

ALOISIO JOSÉ SCHUITEK

**Estudo do Comportamento de Desgaste de Materiais Metálicos
em Riscamento Circular**

São Paulo
2007

ALOISIO JOSÉ SCHUITEK

**Estudo do Comportamento de Desgaste de Materiais Metálicos
em Riscamento Circular**

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 Amilton Sinatora

São Paulo
2007

ALOISIO JOSÉ SCHUITEK

**Estudo do Comportamento de Desgaste de Materiais Metálicos
em Riscamento Circular**

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de:

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Aprovado em: 19 de janeiro de 2007.

Banca Examinadora:

Prof. Titular Amilton Sinatora (Orientador)

Instituição: USP Assinatura: _____

Prof. Titular José Daniel Biasoli de Mello

Instituição: UFU Assinatura: _____

Prof^ª. Dr.^a. Izabel Fernanda Machado

Instituição: USP Assinatura: _____

Prof. Dr. Eduardo Albertin

Instituição: IPT Assinatura: _____

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

Instituição: UTFPR Assinatura: _____

À Mara, é claro!

E aos meus pais, Seu "Paiunca" e Dona Anielka

AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, pela liberação das atividades de professor nesse período para a qualificação profissional na Universidade de São Paulo - USP;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo financiamento da bolsa de doutorado por meio do Projeto PROCAD (Programa Nacional de Cooperação Acadêmica);

Ao Prof. Titular Amilton Sinatora, pela orientação desse trabalho, pela coragem na acolhida em sua equipe de pesquisa de profissionais de áreas de atuação e perfis tão distintos e pelo exemplo de trabalho;

Ao Prof. Dr. Paulo Borges, pela amizade e lembrança de meu nome para compor a equipe de professores da UTFPR no Projeto PROCAD;

Ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, pelo fornecimento da infraestrutura para o desenvolvimento desse trabalho;

Ao Departamento de Metalurgia e de Materiais da EPUSP, pela disponibilização do uso do microscópio eletrônico de varredura;

Ao Prof. Dr. Gilmar Batalha, pelo incentivo no tema de pesquisa desse trabalho ainda na sua fase embrionária como trabalho da disciplina de Tribologia de Superfícies Usinadas e Conformadas;

Ao Prof. Titular Deniol Tanaka, pela cessão dos rubis sintéticos, que foram os primeiros indentadores utilizados no trabalho;

À Dr^a. Márcia Marie Maru e ao Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga, pela cessão de seus corpos de prova de aço 0,4 % C de baixa liga e ferros fundidos, respectivamente, para um reaproveitamento nessa pesquisa;

À Balzers Balinit do Brasil, na figura do Eng. Daniel Colnaghi, pelo fornecimento de revestimentos extraduros nos corpos de prova de aço 0,4 % C de baixa liga;

Aos colegas professores do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR, pelo incentivo;

Aos colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP;

Aos colegas de doutorado Ossimar Maranhão e Daniel Hioki, pela amizade e companheirismo no enfrentamento conjunto das dificuldades desse período;

A todos os colegas de trabalho do LFS (uma boa parte deles representada na foto a seguir de uma das nossas confraternizações), pelo incentivo e companheirismo. Em especial, o agradecimento aos amigos Silene Carneiro da Silva, Sidney Carneiro, Marco Aurélio Mendes e Mário Vitor Leite, que sempre se superaram em sua disposição de ajudar;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.



A distinção entre desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento que empregamos é um tanto artificial e, certamente, não respeitada pela natureza.

I. M. Hutchings – Tribology (1992) – p. 77.

RESUMO

Neste trabalho estudaram-se os mecanismos de desgaste predominantes no riscamento circular em materiais metálicos quando de uma transição do tipo de desgaste por deslizamento para o desgaste por abrasão. A técnica utilizada foi a esclerometria circular. Para fazer a função de elementos abrasivos, utilizou-se indentadores de rubi e diamante com geometrias semi-esféricas e em troncos de cone (essas para simular partículas abrasivas desgastadas). O principal material de contra-corpo analisado foi o aço 0,4 % C de baixa liga, com dureza de 48 HR_c (temperado e revenido). Foram investigados também os comportamentos de desgaste do cobre eletrolítico, latão 360 (ASTM B-16), ligas de alumínio 2011-T3, 6061-T8, 6262-T8 e ferro fundido cinzento e vermicular. Os carregamentos normais utilizados foram reduzidos e dependentes da geometria dos indentadores utilizados, de forma a se iniciar o ensaio sempre em uma condição de deslizamento. As mudanças nos comportamentos de desgaste foram acompanhadas por alterações nas curvas de força de atrito em relação ao número de voltas do disco (ciclos). Identificaram-se três estágios bem distintos do comportamento de desgaste: *Estágio I* ou *Desgaste "Zero"*, *Transição* e *Estágio II* ou *Desgaste em Regime Permanente*. Apenas a partir da *Transição* é que ocorrem desprendimentos sensíveis de material na forma de partículas de desgaste. No *Estágio II*, podem ocorrer todos os principais mecanismos de desgaste, ou seja, abrasão, oxidação, adesão, fadiga e um tipo específico, designado por *desgaste por deformação plástica acumulada*. A predominância de um em relação aos demais mecanismos de desgaste depende principalmente dos seguintes fatores de influência: material de ensaio, geometria do indentador, carga normal aplicada e meio interfacial.

Palavras-chave: riscamento, transição, desgaste, deslizamento, abrasivo, adesão, oxidação.

ABSTRACT

This work aimed at studying the wear mechanisms that prevail during circular scratch testing in metallic materials. The focus has been to understand the transition region between the sliding wear to the abrasive wear. To that, the main approach has been to apply the circular sclerometric technique. To perform the function of abrasion (simulating the behavior of abrasive elements), indenters (made of ruby and diamond), with semi-spherical and sectioned cone tips were developed. This last type of tip aims at simulating worn abrasive particles. The low-alloy 0,4 %C steel, with 48 HRc (quenched and tempered) was the main material examined. Additionally, it has also been observed the wear behavior of the following materials: i/ electrolytic copper; ii/ brass alloy 360 (ASTM B-16); iii/ aluminium alloys 2011-T3, 6061-T8, 6262-T8; iv/ grey cast iron; and v/ vermicular cast iron. The normal loads were adjusted, considering the geometry of the indenter, thus the specimen test would always start obeying a sliding condition. The changes in the wear behavior in a scratch testing were followed through the variations in the curves of friction force curves versus the number of turns in the disc (cycles). Three well defined wear behavior stages were identified: i/ Stage I or Zero Wear; ii/ Transition; and iii/ Stage II or Wear in Steady State. It was only from the transition stage that perceptible material detachments occurred in the form of wear debris. During Stage II all the foreseeable wear mechanisms (i.e. abrasion, oxidation, adhesion, fatigue and a specific type, named by cumulative plastic deformation) can take place. The predominance of one wear mechanism despite the others depends on: i/ testing materials; ii/ indenter's geometry; iii/ normal load applied; iv/ interfacial films conditions.

Keywords: scratch testing; transition; wear; sliding; abrasive; adhesion; oxidation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
2.2. CLASSIFICAÇÕES E MECANISMOS DE DESGASTE.....	29
2.2.1. Mecanismo de desgaste por oxidação	30
2.2.2. Mecanismo de desgaste por fadiga	32
2.2.3. Mecanismo de desgaste por adesão	33
2.2.4. Mecanismo de desgaste por abrasão	36
2.3. ESCLEROMETRIA: CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÕES.....	44
2.4. CONSIDERAÇÕES GERAIS UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO.....	48
3. OBJETIVOS DA TESE	61
4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	62
4.1. DEFINIÇÃO DO PROCESSO.....	62
4.2. CONDIÇÕES DE ENSAIO – FASE I	65
4.2.1. Material do disco: Aço 0,4 % C de baixa liga.....	65
4.2.2. Materiais de indentadores – Fase I.....	67
4.2.3. Parâmetros de ensaio – Fase I.....	67
4.3. CONDIÇÕES DE ENSAIOS - FASE II.....	69
4.3.1. Materiais do disco – Fase II.....	69
4.3.2. Materiais de indentadores – Fase II.....	74
4.3.3. Parâmetros de ensaio – Fase II.....	75
4.4. TRIBÔMETRO.....	76

4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS RISCOS.....	77
4.6. PROCEDIMENTOS E CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS.....	78
4.7. MELHORIAS NOS ENSAIOS – FASE II.....	79
4.8. REPETIBILIDADE DAS CURVAS DE ATRITO.....	82
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO: TRANSIÇÃO DE DESGASTE EM RISCAMENTO CIRCULAR E INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO	84
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	84
5.2. TRANSIÇÃO DE DESGASTE EM RISCAMENTO CIRCULAR	86
5.2.1. Identificação.....	86
5.2.2. Estágio I ou Desgaste “Zero”	90
5.2.3. <i>Transição e Estágio II</i>	92
5.3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO.....	93
5.3.1. Influência da carga normal.....	93
5.3.2. Influência da velocidade tangencial.....	96
5.3.3. Influência da velocidade rotacional.....	96
5.3.4. Influência do ângulo de ataque	96
5.4. DESGASTE DOS INDENTADORES.....	97
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO: INDENTADORES TRONCO DE CONE	98
6.1. DESGASTE COM PREDOMINÂNCIA DE OXIDAÇÃO.....	98
6.1.1. Aço 0,4 % C de baixa liga - ensaios sem lubrificação	98
6.1.2. Aço 0,4 % C de baixa liga - Influência da umidade relativa do ar.....	104
6.1.3. Latão 360 e ligas de alumínio.....	108
6.2. DESGASTE COM PREDOMINÂNCIA DE ADESÃO	110
6.3. DESGASTE POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA.....	113

6.3.1. Identificação e designação	113
6.3.2. Modelos de desgaste por deformação plástica acumulada	112
6.3.3. Riscamento em aço 0,4 % C de baixa liga – Ensaios lubrificados.....	122
6.3.4. Riscamentos em cobre eletrolítico	127
6.3.5. Riscamentos em latão 360 e ligas de alumínio – condições específicas.....	129
6.3.6 Riscamento não lubrificados de aço 0,4 % C de baixa liga com diamante.....	130
6.3.7. Considerações sobre o desgaste por deformação plástica acumulada.....	132
6.4. DESGASTE DE FERROS FUNDIDOS.....	133
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO: INDENTADORES SEMI-ESFÉRICOS	138
7.1. RESULTADOS GERAIS DE DESGASTE.....	138
8. CONCLUSÕES.....	142
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	146
REFERÊNCIAS	147
ANEXO A – FOLHA DE ENSAIOS	153
ANEXO B	154
B.1. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE ROTACIONAL.....	154
B.2. INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL E DOS ÂNGULOS DE ATAQUE.....	158
ANEXO C.....	160
C.1. DESGASTE DOS INDENTADORES DE RUBI.....	160

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Desgaste por oxidação: a) formação ilhas de oxido, b) e c) crescimento dessas ilhas, e d) destruição das camadas oxidadas e formação novas ilhas de óxido. Fragmentos de desgaste entre as duas superfícies.....	32
Figura 2.2	Mecanismo adesão por delaminação.....	34
Figura 2.3	Mecanismo adesão por transferência adesiva.....	35
Figura 2.4	Mecanismo de adesão por elementos transferidos.....	36
Figura 2.5	Modelos para o desgaste abrasivo de Challen e Oxley.....	38
Figura 2.6	Mudança de tipo de mecanismo de desgaste e da taxa de desgaste em função do ângulo de ataque.....	39
Figura 2.7	Modos de deformação no deslizamento de um indentador esférico duro em latão, aço 1045 e aço inoxidável AISI 3048.....	40
Figura 2.8	Representação esquemática da alteração do ângulo de ataque devido à mudança na forma do indentador em diferentes cargas normais.....	41
Figura 2.9	Mapa do modo de deformação de uma superfície metálica deslizando contra uma aspereza dura em condições lubrificadas.....	42
Figura 2.10	Representação esquemática entre a taxa de desgaste e a razão entre durezas do abrasivo e do material a ser desgastado (H_a/H_o). K_1 – início da transição; K_2 – final da transição.....	43
Figura 2.11	Representação esquemática dos perfis dos sulcos de riscamentos.....	47
Figura 2.12	Mecanismos de abrasão promovidos por indentador esclerométrico cônico e ângulos de cone correspondentes).....	48
Figura 2.13	Variação da taxa de desgaste em função da carga aplicada (par Latão 60/40 e Stellite 61% Co, 30% Cr). A rugosidade da superfície desgastada com cargas acima de 0,8 kg é aproximadamente 100 vezes maior que a correspondente a condições de carga abaixo da transição.....	52
Figura 2.14	Influência da velocidade sobre a taxa de desgaste de um aço 0,64% C. Carga: 30 kg.....	53

Figura 2.15	Influência da carga sobre a taxa de desgaste de um par pino-anel de aço 0,52% C. (x pino - o anel). Velocidade de deslizamento: 100 cm/s.....	54
Figura 2.16	Idealização de uma cunha cortante média em abrasivos de rebolos).....	58
Figura 2.17	Representação esquemática do início do corte na retificação.....	59
Figura 2.18	Representação esquemática da formas de desgaste em rebolos.....	60
Figura 4.1 -	Microestrutura do aço 0,4 % C de baixa liga, ataque Nital 3%, observada em MEV, imagem por elétrons retroespalhados).....	66
Figura 4.2	Superfície de discos apenas retificados. a) Superfície de um disco de preparação de aço 0,4 % C de baixa liga na condição apenas retificada, microscópio óptico. b) superfície de riscamento de um pré-teste no mesmo material.....	66
Figura 4.3	Indentadores utilizados nos ensaios de riscamento – Fase I (observação em microscópio óptico).....	68
Figura 4.4	Indentadores semi-esféricos utilizados nos ensaios de riscamento – Fase II.....	74
Figura 4.5	Indentadores tronco de cone utilizados nos ensaios de riscamento – Fase II.....	75
Figura 4.6	Configuração dos ensaios de riscamento e o tribômetro – Plint TE-79.....	76
Figura 4.7	Variação da força de atrito em ensaios com condições similares.....	80
Figura 4.8	Procedimento de estabilização do indentador e ensaios de riscamento repetidos posteriores.....	81
Figura 4.9	Travamento da mesa e limpeza dos indentadores apenas entre experimentos....	82
Figura 4.10	Exemplo de repetibilidade de tendências das curvas de força de atrito após procedimentos de melhoria nos ensaios.....	83
Figura 5.1	Superfície e perfil transversal de riscamento no aço 0,4 % C de baixa liga: Indentador de diamante SE-45 R50 (extremidade semi-esférica, ângulo de ataque 45°, raio de ponta de $r_e = 50 \mu\text{m}$); carga $W = 0,2 \text{ N}$; velocidade tangencial $v_t = 0,5 \text{ m/s}$; velocidade rotacional $n = 145 \text{ rpm}$; tempo de riscamento $t = 331 \text{ s}$, distância percorrida $x = 165 \text{ m}$; número de ciclos $N_c = 800$ ciclos; Ar ambiente - umidade relativa do ar - UR = 61 %.	85
Figura 5.2	Evolução da força de atrito no riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentador de diamante SE-45 R50 nas condições especificadas.....	85

Figura 5.3	Comportamento de desgaste de materiais metálicos em riscamento circular com baixas cargas normais.....	88
Figura 5.4	Exemplo de superfície do <i>Estágio I</i> de desgaste: riscamento em latão 360. Indentador de diamante SE-30 R200 (extremidade semi-esférica, ângulo de ataque 30°, raio de ponta $r_e = 200 \mu\text{m}$), carga $W = 0,2 \text{ N}$, velocidade tangencial $v_t = 0,157 \text{ m/s}$, ar ambiente – UR = 53%, número de ciclos $N_c = 66$ ciclos (microscopia óptica).....	91
Figura 5.5	Alteração do coeficiente de atrito no riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentador de diamante TC-45 D370; $v_t = 0,157 \text{ m/s}$; Ar ambiente, UR = 49-53%.....	94
Figura 5.6	Alteração da força de atrito no riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga com indentador de diamante TC-45 D370; $v_t = 0,157 \text{ m/s}$; ar ambiente, UR = 49-53%.....	95
Figura 5.7	Estimativa da relação carga normal e número de ciclos para o início do <i>Estágio II</i> em aço 0,4 % C de baixa liga nas mesmas condições de riscamento selecionadas.....	95
Figura 6.1	Forças de atrito em riscamentos do aço 0,4 % C de baixa liga. Indentador de rubi TC-45 D370; carga $W = 1,0 \text{ N}$; $n = 100 \text{ rpm}$; Ar ambiente, UR = 58-64%.....	99
Figura 6.2	Superfícies de riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga. Indentador de rubi TC-45 D370 nas condições selecionadas.....	100
Figura 6.3	Perfis das superfícies de riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga - ensaios a seco com indentador de rubi TC-45 D370 nas condições selecionadas.....	100
Figura 6.4	Perfis das superfícies de riscamento na <i>Transição</i> do aço 0,4 % C de baixa liga nas condições selecionadas.....	101
Figura 6.5	Comprovação de óxidos de ferro na superfície de riscamento do <i>Estágio II</i> na condição "4" selecionada – Via técnica de análise EDS (espectrometria por dispersão de energia).....	103
Figura 6.6	Microscopia da superfície de riscamento do <i>Estágio II</i> na condição "4" selecionada – Via MEV.....	103
Figura 6.7	Influência da umidade relativa do ar sobre a força de atrito em riscamento do aço 0,4 % C de baixa liga. Indentador de rubi TC-25 D250; $W = 1,0 \text{ N}$; $v_t = 0,157 \text{ m/s}$	104
Figura 6.8	Superfícies de riscamento do aço com a variação da umidade relativa do ar (a).....	105

Figura 6.9	Superfícies de riscamento do aço com a variação da umidade relativa do ar (b).....	106
Figura 6.10	Superfícies de riscamento com predominância de desgaste por oxidação (microscopia. óptica). . a) Latão. 360: .indentador .de .rubi. TC-25 .D250;. $W = 0,5N$; $v_t = 0,189$ m/s; UR = 63%; 1114 ciclos. b) Superfície de riscamento do alumínio 6262-T8. Indentador de rubi TC-25 D250; $W = 0,5N$; $v_t = 0,189$ m/s; Ar ambiente – UR = 65%; 1117 ciclos.....	108
Figura 6.11	Fotos dos resultados do riscamento em ligas de alumínio 6061-T8. Indentador de rubi TC-25 D250; Ar ambiente, UR = 50%; $W = 1,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s; $N_c = 200$ ciclos. a) superfície de riscamento; b), c), d) indentador com material aderido nas vistas inclinada, lateral e de topo, respectivamente.....	110
Figura 6.12	Alterações no coeficiente de atrito em riscamentos de liga de alumínio 6061-T8. Indentador de rubi TC-25 D250; Ar ambiente - UR = 50%; $W = 1,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s; $N_c = 200$ ciclos.....	111
Figura 6.13	Coeficiente de adesão em relação à dureza de vários materiais.....	112
Figura 6.14	Exemplos de desgaste por deformação plástica acumulada. a) Cobre: Diamante TC-45 D370; $W = 0,5$ N; $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente – UR = 53%; $N_c = 995$ ciclos. b) Latão 360: Diamante TC-30 D370; $W = 0,2$ N $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente – UR = 52%; $N_c = 108$ ciclos. c) Aço 0,4 % C de baixa liga: Diamante TC-45 D370; $W = 4,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente – UR = 49%; $N_c = 398$ ciclos. d) Aço 0,4 % C de baixa liga: Rubi TC-25 D250; $W = 2,0$ N; $v_t = 0,19$ m/s; óleo lubrificante; $N_c = 3000$ ciclos;.....	113
Figura 6.15	(a) Representação dos experimentos de Akagati e Kato (1987) com a formação de placas ou camadas delgadas. (b) Deslizamento perpendicular aos sulcos de rugosidade do contra-corpo mais mole. (c) Deslizamento paralelo aos sulcos de rugosidade do contra-corpo mais mole.....	116
Figura 6.16	Desgaste <i>ratchetting</i> plástico em um tubo fino sujeito à combinação de uma carga contínua e um torque alternante: (a) tensões em um elemento de material; (b) histórico de tensões e deformações associadas no elemento (a).....	117
Figura 6.17	Concentração de pressão e tensão de contato na extremidade de um indentador topograficamente plano.....	119
Figura 6.18	Influência da microestrutura nas curvas de tensão-deformação verdadeiras.....	120
Figura 6.19	Desgaste adesivo: origem da fratura da superfície e formação de partícula de desgaste.....	121

Figura 6.20	Alteração da força de atrito em riscamentos lubrificados do aço 0,4 % C de baixa liga – Indentador rubi TC-25 D250, $v_t = 0,19$ m/s. Ensaios com aplicação de óleo lubrificante e ensaio a seco (ar ambiente, UR = 65%).....	123
Figura 6.21	Riscamento lubrificado em aço 0,4 % C de baixa liga - Carga $W = 1,0$ N; Rubi TC-25 D250; óleo lubrificante; $v_t = 0,19$ m/s; $N_c = 3000$ ciclos.....	124
Figura 6.22	Riscamento lubrificado em aço 0,4 % C de baixa liga - Carga $W = 2,0$ N; Rubi TC-25 D250; óleo lubrificante; $v_t = 0,19$ m/s; $N_c = 3000$ ciclos.....	125
Figura 6.23	Riscamento lubrificado em aço 0,4 % C de baixa liga - Carga $W = 4,0$ N; Rubi TC-25 D250; óleo lubrificante; $v_t = 0,19$ m/s; $N_c = 3000$ ciclos.....	125
Figura 6.24	Posições de medição e microdureza das superfícies riscadas dos ensaios lubrificados do aço 0,4 % C de baixa liga.....	126
Figura 6.25	Micrografia do perfil transversal em posição tangencial ao riscamento. Ensaio lubrificado em aço 0,4 % C de baixa liga: $W = 2,0$ N; Rubi TC-25 D250; óleo lubrificante; $v_t = 0,19$ m/s; $N_c = 3000$ ciclos; Ataque com Nital.....	127
Figura 6.26	Resistência ao escoamento de ligas de cobre em temperaturas de 350° C e 500° C (adaptado de ASM, 1992).....	128
Figura 6.27	Superfície de riscamento do cobre eletrolítico. Diamante TC-30 D370; $W = 2,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s; ar ambiente, UR = 63%; $N_c = 795$ ciclos.....	129
Figura 6.28	Superfície de ensaios riscamento segmentados no aço 0,4 % C de baixa liga na condição "a seco". Indentadores de diamante TC-45 D370; $W = 4,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s; ar ambiente - UR = 49-51%.....	131
Figura 6.29	Evolução da força de atrito no riscamento do ferro fundido cinzento. Indentador de rubi TC-25 D250; Ar ambiente UR = 60%; $W = 4,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s.....	133
Figura 6.30	Superfícies de riscamento de ensaios segmentados no ferro fundido cinzento. Indentador de rubi TC-25 D250, Ar ambiente, UR = 60%; $W = 4,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s.....	135
Figura 6.31	Superfícies de riscamento de ferro fundido vermicular - Recobrimento dos veios de grafita. Indentador de rubi TC-25 D250, Ar ambiente, UR = 61-62%; $W = 0,5$ N; $v_t = 0,157$ m/s.....	136
Figura 7.1	Cavaco helicoidal encontrado no riscamento da liga de alumínio 2011-T3. Indentador de diamante SE-45 R50; $W = 2,0$ N; $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente, UR = 54%; $N_c = 246$ ciclos.....	139

Figura 7.2	Superfícies de riscamento com indentadores semi-esféricos ($v_t = 0,157$ m/s); a) Aço 0,4 % C de baixa liga: diamante SE-45 R200; $W = 2,0$ N; UR = 53%; $N_c = 790$c.; b) Alumínio 2011-T3: diamante SE-45 R200; $W = 0,2$ N; UR = 52%; $N_c = 998$ ciclos; c) Ferro fundido vermicular: diam. SE-45 R50; $W = 0,5$ N; UR = 62 %; $N_c = 613$ c.; d) Latão 360 : rubi SE-30 R200; $W = 0,2$ N; UR = 53 %; $N_c = 997$ ciclos.e); f) Aço 0,4 % C de baixa liga: SE- 45 R200; $W = 2,0$ N; UR = 47%; $N_c = 660$ ciclos.....	140
Figura 7.3	Superfícies de riscamento de cobre eletrolítico – deformação plástica inicial. Indentador semi-esférico diamante SE-45 R200; $W = 0.2$ N; $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente-UR = 55%. a) 33 ciclos; b) 103 ciclos.....	141
Figura 7.4	Evolução da força de atrito no cobre eletrolítico. Indentador semi-esférico de diamante SE-45 R200; $W=0,2$ N; $v_t = 0,157$ m/s; Ar ambiente – UR = 55%.....	141
Figura B.1	Influência da velocidade rotacional na força de atrito no Aço 0,4 % C de baixa liga.....	155
Figura B.2	Superfícies dos ensaios de variação da velocidade rotacional.....	157
Figura B.3	Influência da carga normal e dos ângulos de ataque dos indentadores de rubi...	159
Figura C.1	Desgaste de indentador de rubi TC-60 D280 (tronco de cone, ângulo de ataque $\alpha = 60^\circ$, diâmetro da extremidade 280 μm).....	161
Figura C.2	Desgaste de indentador de rubi TP-25 D250 (tronco de cone, ângulo de ataque $\alpha = 25^\circ$, diâmetro da extremidade 250 μm).....	162
Figura C.3	Desgaste de indentador de rubi TC-45 D370 (tronco de cone, ângulo de ataque $\alpha = 60^\circ$, diâmetro da extremidade 370 μm) – Após fase experimental I.....	163
Figura C.4	Desgaste de indentador de diamante SE-45 R50 (semi-esférico, ângulo de ataque $\alpha = 45^\circ$, raio de ponta $r_e = 50$ μm) – Após fase experimental I.....	163
Figura C.5	Indentador de diamante SE-45 R50 após riscamento de revestimento TiN.....	164

LISTAS DE TABELAS

Tabela 4-1: Composição química do aço 0,4 % C de baixa liga.....	65
Tabela 4.2 – Composições químicas das ligas de alumínio ensaiadas.....	70
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas das ligas de alumínio ensaiadas.....	70
Tabela 4.4 - Propriedades físicas típicas de cobre e latão.....	72
Tabela 4.5 - Propriedades mecânicas típicas do cobre e latão 360.....	72
Tabela 4.6 - Composição química dos ferros fundidos cinzento e vermicular.....	73
Tabela 4.7 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzento e vermicular.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Maiúsculas

$A_1; A_2; A_3$ $A+; A-$	$[\mu\text{m}^2]$	Áreas do perfil do sulco
A_{vk}	$[\mu\text{m}]$	Comprimento da superfície de desgaste da partícula abrasiva
D_p	-	Grau de penetração ou Parâmetro D_p
F_a	[N]	Força de atrito
F_{Ns}	[N]	Força normal na partícula abrasiva (N);
F_t	[N]	Força tangencial na partícula (N);
F_{tS}	[N]	Força tangencial na partícula abrasiva (N);
H	[MPa]	Dureza do material
H_{cu}	[mm]	Profundidade de corte
$H_{cu\text{ eff}}$	[mm]	Profundidade de corte efetiva
H_a	[MPa]	Dureza da partícula abrasiva
H_s	[MPa]	Dureza da superfície desgastada
H_o	[MPa]	Dureza da superfície do material antes do riscamento
K	-	Coefficiente de desgaste
K_1	-	Início da transição de desgaste de Khrushov
K_2	-	Final da transição de desgaste de Khrushov
N_c	-	Número de voltas do disco = ciclo
R	[mm]	Raio de riscamento
Q	$[\text{mm}^3]$	Volume removido de material
T_μ	$[\mu\text{m}]$	Espessura mínima de corte

W [N] Carga normal

Letras Minúsculas

a [μm] Raio de contato

d [m] Distância linear de riscamento

$d\gamma^p$ [mm] Deformações plásticas decorrentes de tensões de cisalhamento

$d\varepsilon^p$ [mm] Deformações plásticas decorrentes de tensões diretas

f - Resistência ao cisalhamento da interface abrasivo-superfície

h [μm] Profundidade de penetração

h_{cu} [mm] Espessura de usinagem

n [rpm] Velocidade rotacional de riscamento

p_m [MPa] Pressão média (Hertz)

$p_{m\acute{a}x}$ [MPa] Pressão máxima (Hertz)

r [mm] Raio da trilha de riscamento no disco

r_ε [μm ; mm] Raio de ponta do indentador

v_e [m/s] Velocidade de entrada da partícula abrasiva na superfície

v_t [m/s] Velocidade tangencial de riscamento

α [$^\circ$] Ângulo de ataque de uma partícula abrasiva

α^* [$^\circ$] Ângulo de incidência ou folga de uma ferramenta

β [$^\circ$] Ângulo de cunha de uma ferramenta

γ [$^\circ$] Ângulo de saída de uma ferramenta

ε [$^\circ$] Ângulo do cone do indentador (ou ângulo de ponta)

η [$^\circ$] Ângulo de entrada da partícula na superfície

μ	-	Coeficiente de atrito
$\sigma; \sigma_{zz}$	[MPa]	Tensão compressiva
$\tau; \tau_{zx};$	[MPa]	Tensão de cisalhamento alternante
ρ_s	[μm]	Raio de arredondamento médio da aresta da partícula abrasiva