %xlabel('Tempo(s) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

    ylabel('Desgate (m^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    axis([2000 10000 0 0.5e-6])

    figure(16)

    subplot(1,2,1)

    plot(Cm4ox,Wear4oxd,'ro',Cm8ox,Wear8oxd,'g*',Cmox,Wearoxd,'bs'),grid

    set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

    title('DESGASTE NO DISCO (ESTAVEL)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    %xlabel('Carga(N) ','FontSize',10,'FontName','Arial');

    ylabel('Desgate (m^3/m)','FontSize',10,'FontName','Arial');

    %axis([ max(abs(tc2)) min(abs(atstd(3,:))) max(abs(atstd(1,:)))])

```

```

subplot(1,2,2)

plot(tox3,Wear4oxd,'ro',tox2,Wear8oxd,'g*',tox1,Wearoxd,'bs'),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('VARIAÇÃO DO DESGASTE OXIDATIVO COM RESPEITO DO
TEMPO NO DISCO',10,'FontName','Arial');

%xlabel('Tempo(s) ', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Desgate (m^3/m)', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

axis([2000 10000 0 0.4e-4])

figure(17)

subplot(1,2,1)

plot(es,Vmp,es,Vmd),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('PERDA DE MASSA ', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga final dos ensaios (N) ', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Perda de massa (g)', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min(vv) max(c)])

subplot(1,2,2)

plot(es,Fp,es,Fd),grid

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('FRAÇÃO DO DESGASTE', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('Carga final dos ensaios (N) ', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração de desgaste', 'FontSize',10,'FontName','Arial');

%axis([min(abs(es)) max(abs(es)) min() max()])

figure (18)

subplot(3,2,1)

hist(abs(Wears),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

```

```

title('MECANISMO DE DESGASTE NUM
ENSAIO','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração dos mecanismos no ensaio a
120','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,2)

hist(abs(Atrs),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração dos mecanismos no ensaio a
120','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,3)

hist(abs(Wear8s),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração dos mecanismos no ensaio a
80','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,4)

hist(abs(Atr8s),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração dos mecanismos no ensaio a
80','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,5)

hist(abs(Wear4s),4)

```

```

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração dos mecanismos no ensaio a
40','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,6)
hist(abs(Atr4s),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Fração dos mecanismos no ensaio a
40','FontSize',10,'FontName','Arial');

ai=(min(find(Atrs<=a_m & Atrs>=-a_m)));
a8i=(min(find(Atr8s<=a_m & Atr8s>=-a_m)));
a4i=(min(find(Atr4s<=a_m & Atr4s>=-a_m)));

figure (19)
subplot(3,2,1)
hist(abs(Wears(1:ai)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('MECANISMO DE DESGASTE NO RUNNING-
IN','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 120','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,2)
hist(abs(Atrs(1:ai)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

```

```

ylabel('Frações no ensaio a 120','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,3)

hist(abs(Wear8s(1:a8i)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)

','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 80','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,4)

hist(abs(Atr8s(1:a8i)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 80','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,5)

hist(abs(Wear4s(1:a4i)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)

','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 40','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,6)

hist(abs(Atr4s(1:a4i)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

%title('MECANISMO DE DESGASTE NUM

ENSAIO','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 40','FontSize',10,'FontName','Arial');

figure (20)

subplot(3,2,1)

```

```

hist(abs(Wears(ai:end)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

title('MECANISMO DE DESGASTE NA REGIÃO ESTAVEL
','FontSize',10,'FontName','Arial');

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 120','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,2)

hist(abs(Atrs(ai:end)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 120','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,3)

hist(abs(Wear8s(ai:end)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 80','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,4)

hist(abs(Atr8s(ai:end)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ','FontSize',10,'FontName','Arial');

ylabel('Frações no ensaio a 80','FontSize',10,'FontName','Arial');

subplot(3,2,5)

hist(abs(Wear4s(ai:end)),4)

set(gca,'FontSize',8,'FontName','Arial')

```

```

        xlabel('V. do desvio padrão do desgaste (10^-6 m)
', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Arial');

        ylabel('Frações no ensaio a 40', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Arial');

        subplot(3,2,6)

        hist(abs(Atr4s(ai:end)),4)

        set(gca, 'FontSize', 8, 'FontName', 'Arial')

        %title('MECANISMO DE DESGASTE NUM
        ENSAIO', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Arial');

        xlabel('V. do desvio padrão do C.de Atrito ', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Arial');

        ylabel('Frações no ensaio a 40', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Arial');

```

ANEXO IV “RESULTADOS DA MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DA TEMPERATURA DE CONTATO”

Figura IV.1: Malha da modelagem em elementos finitos do contato Pino - Disco

Figura IV.2: Ampliação da malha da modelagem em elementos finitos do contato Pino - Disco

Figura IV.3: Resultado da modelagem em elementos finitos do contato Pino – Disco. Os pontos quentes representam temperaturas de 553°C

Figura IV.4: Resultado da modelagem em elementos finitos do contato Pino – Disco. Os pontos quentes representam temperaturas de 443°C.

ANEXO V “RESULTADOS DOS ENSAIOS”

Tabela V.1: Resultados de perda de massa dos ensaios com carga até 120 N.

Repetições	Ensaio 120 (gramas)					
	Pino			Disco		
	Antes	Depois	Variação	Antes	Depois	Variação
1	0,3306	0,3126	0,0180	48,2618	48,2153	0,0465
	0,3307	0,3126	0,0181	48,2619	48,2157	0,0462
	0,3305	0,3126	0,0179	48,2620	48,2155	0,0465
Total	0,3306	0,3126	0,0180	48,2619	48,2155	0,0464
2	0,3305	0,3125	0,0180	48,2621	48,2157	0,0464
	0,3305	0,3127	0,0178	48,2622	48,2158	0,0464
	0,3304	0,3126	0,0178	48,2623	48,2159	0,0464
Total	0,3305	0,3126	0,0179	48,2622	48,2158	0,0464
3	0,3106	0,2926	0,0180	48,2617	48,2153	0,0464
	0,3107	0,2926	0,0181	48,2619	48,2157	0,0462
	0,3105	0,2926	0,0179	48,2621	48,2155	0,0466
Total	0,3106	0,2926	0,0180	48,2619	48,2155	0,0464
4	0,3305	0,3127	0,0178	48,2622	48,2158	0,0464
	0,3305	0,3126	0,0179	48,2620	48,2155	0,0465
	0,3106	0,2926	0,0180	48,2619	48,2155	0,0464
Total	0,3239	0,3060	0,0179	48,2620	48,2156	0,0464
5	0,3107	0,2926	0,0181	48,2619	48,2157	0,0462
	0,3304	0,3126	0,0178	48,2623	48,2159	0,0464
	0,3239	0,3060	0,0179	48,2620	48,2156	0,0464
Total	0,3217	0,3037	0,0179	48,2621	48,2157	0,0463

Tabela V.2: Resultados de perda de massa dos ensaios com carga até 80 N.

Repetições	Ensaio 80 (gramas)					
	Pino			Disco		
	Antes	Depois	Variação	Antes	Depois	Variação
1	0,3257	0,3160	0,0097	47,8779	47,8302	0,0477
	0,3257	0,3161	0,0096	47,8778	47,8309	0,0469
	0,3257	0,3163	0,0094	47,8775	47,8307	0,0468
Total	0,3257	0,3161	0,0096	47,8777	47,8306	0,0471
2	0,3342	0,3259	0,0083	47,2997	47,2086	0,0911
	0,3343	0,3259	0,0084	47,2990	47,2088	0,0902
	0,3343	0,3259	0,0084	47,2992	47,2089	0,0903
Total	0,3343	0,3259	0,0084	47,2993	47,2088	0,0905
3	0,3291	0,3163	0,0128	48,3585	48,3022	0,0563
	0,3291	0,3164	0,0127	48,3588	48,3024	0,0564
	0,3291	0,3163	0,0128	48,3588	48,3026	0,0562
Total	0,3291	0,3163	0,0128	48,3587	48,3024	0,0563
4	0,3343	0,3259	0,0084	47,2990	47,2088	0,0902
	0,3257	0,3163	0,0094	47,8775	47,8307	0,0468
	0,3291	0,3163	0,0128	48,3587	48,3024	0,0563
Total	0,3297	0,3195	0,0102	47,8451	47,7806	0,0644
5	0,3291	0,3164	0,0127	48,3588	48,3024	0,0564
	0,3343	0,3259	0,0084	47,2992	47,2089	0,0903
	0,3297	0,3195	0,0102	47,8451	47,7806	0,0644
Total	0,3310	0,3206	0,0104	47,8344	47,7640	0,0704

Tabela V.3: Resultados de perda de massa dos ensaios com carga até 40 N.

Repetições	Ensaio 40 (gramas)					
	Pino			Disco		
	Antes	Depois	Variação	Antes	Depois	Variação
1	0,3315	0,3237	0,0078	46,9851	46,8963	0,0888
	0,3316	0,3240	0,0076	46,9852	46,8963	0,0889
	0,3316	0,3240	0,0076	46,9853	46,8965	0,0888
Total	0,3316	0,3239	0,0077	46,9852	46,8964	0,0888
2	0,3335	0,3289	0,0046	48,3345	48,2436	0,0909
	0,3336	0,3288	0,0048	48,3345	48,2435	0,0910
	0,3335	0,3288	0,0047	48,3345	48,2436	0,0909
Total	0,3335	0,3288	0,0047	48,3345	48,2436	0,0909
3	0,3193	0,3127	0,0066	48,6010	48,5591	0,0419
	0,3196	0,3128	0,0068	48,6012	48,5593	0,0419
	0,3194	0,3127	0,0067	48,6011	48,5595	0,0416
Total	0,3194	0,3127	0,0067	48,6011	48,5593	0,0418
4	0,3336	0,3288	0,0048	48,3345	48,2435	0,0910
	0,3316	0,3240	0,0076	46,9853	46,8965	0,0888
	0,3194	0,3127	0,0067	48,6011	48,5593	0,0418
Total	0,3282	0,3218	0,0064	47,9736	47,8998	0,0739
5	0,3196	0,3128	0,0068	48,6012	48,5593	0,0419
	0,3335	0,3288	0,0047	48,3345	48,2436	0,0909
	0,3282	0,3218	0,0064	47,9736	47,8998	0,0739
Total	0,3271	0,3211	0,0060	48,3031	48,2342	0,0689

Figura V.1: Resultados dos ensaios Pino - Disco

CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ ASTM, Standard terminology related to erosion and wear; Annual Book of Standards; Vol. 302; ASTM; Philadelphia, PA, 1993.
- ² CZICHOS, H.; Tribology – A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear; p. 325; Elsevier; Amsterdam; 1978.
- ³ PETERSON, M. B.; Advances in tribomaterials. In Achievements in Tribology; p. 91 - 109; ASME; Vol. 1; New York, 1990.
- ⁴ DOWSON, D.; History of Tribology; Longman, London, 1979 *apud* BLAU, P. J.; Fifty years of research on the wear of metals. Tribology International, V30, 5 p 321-331, 1997.
- ⁵ ABBOTT, E. J. e FIRESTONE, F. A.; Specifying surface quality; p. 55 e 569; Mechanical Engineering, 1933.
- ⁶ KERRIDGE, M. e LANCASTER, J. K.; Stages in progress of severe metallic wear; Proceedings of Royal. Society; p. 236 - 250, 1956.
- ⁷ KRAGELSKII I. V., DOBYCHIN, M. N. E KOMBALOV, V. S.; Running-in and equilibrium roughness. Chap. 9 in Friction and Wear Calculation Methods; p. 297 a 316; Pergamon Press, Oxford, U.K., 1982.
- ⁸ BLAU, P. J.; Friction and Wear Transitions of Materials; Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1989. *apud* BLAU, P. J.; Fifty years of research on the wear of metals. Tribology International, V30, 5 p 321-331, 1997.
- ⁹ BLAU, P. J.; Friction process diagrams for analyzing interfacially-complex sliding contacts; p. 751 – 756; Tribology Transactions, 1993.
- ¹⁰ BLAU, P. J.; Friction Science and Technology, Marcel Dekker, New York, 1996. *apud* BLAU, P. J.; Fifty years of research on the wear of metals. Tribology International, V30, 5 p 321-331, 1997.
- ¹¹ ADLER, W. F.; The mechanics of liquid impact. In Treatise on Materials Science and Technology; Vol. 16; Academic Press, New York, 1978.
- ¹² BURTON. R. A.; Thermal Deformation in Frictionally-Heated Systems, Elsevier, Lausanne, 1980. *apud* BLAU, P. J.; Fifty years of research on the wear of metals. Tribology International, V30, 5 p 321-331, 1997.
- ¹³ QUINN, T. F. J., WINER, W. O.; An experimental study of the “hot-spots” occurring during the oxidational wear of tool steel on sapphire; Journal of Tribology; p. 315 – 320; Vol. 109, 1987.
- ¹⁴ HUTCHINGS, I. M.; Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials; Edward Arnold Publications, London, U. K., 1992.
- ¹⁵ TSUYA, Y., SAITO, K. e AKAOKA, J.; In-situ observation of wear process in a scanning electron microscope; p. 57 – 71; Proceedings of International Conference on Wear of Materials; ASME, New York, 1979.
- ¹⁶ QUINN, T.F.J. Role of oxidation in the mild wear of steel. Journal Applied Physics, V13, p. 33 - 37, 1962.

- ¹⁷ SO, H. The mechanism of oxidational wear. *Wear*, 184, p. 161-167, 1995.
- ¹⁸ NORMA DIN 50320. Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste. *Metalurgia & Materiais*, v.53, p.619-622, 1997.
- ¹⁹ PETERSON, M.B. Classification of wear process. In: *Wear control handbook*. ASM Handbook, New York, p.9-15, 1980.
- ²⁰ LING, F. F., "Approaches to Modeling of Friction and Wear" Springer-Verlag, New York, p. 39, 1988.
- ²¹ LUDEMA, K. C., BAYER, R. G. "Tribological Modeling for Mechanical Designers" ASTM STP 1105 American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991.
- ²² RABINOWICS, E. "Friction and Wear of Materials" John Wiley, New York, p. 165, 1965.
- ²³ KOMVOPOULOS, K., SUH, N. P., SAKA, N. "Wear of Boundary-Lubricated Metals Surfaces" *Wear*, vol. 107, 1986
- ²⁴ ARCHARD, J. F. "Contact and Rubbing of Flat Surfaces" *Journal of Applied Physics*, V24, p. 981-986, 1953.
- ²⁵ FEIN, R. S. "A Proposed Quantitative Measure of Wear Protection" *Lubrication Engineering*, vol. 381, 1975.
- ²⁶ BAYER, R. G. "Comments on Engineering Needs and Wear Models" In *Tribological Modeling for Mechanical Designers*, ASTM STP 1105 ASTM, Philadelphia, 1991.
- ²⁷ GODET, M. "Modeling of Friction and Wear Phenomena" In *Approaches to Modeling of Friction and Wear* Springer-Verlag, New York, p.12, 1988.
- ²⁸ LIM, S. C., ASHBY, M. F. "Wear-Mechanism Maps" *Acta Metallurgy*, VOL. 35, p. 1-24, 1987.
- ²⁹ TING, B. Y. A. "Thermomechanical Wear Theory". Tese de Ph.D. apresentada no Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1988. *apud* BLAU, P. J.; Fifty years of research on the wear of metals. *Tribology International*, V30, 5 p 321-331, 1997.
- ³⁰ HSU, S. M., KLAU, E. E., CHENG, H. S. "A Mechano-Chemical Descriptive Model for Wear Under Mixed Lubrication Conditions" *Wear*, vol. 128, p. 307, 1988.
- ³¹ QUINN, T. F. J., SULLIVAN, J. I., ROWSON, D. M. "Origins and Development of Oxidational Wear at Low Ambient Temperatures" *Wear*, vol. 94, p. 175, 1984
- ³² HSU, S. M., SHEN, M. C., YING, T. N., WANG, Y. S. e LEE, S. W. "Tribology of Si-based Ceramics" *Ceramics Transactions*, vol. 42, p. 189, 1994.
- ³³ WANG, Y. S., HSU, S. M., MUURO, R. G. "Ceramics Wear Maps for Alumina" *Lubricating Engineering*, vol.47, p. 63, 1991.
- ³⁴ HSU, S. M. "Boundary Lubrication of Materials" *MRS Bull*, vol 10, p.54, 1991.
- ³⁵ HSU, S. M., SHEN, M. C., KLAUS, E. E., CHENG, H. S., LACEY, P. I. "Mechano-Chemical Model Reaction Temperatures in a Concentrated Contact" *Wear*, vol. 175, p. 209, 1994.

- ³⁶ WANG, F. X., LACEY, P. I., GATES, R. S., HSU, S. M. "Study of Relative Surface Conformity Between Two Surfaces in Sliding Contact" Journal of Tribology, vol. 113, p. 755, 1991.
- ³⁷ QUINN, T.F.J. Oxidational Wear, ASM Handbook, vol 18, p. 280, 1992.
- ³⁸ QUINN, T.F.J. Review de oxidational wear. Part I: The origins of oxidational wear. Tribology international, p. 257 - 271, 1983.
- ³⁹ QUINN, T.F.J. Oxidational wear modelling: I. Wear, 153, p. 179 - 200, 1992.
- ⁴⁰ WELSH, N. C. The dry wear of steels, the general pattern of behavior. Part I. Philosophical Transactions A, v.257, p.31-50, 1965.
- ⁴¹ VARDAMOULIAS, M. The role of hard second phases in the mild oxidational wear mechanism of high-speed steel-based materials. Wear, 173 , p. 105 - 114, 1994.
- ⁴² QUINN, T.F.J., ROWSON D.M., SULLIVAN J.L. Aplicacion of the oxidational theory of wear to the sliding wear of low alloy steel. Wear, 65, p. 1 - 20, 1980.
- ⁴³ ARCHARD, J.F. Single contacts and multiple encounters; Journal of Applied Physics, vol 32, p. 1420, 1961.
- ⁴⁴ QUINN, T.F.J. Review de oxidational wear. Part II: Recent developments and future trends in oxidational wear research. Tribology international, p. 305 - 315, 1983.
- ⁴⁵ QUINN, T.F.J. Computational methods applied to oxidational wear. Wear, 199, p. 169 - 180, 1996.
- ⁴⁶ QUINN, T.F.J. Oxidational wear modelling: Part II. The general theory of oxidational wear, Wear, 175, p. 199 - 208, 1994.
- ⁴⁷ QUINN, T.F.J. Review de oxidational wear. Part II: Recent developments and future trends in oxidational wear research. Tribology international, p. 305 - 315, 1983.
- ⁴⁸ QUINN, T.F.J. Computational methods applied to oxidational wear. Wear, 199, p. 169 - 180, 1996.
- ⁴⁹ QUINN, T.F.J. Oxidational wear modelling: Part II. The general theory of oxidational wear, Wear, 175, p. 199 - 208, 1994.
- ⁵⁰ SULLIVAN, J.L., HODGSON S.G., A study of mild oxidational wear for conditions of low load and spee. Wear, 121, p. 95 - 16, 1988.
- ⁵¹ MARTÍNEZ, F.O., MATUTEZ J. A., JENEZ, A.S. Transformaciones de las fases en metales y aleaciones, UH, Tomo I. Cap 4, p 202-221, 1986.
- ⁵² BOKSHTEIN, B.S. Difusión en Metales. Ed. Mir. P. 115, 1980.
- ⁵³ PORTER, D. Homogeneous nucleation in solids. Phase transformation in solids, McGraw-Hill, Cap 5, p. 264-300, 1969.
- ⁵⁴ HORNOGEN, E. Nucleation of precipitates in defect solid solutions. Nucleation, McGraw-Hill , Cap 6, p 309-378, 1969.
- ⁵⁵ GIBBS, J.W., American Journal of Science and Arts 14, 454 (1878) *apud* Nucleation of precipitates in defect solid solutions. Nucleation McGraw-Hill, Cap 6, p 309-378, 1969.

- ⁵⁶ ASTM, G 99-90 Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus; Annual Book of Standards; ASTM; Philadelphia, PA, 1990.
- ⁵⁷ HAMILTON, G.M. GOODMAN, L.E. Estudo de esforço criado por um contato deslizante circular. *Journal Applied Mechanics*, 33 p371-376, 1966.
- ⁵⁸ PEZDIRNK, J E VIZINTIN, J. PODGORNIK, B. Temperatures at the interface and inside na oscillatory sliding microcontact. *Tribology International*, 32 p481-489, 1999.
- ⁵⁹ TIMOSHENKO, J.N. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, p. 409 ,1970.
- ⁶⁰ GREENWOOD, J.A. WILLIAMSON, J.B.P. Contact of rough surfaces and problems with surface roughness, *Proceedings of Royal Society of London*, A295, p.300-319, 1966.
- ⁶¹ KENNEDY, F.E., *Surface temperature measurement*. ASM. Handbook, vol 18, ASM International, p 438, 1995.
- ⁶² ROWSON D.M., QUINN, T.F.J. Frictional heating and the oxidational theory of wear, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 13, p 209-219, 1980.
- ⁶³ COWAN, R.S. WINER, W.O. Frictional Heating Calculation, *ASM Handbook*, V18 ASM International, USA, p.39-44, 1995.
- ⁶⁴ BIRKS, N. E MEIER, G.H. *Introduction to High Temperature Oxidation of Metals*, Edward Arnold Ltd. London. 1993
- ⁶⁵ KOFSTAD, P. *High Temperature Corrosion*. Elsevier Applied Science. New York, p. 71, 1998.
- ⁶⁶ KELLEY, K.K PROHET, H, *JANAF Thermochemical Table*, NSRDS-NBS37. JS Dept. Commer, Washington, DC 1971.
- ⁶⁷ WRIGHT, I.G. *Metals Handbook*, 9a Edição. Vol 13, Corrosion. ASM International, Metals Park. OH, p. 97, 1987
- ⁶⁸ *Classification and designation of and alloy steels*. *Metals Handbook* 9a Edição. Vol 1, 1985
- ⁶⁹ PANTALEON E., BERNARDES F.G., TANAKA D.K., BICHONE R., *Mecanismos de desgaste em um ensaio Pino/Disco e a sua correlação com os desvios padrões e médias do coeficiente de atrito*, 57° Congresso Anual da ABM- Internacional, p 2001- 2010. 2002