**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Amilton Joaquim Cordeiro De Freitas

**Comportamento De Desgaste De Pares
Metal - Compósito De Grau Aeronáutico**

São Carlos

2009

AMILTON JOAQUIM CORDEIRO DE FREITAS

**Comportamento De Desgaste De Pares
Metal - Compósito De Grau Aeronáutico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

***Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais
Orientador: Prof. Assoc. José Ricardo Tarpani***

São Carlos

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação IFSC/USP

Freitas, Amilton Joaquim Cordeiro

Comportamento de desgaste de pares Metal/Compósito de grau aeronáutico/ Amilton Joaquim Cordeiro; orientador José Ricardo Tarpani. - edição revisada - São Carlos, 2009.

232 p.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Desgaste. 2. Juntas mecânicas. 3. Ligas metálicas. 4. Laminados compósitos. 5. Indústria aeronáutica. I. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação a versão original, sob a exclusiva
responsabilidade do autor.
São Carlos, 06 de Julho de 2009

(Amilton Joaquim Cordeiro de Freitas)

*Dedico esse trabalho a uma pessoa que
sempre sonhou em ser professora,
carinhosamente conhecida como "Lucy"*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. José Ricardo Tarpani, meu Orientador, pela dedicação, paciência e conhecimentos transmitidos. Por sua orientação de forma ímpar, sem a qual este trabalho não teria atingido o ideal traçado.

Ao Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo (Campus de São Carlos – SP) e, em especial, ao Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Universidade de São Paulo por ceder meu espaço de trabalho como pós-graduando.

À minha esposa Aline Ortega, por permitir minha ausência e me apoiar incondicionalmente nos momentos difíceis.

A todos meus familiares e colegas de trabalho em Sorocaba.

As instituições de ensino Fatec-Faculdade de Tecnologia e Unip-Universidade Paulista (unidades de Sorocaba-SP), e a empresa Rh-treinare.

Aos amigos Alan, Maria Cristina, Danilo, Guilherme, Omar, Sandra, Daniel, Stênio, Rosamel, e Luciana pelo companheirismo.

Ao *Materials Intitute of Brazil (MIB)*, onde realizei meus ensaios, nas pessoas de seus Diretores Dr. Eng. Marcelo Tadeu Milan e Dr. Eng. Omar Maluf.

Aos técnicos Silvano, João e Pedro, do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, por me atenderem sempre que precisei.

Aos demais colegas pós-graduandos e aos professores da Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais do Campus de São Carlos da Universidade de São Paulo.

EPÍGRAFE

Viver é acreditar no impossível e realizá-lo.

Antes de Santos Dumont, ninguém achava possível fazer voar um aparelho mais pesado que o ar, mas ele acreditou nisso e, com determinação, criou o avião. Quando lhe disserem que alguma coisa em que você acredita é impossível, tenha paciência, talvez estas pessoas não saibam realmente que a vida é um eterno ato de transformar o impossível em realidade. Quanto maior a dificuldade, maior o mérito em superá-la.

Roberto Shinyashiki

RESUMO

FREITAS A.J.C. **Comportamento de desgaste de pares metal / compósito de grau aeronáutico** (2009) São Carlos-SP. 205p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

Estudou-se o comportamento de desgaste sob deslizamento em múltiplos passes de pinos fixos de liga metálica friccionados contra discos rotativos de laminados compósitos de matriz polimérica fortalecidos com fibras contínuas de carbono (C), para distintas cargas aplicadas e temperaturas de ensaio. Determinou-se a perda de volume por desgaste dos diversos pares tribológicos, e avaliaram-se os principais aspectos das superfícies e dos produtos gerados durante o processo de desgaste. Concluiu-se que o par formado pelo aço inoxidável martensítico PH 15-5 e o laminado compósito termoplástico C-PPS (poli-sulfeto de fenileno) apresentou o menor desgaste na maioria das circunstâncias avaliadas. A liga Ti6Al4V foi a pior opção dentre os pinos metálicos, independentemente do laminado compósito empregado, devido à baixa resistência ao cisalhamento e alta rugosidade superficial do metal, a qual prejudicou o ancoramento de filmes poliméricos de transferência. O ótimo desempenho do aço PH resultou de sua alta dureza e da adequada rugosidade superficial para o efetivo ancoramento do filme de transferência. O laminado compósito C-PPS se mostrou mais susceptível às variações na carga de contato, enquanto que o C-EPX (Epóxi) foi mais sensível à temperatura de ensaio. Filmes poliméricos de transferência atuaram como lubrificante do sistema tribológico, preservando ambos o pino metálico e o disco compósito de um desgaste excessivo. A natureza dos produtos de desgaste, sua geometria, seu tamanho médio e sua distribuição de tamanhos dependeram fortemente do disco rotativo de laminado compósito e das condições de ensaio de desgaste, e afetaram sobremaneira, como terceiro corpo abrasivo, o subsequente processo de desgaste dos pares de fricção metal-compósito. Os resultados obtidos são potencialmente úteis na especificação de juntas mecânicas aeronáuticas mais apropriadas de laminados compósitos de matriz polimérica unidos por intermédio de prendedores metálicos.

Palavras-chave: Desgaste. Juntas mecânicas. Ligas metálicas. Laminados compósitos. Indústria aeronáutica.

ABSTRACT

FREITAS A.J.C. **Wear behavior of aeronautical grade metal / composite pairs** (2009) São Carlos-SP. 205p. Master Dissertation - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, Brazil.

Multipass sliding wear behavior of static metal alloy pins rubbing against rotating carbon fiber reinforcing polymer matrix composite laminate disks has been studied for different applied loads and test temperatures. The volume loss due wear has been determined for several tribological metal / composite systems, and the main aspects of wear surfaces and debris have been evaluated. It has been concluded that the best performance was achieved in very most cases by the PH15-5 steel pin contacting the C-PPS (poly-phenylene sulphide) disk. The Ti6Al4V alloy displayed the worst performance among the metal pins, regardless the employed composite laminate, as a result of the metal's low shear strength and high surface roughness, which impaired the formation of polymer transfer films. The outstanding performance of PH steel pins derived from its high hardness and proper surface roughness that favored the transfer film formation. The C-PPS composite laminate was more sensitive to contact load variations, whereas the C-EPX laminate was more susceptible to the test temperature. Polymer transfer films acted as lubricant in the tribological system, preserving both the metallic pin and the composite disk from wearing in excess. The nature of wear debris, their geometry, mean size, and size distribution strongly depended on the composite laminate disk as well as on testing conditions, and affected overwhelmingly, as third body abrasive particles, the subsequent wear process of metal / composite friction pairs. The obtained results are potentially useful for the specification of more equalized aircraft mechanical joints comprising polymer matrix composite laminates and metallic fasteners.

Keywords: Wear. Mechanical joints. Metal alloys. Composite laminates. Aeronautical industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais critérios de projeto e de seleção relativamente às propriedades mecânicas de materiais de construção aeronáutica, conforme o componente estrutural de interesse.....	37
Figura 2.2 - Componentes estruturais aeronáuticos tipicamente confeccionados em ligas-Al.....	38
Figura 2.3 - Grande superioridade das ligas-Ti no quesito de limite de resistência específica ao escoamento, frente a outras ligas aeronáuticas.....	40
Figura 2.4 - Uso de ligas-Ti em componentes de turbina a jato, trens de pouso, superfícies de controle, dutos hidráulicos, prendedores e nacela.....	42
Figura 2.5 - Emprego de aços PH em componentes de turbina e em partes de trens de pouso.....	44
Figura 2.6 - Uso de materiais compósitos (% em massa estrutural) no passado, no presente e projeção futura na indústria aeronáutica.....	45
Figura 2.7 - (a) Diferentes tipos de esforços mecânicos atuando numa asa de aeronave; (b) Disposições preferenciais das fibras de maneira a resistir mais adequadamente aos esforços aplicados em serviço.....	49
Figura 2.8 - Materiais de construção aeronáutica empregados na fabricação do novo Boeing 787 (Boeing Co.). São indicados os percentuais em massa de utilização dos materiais na aeronave.....	51
Figura 2.9 - (a) Esquemático de uma autoclave, e (b) Processo de bolsa plástica sob vácuo.....	55
Figura 2.10 - Exemplificação de ciclo de processamento termo-mecânico de laminados compósitos sólidos em autoclave com bolsa de vácuo.....	56
Figura 2.11 - Processo de consolidação por compressão a quente (hot	

press): (a) Painel plano; (b) Curvo.....	57
Figura 2.12 - Fabricação de fuselagem de aeronave pelo processo de colocação de fita.....	58
Figura 2.13 - Componentes da aeronave Embraer EMB145 tipicamente confeccionados com materiais compósitos.....	59
Figura 2.14 - Componentes da aeronave A380 potencialmente confeccionáveis com resina termoplástica fortalecida com fibras contínuas de alta resistência mecânica.....	60
Figura 2.15 - Esquemático ilustrativo dos elementos que compõem um sistema tribológico.....	61
Figura 2.16 - Modelo de uma junta mecânica simples, em que um laminado plano é carregado em tração por um prendedor inserido em furo passante circular.....	68
Figura 2.17 - Distribuição de tensões no plano do laminado ao redor do pino de tracionamento da junta: (a) Tensão compressiva no lado de carregamento do prendedor (pino); (b) Tensão trativa através da seção do material; (c) Tensão de cisalhamento fora do plano de máxima tração.....	68
Figura 2.18 - (a) Componente estrutural aeronáutico da Airbus (viga em I) obtido pela junção mecânica de dois materiais dissimilares entre si (metal à esquerda, e CMP à direita); (b) Faces reforçadas e plana, respectivamente, de um painel híbrido metal / CMP de aeronave Airbus.....	72
Figura 2.19 - Esquematização do conceito de junta mecânica híbrida impermeável a líquidos.....	73
Figura 2.20 - Modelo em elementos finitos de uma junta mecânica totalmente híbrida.....	73
Figura 2.21 - Componente estrutural primário aeronáutico (aeronaves Airbus A330 e A340) formado pela junção mecânica de laminado CMP e liga metálica.....	74
Figura 2.22 - (a) Projeto estrutural do mini-jato Phenom 300 da Embraer; (b) Aeronave em voo.....	74
Figura 2.23 - Mecanismos propostos de desgaste de compósitos	

poliméricos fibrosos: (a) Fragmentos de desgaste e descolamento de fibras; (b) Compactação dos fragmentos e quebra de fibras; (c) Destacamento de fragmento da massa compactada contendo porções de fibras quebradas.....	77
Figura 2.24 - Efeito de tamanho dos detritos, ou fragmentos no desgaste abrasivo: (a) Quando o detrito é maior que a rugosidade superficial; (b) Quando é menor que a rugosidade superficial..	78
Figura 2.25 - Nova rugosidade criada na contraface do laminado CMP devida à compactação de detritos incluindo fibras quebradas..	79
Figura 2.26 - Diagrama esquemático de um aparato de ensaio de desgaste por fricção entre pino e disco segundo a norma ASTM G 99....	81
Figura 2.27 - Representação esquemática da estrutura tri-dimensional da fibra de carbono.....	84
Figura 3.1 - Microestrutura fortemente texturizada da liga de alumínio 7475-T7351.....	94
Figura 3.2 - Microestrutura texturizada da liga de titânio Ti6Al4V.....	96
Figura 3.3 - Microestrutura texturizada do aço PH 15-5 tratado para a condição H1000.....	99
Figura 3.4 - Esquemático da arquitetura básica de camadas dos laminados CMP, cuja seqüência de empilhamento é [(0/90),(+45/-45)2,(0/90)].....	100
Figura 3.5 - Microestrutura da seção longitudinal do laminado termorrígido C-EPX com distribuição quase-isotrópica de fibras no plano.....	101
Figura 3.6 - (a) Placa de laminado termorrígido C-EPX ensaiadas em flexão. Os espécimes para ensaios de desgaste foram extraídos de placas similares a esta; (b) Estrutura química da resina termofixa EPX.....	102
Figura 3.7 - Microestrutura da seção longitudinal do laminado termorrígido C-PPS com distribuição quase-isotrópica de fibras no plano.....	103
Figura 3.8 - (a) Placa de laminado termorrígido C-PPS ensaiadas em flexão. Os espécimes para ensaios de desgaste foram	

	extraídos de placas similares a esta; (b) Estrutura química da resina termoplástica p(para)-PPS.....	104
Figura 4.1 -	(a) Geometria e dimensionais dos pinos metálicos de desgaste; (b) Exemplo de pino após acabamento final por lixamento fino.....	105
Figura 4.2 -	(a) Geometria e dimensionais do corpo de prova tipo disco de desgaste; (b) Estratégia de extração dos cdps de desgaste a partir das placas de laminado CMP similares àquelas ilustradas respectivamente nas Figuras 3.6 e 3.8.....	107
Figura 5.1 -	(a) Sistema de ensaio PSD empregado neste estudo; (b) Detalhe do par pino-disco de desgaste por fricção (ensaio à temperatura ambiente).....	109
Figura 5.2 -	(a) Vista geral do sistema de ensaio equipado com um forno; (b) Detalhe do forno com a montagem do sistema pino-disco em seu interior.....	111
Figura 5.3 -	Todas possíveis combinações entre pares de fricção e variáveis de ensaio de desgaste PSD realizadas nesta dissertação de mestrado.....	113
Figura 5.4 -	Códigos de identificação dos ensaios de desgaste PSD.....	114
Figura 5.5 -	Vista geral do rugosímetro Form Talysurf PGI 820 da Taylor Hobson empregado neste estudo.....	115
Figura 5.6 -	Esquemático de um perfil genérico de rugosidade em que são mostrados os elementos básicos para a determinação do índice de rugosidade média R_a	116
Figura 5.7 -	(a) Processo de medição de rugosidade realizada na superfície de desgaste de um pino metálico; (b) Em um disco compósito.....	117
Figura 5.8 -	Trajetória de medição do perfil de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) No pino metálico; (b) No disco compósito.....	117
Figura 6.1 -	(a) Perda de volume por desgaste dos pinos metálicos, dos discos CMPs, e dos conjuntos pino-disco, respectivamente;	

(b) Correlações entre perda de volume por desgaste dos pinos e discos, individualmente, relativamente aos conjuntos pino-disco.....	122
Figura 6.2 - Ordenamento crescente quanto à perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD.....	124
Figura 6.3 - Efeito da carga aplicada ao pino de liga-Al, no desgaste dos pares de fricção pino-disco CMP para as duas temperaturas de ensaio.....	125
Figura 6.4 - Efeito da carga aplicada ao pino de liga-Ti, no desgaste dos pares de fricção pino-disco CMP para as duas temperaturas de ensaio.....	126
Figura 6.5 - Efeito da carga aplicada no pino de aço inox PH 15-5, no desgaste dos pares de fricção pino-disco CMP para duas temperaturas de ensaio.....	127
Figura 6.6 - Efeito da carga aplicada ao pino de desgaste, na perda de volume dos pares pino metálico-disco de C-PPS para as duas temperaturas de ensaio.....	129
Figura 6.7 - Efeito da carga aplicada ao pino de desgaste, na perda de volume dos pares pino metálico-disco de C-EPX para as duas temperaturas de ensaio.....	130
Figura 6.8 - Efeito da carga aplicada ao pino de desgaste na perda de volume do par pino-disco à temperatura ambiente.....	131
Figura 6.9 - Efeito da carga aplicada no pino de desgaste na perda de volume do par pino-disco a 100°C.....	132
Figura 6.10 Efeito da temperatura de ensaio no desgaste dos pares de fricção pino-Al / disco CMP, sob as duas cargas aplicadas nos ensaios.....	133
Figura 6.11 - Efeito da temperatura de ensaio no desgaste dos pares de fricção pino-Ti / disco CMP, sob as duas cargas aplicadas nos ensaios.....	134
Figura 6.12 - Efeito da temperatura de ensaio no desgaste dos pares de fricção pino de aço-PH / disco CMP, sob as duas cargas	

aplicadas nos ensaios.....	135
Figura 6.13 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume dos pares de fricção pino metálico-disco de C-PPS, para as duas cargas normais aplicadas.....	136
Figura 6.14 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume dos pares de fricção pino metálico-disco de C-EPX, para as duas cargas aplicadas.....	137
Figura 6.15 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume do par pino-disco sob carga de 10 kgf.....	138
Figura 6.16 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume do par pino-disco sob carga de 20 kgf.....	139
Figura 6.17 - Ordenamento crescente da perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD e da taxa de desgaste conforme Archard...	140
Figura 6.18 - (a) Pino, e (b) Disco correspondentes ao par de desgaste TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 10 kgf; (c) Pino, e (d) Disco correspondentes ao par de desgaste TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf.....	142
Figura 6.19 - Possível modo de desalinhamento entre pino metálico e disco compósito durante os ensaios de deslizamento PSD.....	144
Figura 6.20 - (a) Pino, e (b) Disco correspondentes ao par de desgaste TI / PPS ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf.....	145
Figura 6.21 - Ordenamento crescente da perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD. São indicados apenas os seis pares pino-disco escolhidos para a continuidade do estudo.....	146
Figura 6.22 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (1) PH-EPX-25-10: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	149
Figura 6.23 - (a) e (b) Espectros de absorção da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.22, respectivamente nas regiões compreendidas pelos	

quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura): (c) Mapeamento de elementos químicos na região que abrange toda aquela compreendida pelo quadrado amarelo.....	150
Figura 6.24 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (4) PH-PPS-25-10: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	154
Figura 6.25 - (a) e (b) Espectros de absorção da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.24, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura): (c) Mapeamento de elementos químicos na região que abrange toda aquela compreendida pelo quadrado amarelo.....	155
Figura 6.26 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (8) AL-EPX-25-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	157
Figura 6.27 - (a) e (b) Espectros de absorção obtidos da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.26, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (região escura).....	158
Figura 6.28 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (11) AL-PPS-25-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	161
Figura 6.29 - (a) e (b) Espectros de absorção da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.28, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura): (c) Mapeamento de elementos químicos na região que envolve a área compreendida pelo quadrado amarelo.....	162
Figura 6.30 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (21)	

TI-EPX-100-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	164
Figura 6.31 - Espectro de absorção obtido da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.30, na região delimitada pelo quadrado verde.....	164
Figura 6.32 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (24) TI-PPS-100-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	167
Figura 6.33 - (a) e (b) Espectros de absorção obtidos da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.32, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura na raiz do chanfro gerado por desgaste abrasivo).....	168
Figura 6.34 - Perfil de rugosidade da superfície de desgaste do pino de aço PH quando friccionado contra o disco rotativo de compósito C-EPX, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (1) PH-EPX-25-10, em ensaio realizado à temperatura ambiente e sob uma carga de 10 kgf.....	169
Figura 6.35 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (1) PH-EPX-25-10: (a) Macro; (b-d) Diversas magnificações de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem....	170
Figura 6.36 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.35d e compreendida pelo quadrado amarelo.....	172
Figura 6.37 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (4) PH-PPS-25-10: (a) Macro; (b-d) Diversas magnificações de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem....	173
Figura 6.38 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma	

porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.37d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.....	174
Figura 6.39 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (8) AL-EPX-25-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.....	175
Figura 6.40 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.39d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.....	176
Figura 6.41 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (11) AL-PPS-25-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem....	178
Figura 6.42 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.41d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.....	179
Figura 6.43 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (21) TI-EPX-100-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem....	181
Figura 6.44 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.43d, na região compreendida pelo quadrado amarelo	182
Figura 6.45 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (24) TI-PPS-100-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem....	183
Figura 6.46 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma	

porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrado na Figura 6.45d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.....	185
Figura 6.47 - Potenciais correlações de dados de desgaste versus rugosidade para pinos e discos pertencentes a pares de fricção selecionados conforme critério estabelecido na Fig.6.21.....	188
Figura 6.48 - Correlações de desgaste volumétrico entre pinos e correspondentes discos para todos os pares de fricção deste estudo. Dados extraídos da Fig.6.1a.....	189
Figura 6.49 - Correlação de dados de rugosidade superficial de pares de fricção pino-disco para alguns dos ensaios realizados neste estudo.....	189
Figura 6.50 - Perfil de rugosidade das superfícies de desgaste do disco de compósito C-EPX contra o pino de aço PH, o que corresponde ao par de desgaste classificado como código (1) PH-EPX-25-10, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 10 kgf.....	190
Figura 6.51 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (1) PH-EPX-25-10 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	192
Figura 6.52 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (4) PH-PPS-25-10 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV). (b,c) Correspondem a ampliações da imagem contida na elipse tracejada verde; (d,e) À elipse amarela.....	195
Figura 6.53 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (8) AL-EPX-25-20 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	198
Figura 6.54 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos	

originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (11) AL-PPS-25-20 na Figura 6.21: Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	199
Figura 6.55 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (21) TI-EPX-100-20 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	203
Figura 6.56 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (24) TI-PPS-100-20 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	204
Figura 6.57 - Curvas de carga ou força normal (FN) aplicada ao disco CMP	207
Figura 6.58 - Estados iniciais de desgaste na superfície do disco compósito após cerca de 450 revoluções.....	209
Figura 6.59 - Resultados da evolução da força de fricção (FF) no tempo para diversas posições angulares ao longo da trilha circunferencial de desgaste do disco CMP.....	210
Figura A1 - Relógio termo-higrômetro usado para a aferição da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar.....	225
Figura A2 - Balança comum empregada para a medição de massa dos pesos utilizados nas aplicações das cargas de desgaste.....	225
Figura A3 - Balança de precisão utilizada para a medição de massa dos discos e pino, antes e após os ensaios de desgaste.....	226
Figura B1 - Suporte de fixação do pino metálico de desgaste.....	227
Figura B2 - Suporte de fixação do disco compósito de desgaste.....	227
Figura C1 - Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de aço PH; (b) Do disco de compósito C-PPS, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 10 kgf....	228
Figura C2 - Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Al; (b) Do disco de compósito C-EPX, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 20 kgf....	229
Figura C3 - Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino	

	de liga-Al; (b) Do disco de compósito C-PPS, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 20 kgf....	230
Figura C4 -	Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Ti; (b) Do disco de compósito C-EPX, em ensaio realizado a 100°C sob uma carga de 20 kgf.....	231
Figura C5 -	Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Ti; (b) Do disco de compósito C-PPS, em ensaio realizado a 100°C sob uma carga de 20 kgf.....	232

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens do uso de ligas-Al na indústria aeronáutica.....	38
Tabela 2.2 - Comparação entre materiais compósitos poliméricos avançados e ligas metálicas convencionais de aplicação aeronáutica.....	48
Tabela 2.3 - Confronto entre as características típicas de laminados CMPs e de ligas metálicas relativamente ao seu desempenho mecânico e após a introdução de danos.....	48
Tabela 3.1 - Composições químicas, determinada para a liga-Al 7475-T7351 ensaiada e requerida pela especificação SAE-AMS 2355.....	93
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática da liga-Al segundo a orientação longitudinal da placa.	93
Tabela 3.3 - Composições químicas, determinada para a liga-Ti6Al4V ensaiada e requerida pela especificação SAE-AMS 4911.....	96
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática da liga-Ti segundo a orientação longitudinal da placa.	96
Tabela 3.5 - Composições químicas, determinada para o aço PH 15-5 ensaiado e requerida pela especificação SAE-AMS 5862.....	98
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática o aço PH 15-5 segundo a orientação longitudinal da placa.....	99
Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas básicas em flexão lenta sob três pontos do laminado C-EPX à temperatura ambiente.....	103
Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas básicas em flexão lenta sob três pontos do laminado C-PPS à temperatura ambiente.....	104
Tabela 6.1 - Pares de fricção apresentando, respectivamente, os melhores e os piores desempenhos em desgaste nas várias condições de ensaio de deslizamento PSD.....	124
Tabela 6.2 - Valores de rugosidade Ra mensurados nas superfícies de desgaste dos pinos metálicos (destaque em vermelho)	

	friccionados contra discos CMP em ensaios de deslizamento PSD.....	168
Tabela 6.3 -	Valores de rugosidade Ra mensurados nas superfícies de desgaste dos discos CMP (destaque em azul) friccionados contra pinos metálicos em ensaios de deslizamento PSD.....	186
Tabela 6.4 -	Condições de ensaio de desgaste por deslizamento entre pino (fixo e de aço) e disco (rotativo e de C-PPS) de Quintelier et al (2006) e do presente trabalho.....	206

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
AL	Alongamento, Alumínio
AMS	American Metals Society
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbono
Cdp	Corpo de prova
CFC	Cúbica de face centrada
CF	Coeficiente de fricção
CMP	Compósito de matriz polimérica
CYS	Limite de escoamento em compressão
d	Diâmetro
D	Disco
DG	Desgaste
E	Módulo de elasticidade (rigidez)
EDX	Energia dispersiva de raios-X
EMB	Embraer
END	Ensaio não-destrutivo
EPX	Epoxi
FAT	Fadiga de baixo e alto ciclos
FCG	Crescimento de trinca por fadiga
FF	Força de fricção
FN	Força normal
FT	Tenacidade à fratura
F3P	Flexão em três pontos
GGM	Grande Guerra Mundial
h(x)	Função altura
HV	Dureza Vickers
K _s	Taxa de desgaste
L	Distância percorrida em desgaste; orientação longitudinal
LMF	Laminado metal-fibra
LT	Longitudinal-transversal

L_0	Comprimento útil inicial
m	Massa
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MIB	Materials Institute of Brazil
n	Número de camadas de pré-impregnado compósito
P	Carga aplicada, Pino
PH	Precipitation Hardened
PEEK	Poli-Éter-Éter-Cetona
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PPS	Poli-Sulfeto-de-Fenileno
PSD	Pino-sobre-disco
r	Radial
R	Rotação
R_a	Rugosidade superficial
RA	Redução de área
RF	Resistência máxima em flexão
RPM	Rotações por minuto
R^2	Coeficiente de determinação
RA	Redução de área
S	Vão entre pontos de apoio no ensaio F3P, orientação transversal curta
SAE	Society for Automotive Engineers
SE	Limite de escoamento em tração
SR	Limite de resistência em tração
SS	Resistência ao cisalhamento
t	Espessura do laminado, tempo
T	Orientação transversal
TCM	Tenacidade em carga máxima
TI	Titânio
TS	Resistência máxima em tração
V	Volume
w	Largura
x,y,z	Coordenadas cartesianas
1D, 2D, 3D	Uni, bi e tri-mensionais

α, β	Fases metálicas
Δm	Perda de massa
ΔV	Perda de volume
ϵ_{CM}	Deformação em carga máxima
θ	Ângulo com relação à direção principal de carregamento
ρ	Densidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	31
1.1 Motivação.....	31
1.2 Objetivo.....	34
1.3 Organização e Conteúdo do Trabalho.....	34
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	36
2.1. Materiais de Construção Aeronáutica.....	36
2.1.1 Considerações Iniciais.....	36
2.1.2 Ligas Metálicas.....	37
2.1.2.1 Ligas de Alumínio.....	37
2.1.2.2 Ligas de Titânio.....	39
2.1.2.3 Aços PH.....	43
2.1.3 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica (CMP).....	44
2.1.3.1 Compósitos Poliméricos de Matriz Termorrígida.....	50
2.1.3.2 Compósitos Poliméricos de Matriz Termoplástica.....	52
2.1.3.3 Processos de Fabricação de Laminados Sólidos.....	53
2.1.3.4 Aplicações na Indústria Aeronáutica.....	58
2.2 Desgaste e Tribologia.....	60
2.2.1 Definições.....	60
2.2.2 Desgastes Abrasivo e Adesivo.....	62
2.2.3 Desgaste de Pares de Fricção Metal / CMP.....	64
2.2.3.1 Considerações Iniciais.....	64
2.2.3.2 Juntas Mecânicas de Laminados CMP.....	65
2.2.3.3 Mecanismos de Desgaste em CMPs Fibrosos.....	75
2.2.3.4 Ensaio de Desgaste Via Deslizamento Pino-Sobre-Disco.....	80
2.2.3.5 Efeitos de Algumas Variáveis no Desgaste de Laminados CMPs.....	83
2.2.3.5.1 Considerações Iniciais.....	83
2.2.3.5.2 Teor de Fibras de Reforço.....	84
2.2.3.5.3 Carga Mecânica Aplicada.....	86
2.2.3.6 Medidas de Taxa de Desgaste.....	87
2.2.3.7 Algumas Considerações com Relação aos Metais.....	87
2.2.3.8 Filmes de Transferência entre Pares de Desgaste por Fricção Metal / CMP.....	89
3 MATERIAIS.....	92

3.1 Ligas Metálicas Monolíticas Estruturais.....	92
3.1.1 Considerações Iniciais.....	92
3.1.2 Liga de Alumínio.....	92
3.1.3 Liga de Titânio.....	95
3.1.4 Aço PH.....	97
3.2 Laminados Compósitos Poliméricos.....	99
3.2.1 Considerações Iniciais.....	99
3.2.2 Carbono-Epoxi.....	100
3.2.3 Carbono-Poli(Sulfeto de Fenileno).....	103
4 CORPOS DE PROVA.....	105
4.1 Ligas Metálicas (Pinos).....	105
4.2 Laminados Compósitos (Discos).....	106
5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL E ANALÍTICO.....	108
5.1 Ensaios de Desgaste por Deslizamento Pino-Sobre-Disco.....	108
5.2 Cálculo da Perda de Volume por Desgaste.....	112
5.3 Cálculo da Taxa de Desgaste.....	112
5.4 Condições e Variáveis do Ensaio de Desgaste e Códigos de Identificação dos Pares de Fricção.....	112
5.5 Medidas de Rugosidade Superficial.....	115
5.6 Microscopia Eletrônica e Micro-Análise Química.....	118
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	120
6.1 Desgaste dos Pares de Fricção Pino-Disco.....	120
6.1.1 Comportamento Geral.....	120
6.1.2 Efeito da Carga Aplicada ao Pino.....	124
6.1.3 Efeito da Temperatura de Ensaio.....	132
6.2 Taxas de Desgaste.....	139
6.3 Análise da Superfície de Desgaste dos Pinos.....	147
6.4 Análise das Trilhas de Desgaste dos Discos.....	169
6.5 Análise dos Produtos de Desgaste.....	191
6.6 Comparação com Resultados da Literatura.....	205
7 CONCLUSÕES.....	213
8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	215

REFERÊNCIAS.....	216
APÊNDICE A.....	224
APÊNDICE B.....	227
APÊNDICE C.....	228

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A Área de Materiais Compósitos (ou Compostos) tem se desenvolvido continuamente nestas últimas décadas, motivada principalmente pela crescente aplicação em setores que exigem materiais de alto desempenho mecânico aliado a uma baixa densidade.

Por exemplo, os materiais compósitos de matriz polimérica (CMP) fortalecidos com fibras contínuas (e.g., carbono, vidro, aramida) satisfazem plenamente os requisitos básicos de alta resistência mecânica e alta rigidez específicas (i.e., altas relações resistência/densidade e rigidez/densidade) demandados pela indústria aeronáutica, em especial a civil (ou comercial), em que os veículos atualmente operam somente no regime de velocidades subsônicas.

Os laminados sólidos de resina epóxi reforçada com fibras de carbono dominaram por longo tempo esta indústria da mobilidade, tanto na construção das estruturas ditas secundárias (e.g., superfícies de controle, radôme e acabamentos aerodinâmicos), como mais atualmente, e também, das chamadas estruturas primárias, de altíssima responsabilidade (e.g., asas, empenagens e fuselagens).

Entretanto, os laminados CMP com resinas termoplásticas vêm conquistando cada vez mais espaço na indústria aeronáutica, em especial por apresentarem maior tolerância a danos (i.e., capacidade de convivência com danos em serviço) causados particularmente por impacto e/ou fadiga, bem como, e tão importante

quanto, pelas maiores facilidades de reparo e de união entre as diversas partes que compõem uma estrutura. Dentre estes “plásticos” ou polímeros termoformáveis de alto desempenho, destaca-se o poli-sulfeto de fenileno (PPS), que exibe, além de rigidez superior entre seus concorrentes mais diretos, uma ótima resistência química a solventes e fluidos hidráulicos, o que é uma condição altamente desejável para os materiais de construção aeronáutica. Ademais, o PPS possui muito boas propriedades sob temperatura e umidade elevadas, superando o desempenho da imensa maioria dos *grades* de resinas termorrígidas epoxi.

De fato, quando da entrada em serviço de um componente ou estrutura aeronáutica, estes são expostos a uma variedade de condições ambientais associadas a diversos tipos de carregamentos mecânicos. Dentre os principais agentes ambientais com os quais convivem as aeronaves, destacam-se: temperatura, umidade relativa do ar, radiações ultravioleta e infravermelha, fluidos hidráulicos, degelantes, além de atmosferas salinas, básicas e ácidas. No que se refere aos esforços mecânicos, fadiga, impacto, cisalhamento, tração, compressão, torção e flexão devem ser criteriosamente considerados em projetos de estruturas aeronáuticas para fins de seleção de materiais e construção de aeronaves.

Uma questão nem sempre enfatizada quanto às condições reais de serviço em que atuam os materiais de construção aeronáutica, e nem por isso menos importante do que as destacadas no parágrafo anterior, é a do íntimo contato físico mantido entre materiais de naturezas diversas, como decorrência de questões de projeto e de montagem de componentes estruturais. Exemplo típico é a união mecânica de dois ou mais componentes (confeccionados em CMP) por meio de rebites, parafusos ou pinos (ou seja, prendedores de um modo geral), que é ainda o recurso mais freqüentemente empregado neste setor da indústria da mobilidade,

haja vista sua maior simplicidade e confiabilidade se comparada a outros modos de junção, tais como a co-cura, a co-consolidação e a colagem.

Nas juntas mecânicas, entram em contato direto e permanente materiais possuindo as mais diversas características físicas, químicas e mecânicas.

A corrosão pela geração de um par galvânico, por exemplo, em juntas de laminados sólidos compósitos fortalecidos com fibras de carbono e unidos por prendedores de liga de alumínio é um fenômeno já bastante conhecido na literatura, e já foi definitivamente abolido das práticas de construção naval e aeronáutica. Ligas de titânio, devido à sua maior compatibilidade (ou seja, maior proximidade na série de força eletro-motriz em ambiente salino) com as fibras de carbono, são, neste sentido, amplamente empregadas em tais circunstâncias, minimizando, retardando, ou mesmo impedindo a degradação eletro-química de um e de outro elemento da junta.

Entretanto, com relação ao aspecto mecânico de desgaste em juntas mecânicas compósitas, visto haver, em maior ou menor grau um movimento relativo entre as diversas superfícies em contato, poucos trabalhos têm se dedicado ao tema, e o presente projeto de pesquisa busca contribuir para um melhor entendimento do comportamento tribológico entre os possíveis pares de fricção envolvendo materiais metálicos e laminados compósitos poliméricos empregados na indústria de construção aeronáutica.

1.2 Objetivo

Objetiva-se na presente Dissertação de Mestrado avaliar o comportamento de desgaste de laminados CMPs termorrígido e termoplástico (na forma de discos) deslizando contra ligas metálicas estruturais (na forma de pinos), ou seja, através de ensaios de deslizamento pino-sobre-disco (PSD).

Pretende-se, desta forma, gerar subsídios para um estudo mais amplo no futuro acerca do fenômeno de desgaste em juntas mecânicas híbridas unindo laminados CMPs e placas de ligas metálicas estruturais, empregando-se prendedores destas duas classes de materiais de grau aeronáutico.

1.3 Organização e Conteúdo do Trabalho

No Capítulo 1 destacam-se a importância e a motivação proporcionada pelo tema da presente Dissertação, além dos principais objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 realiza-se a revisão da literatura sobre os principais requisitos de projeto mecânico de aeronaves, o uso de laminados CMPs e de ligas metálicas nesta indústria de construção, enfatizando-se, de maneira sucinta, as suas vantagens e desvantagens, os principais processos de manufatura dos CMPs, e relatando-se os mecanismos de desgaste a que estes materiais estão potencialmente sujeitos em serviço.

No Capítulo 3 detalham-se os materiais avaliados no estudo.

No Capítulo 4 descreve-se a geometria dos corpos de prova empregados nos ensaios de deslizamento PSD.

No Capítulo 5 descrevem-se os procedimentos experimentais e analíticos empregados na determinação da perda de volume por desgaste dos pares de materiais durante os ensaios PSD, bem como na caracterização dos materiais após os ensaios mecânicos.

No Capítulo 6 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na pesquisa, utilizando-se os princípios e conceitos abordados no Capítulo 2 de revisão bibliográfica.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões finais do estudo, enquanto que no Capítulo 8 são sugeridos possíveis trabalhos futuros no tema em questão.

Finalmente, são citadas as fontes e as referências consultadas para a confecção desta Dissertação de Mestrado, bem como fornecidos apêndices contendo material de suporte para o texto principal.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Materiais de Construção Aeronáutica

2.1.1 Considerações Iniciais

A Figura 2.1 ilustra os principais requisitos de propriedades mecânicas demandados pelos elementos estruturais mais importantes de uma aeronave comercial de grande porte.

As classes de materiais mais indicadas para a confecção destes elementos são as ligas metálicas monolíticas, materiais mais tradicionais da indústria aeronáutica, e os chamados materiais compósitos (em especial os de matriz polimérica), tecnologicamente mais avançados que os primeiros, e que são também detalhados na sequência do texto.

Continua

Continuação

Figura 2.1 - Principais critérios de projeto e de seleção relativamente às propriedades mecânicas de materiais de construção aeronáutica, conforme o componente estrutural de interesse (Adaptado de Niu, 1988 & 1992). FAT = fadiga de baixo e alto ciclos, FCG = crescimento de trinca por fadiga, FT = tenacidade à fratura, TS = resistência máxima à tração (ou limite de escoamento em tração), CYS = limite de escoamento em compressão, E = módulo de elasticidade, SS = resistência ao cisalhamento.

2.1.2 Ligas Metálicas

2.1.2.1 Ligas de Alumínio

Ligas de alumínio de alta resistência são os materiais mais tradicionalmente utilizados na fabricação de aeronaves de pequeno, médio e grande portes. Além de boa resistência à fadiga, estas ligas leves exibem atrativas razões de resistência mecânica/densidade e rigidez/densidade. Nunca é demais mencionar que elevadas propriedades específicas constituem uma condição primordial para uma adequada eficiência em vôo das aeronaves comerciais, especialmente sob o ponto de vista econômico (leia-se margem de lucro das empresas aéreas).

Um balanço de vantagens e desvantagens das ligas de Al é fornecido na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens do uso de ligas-Al na indústria aeronáutica (Martin & Evans, 2000).

Vantagens	Desvantagens
Altas resistência e rigidez específicas	Relativamente baixo limite de escoamento
Limite de resistência e módulo de elasticidade aceitáveis	Relativamente baixas dureza e resistência ao desgaste
Tratáveis termo-mecanicamente (i.e., trabalháveis e envelhecíveis)	Baixa temperatura de fusão
Ampla gama de variedade de propriedades mecânicas	Baixa temperatura de uso (sob risco de superenvelhecimento)
Custo relativamente baixo por unidade de massa	—

Ligas de alumínio são utilizadas na fabricação de vários componentes estruturais aeronáuticos, conforme mostra a Figura 2.2, incluindo asas, fuselagens e trens de pouso.

Figura 2.2 - Componentes estruturais aeronáuticos tipicamente confeccionados em ligas-Al. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=10>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

As duas famílias de ligas de alumínio mais utilizadas no campo aeronáutico são as das séries 2XXX (caracterizada por boas propriedades de resistência à fadiga e de tolerância a danos), em que o principal elemento de liga é o Cu, e 7XXX (notabilizada pelas elevadas resistências mecânicas à tração e à compressão, ou seja, resistência a danos), em que o Zn é o principal responsável pelos mecanismos de fortalecimento com base na precipitação de segundas fases.

A estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) destas ligas garante um desempenho sob impacto relativamente pouco dependente da temperatura, além de proporcionar boas conformabilidade e ductilidade, mesmo após a etapa de envelhecimento (*ageing*) em que o material desenvolve resistência mecânica.

As ligas-Al mais recentemente desenvolvidas são variantes das antigas séries 2024 e 7075, respectivamente, porém com um controle mais apurado dos parâmetros de composição química e de processamento, tentando compensar algumas deficiências apresentadas por suas predecessoras (i.e., resistência mecânica das 2XXX, e tenacidade à fratura das 7XXX).

2.1.2.2 Ligas de Titânio

A excelente resistência específica das ligas de titânio, muito superior à das ligas-Al, em especial em temperaturas bem acima da ambiente (Figura 2.3), é o principal fator que conduziu, ao final da 2ª GGM, à sua ampla e crescente aplicação na indústria aeroespacial. Isto, apesar dos custos elevados para a extração e a redução dos seus minérios, bem como dos custos de processamento mecânico,

notadamente com relação à etapa de usinagem, haja vista sua baixa condutividade térmica, alta afinidade química com os materiais utilizados em ferramentas de corte e elevada reatividade com oxigênio em temperaturas acima de 400°C.

Figura 2.3 - Grande superioridade das ligas-Ti no quesito de limite de resistência específica ao escoamento, frente a outras ligas aeronáuticas (Adaptado de Niu, 1988 & 1992).

As aplicações das ligas-Ti são as mais diversas nas aeronaves, sendo geralmente empregadas sob altas temperaturas de serviço, em solicitações extremas e em ambientes severos, visto sua elevada resistência à corrosão sob tensão em ambientes salinos, notável vida em fadiga, ótima conformabilidade plástica e relativamente elevada rigidez. Entretanto, seu uso é fortemente limitado por seu alto custo relativamente aos materiais metálicos concorrentes, quais sejam, as ligas de alumínio e os aços especiais.

A economia de peso resultante do uso de ligas-Ti em várias aplicações são limitadas pelo volume ocupado pelo componente estrutural, ao invés dos mais resistentes, porém mais pesados aços, e das mais leves, porém menos resistentes ligas-Al, pode ser bastante significativa. Tipicamente, contudo, as ligas-Ti substituem

ligas processadas de alumínio onde o espaço é muito limitado (e.g., vigas do trem de pouso e conchas de reversores).

Sua boa compatibilidade com os materiais compósitos em ambientes salinos, em virtude de seu potencial galvânico e de seu coeficiente de expansão térmica muito próximos aos das fibras de carbono, fazem das ligas-Ti materiais ideais para a confecção de prendedores de laminados CMP fortalecidos com filamentos de carbono.

Três tipos de ligas de titânio, com base na composição da liga e da fase resultante predominante à temperatura ambiente, são usadas no meio aeronáutico:

(i) ligas α e quase- α , que são não-envelhecíveis, soldáveis, com boa conformabilidade, e apresentam resistências mecânica e à fadiga relativamente elevadas; (ii) ligas β , que exibem elevada conformabilidade, são endurecíveis por precipitação, possuem alta resistência mecânica, são soldáveis e desenvolvem uma ampla gama de propriedades via tratamento térmico, permitindo a escolha de uma combinação mais desejada de resistência mecânica e tenacidade à fratura, além de manterem elevada resistência à corrosão; e (iii) ligas α - β , apresentando máxima associação entre resistência mecânica, conformabilidade e baixa densidade, sendo versáteis e tratáveis termicamente, além de perfeitamente soldáveis, com alta resistência à fluência, exibindo uniformidade de propriedades, ótima resistência à propagação de trincas de fadiga, assim como uma boa tenacidade à fratura.

A manipulação do conteúdo e da forma microestrutural das fases α e β , através de elementos de liga e processamento termo-mecânico, constitui a base fundamental para a otimização das ligas-Ti (Martin & Evans, 2000; New Materials, 1996; Materials Research, 1993; Aeronautical Technologies, 1992).

A Figura 2.4 mostra algumas das principais aplicações de ligas de titânio na indústria aeronáutica civil.

Figura 2.4 - Uso de ligas-Ti em componentes de turbina a jato, trens de pouso, superfícies de controle, dutos hidráulicos, prendedores e nacela. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=15>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

2.1.2.3 Aços PH

Os aços PH (*precipitation hardened steel*) são inoxidáveis e passíveis de fortalecimento da matriz ferrosa por meio dos mecanismos de solução sólida, reação martensítica e envelhecimento alcançados por tratamentos térmicos, e/ou via processamento mecânico (por encruamento), desenvolvendo ótimas propriedades específicas, a despeito do seu baixo teor de carbono.

De forma geral, em decorrência da presença de Ni os aços PH combinam uma resistência à corrosão equivalente à dos aços austeníticos AISI 304 e 316, com propriedades mecânicas elevadas, comparáveis, devido ao Ni, àquelas dos aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 e 440.

Na condição de solubilizados, estes aços são de fácil usinagem. Como o envelhecimento é subsequente realizado em temperaturas relativamente baixas, garante-se uma variação dimensional modesta, livre de distorções, trincas e descarbonetação.

Em termos microestruturais, os PHs são caracterizados em 3 grupos (Martin & Evans, 2000; New Materials, 1996; Materials Research, 1993; Aeronautical Technologies, 1992), a saber: (i) martensíticos, que exibem elevada estabilidade dimensional, possuem excelente resistência à corrosão e à oxidação, podem ser tratados em temperaturas relativamente baixas, e apresentam alta resistência mecânica e outras propriedades atraentes a elevadas temperaturas, tal como alta tenacidade à fratura; (ii) austeníticos, com alta resistência mecânica, moderada resistência à corrosão e boa conformabilidade; e (iii) semi-austeníticos, com alta

resistência mecânica e dureza, excelentes propriedades de fadiga, boa resistência à corrosão, boa maleabilidade, e distorção mínima no tratamento térmico.

Em geral, o processo de fortalecimento dos PHs segue o roteiro solubilização $\Rightarrow$ têmpera $\Rightarrow$ envelhecimento, analogamente ao que se realiza nas ligas-Al e de Ti anteriormente mencionadas.

Devido à alta resistência dos aços inoxidáveis PH, a maioria das aplicações aeroespaciais inclui engrenagens, fixadores, válvulas, eixos de alta resistência de rotores e compressores, além de outros componentes de motor a jato, blindagens térmicas e elementos estruturais de trens de pouso (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Emprego de aços PH em componentes turbinas a jato e em partes de trens de pouso. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=22>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

2.1.3 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica (CMP)

Muitas estruturas atuais requerem materiais com combinações de propriedades não usualmente satisfeitas pelas ligas metálicas, pelos materiais cerâmicos e poliméricos convencionais, os quais são genericamente denominados

materiais monolíticos. Várias estruturas da construção aeronáutica necessitam exibir baixo peso, alta resistência, elevada rigidez, além de resistência à abrasão e ao impacto. O acelerado desenvolvimento de materiais compósitos, associado à sua disponibilização em relativamente larga escala comercial, em especial nestas duas últimas décadas, tem propiciado aos projetistas novas alternativas para satisfazer as demandas supracitadas, fornecendo-lhes um novo e vasto leque de possibilidades (Soutis, 2005). No campo aeronáutico, tem havido uma grande expansão do uso destes materiais, em especial os de matriz polimérica (CMP), e uma projeção de utilização continuamente acelerada dos mesmos é mostrada (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Uso de materiais compósitos (% em massa estrutural) no passado, no presente e projeção futura na indústria aeronáutica. Adaptado de fonte na internet. Acesso em: 05 nov. 2008.

Callister (2003) define “compósito” como um material multifásico, elaborado artificialmente, cujas fases constituintes são quimicamente diferentes entre si, insolúveis umas nas outras e separadas por uma interface distinta e bem definida, exibindo propriedades otimizadas frente às aquelas apresentadas pelas fases

individuais. Em termos mecânicos, essas fases são basicamente denominadas matriz e reforço.

Compósitos para aplicações estruturais geralmente utilizam fibras como agentes de fortalecimento e tenacificação. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas (estas últimas sendo curtas ou longas), alinhadas em uma, duas ou mais orientações no componente, ou aleatoriamente dispostas no mesmo, podendo ser industrialmente obtidas em uma variedade de formas, tais como fitas, mantas e pré-formas têxteis de diferentes arquiteturas ou arranjos 1D, 2D e 3D. Como componente matricial, os polímeros são, de longe, os materiais mais utilizados, em especial na indústria aeronáutica, devido à sua leveza e relativamente fácil manufatura na forma de componentes estruturais. Em relação ao peso, os materiais compósitos poliméricos apresentam propriedades mecânicas específicas, ou seja, com relação à densidade (i.e., numa base de massa unitária), que podem exceder substancialmente às dos metais.

As funções básicas da matriz em um material compósito fibroso são:

- (i) Posicionar e manter as fibras numa disposição adequada.
- (ii) Garantir o arranjo e o grau de estiramento e alinhamento apropriados das fibras de reforço.
- (iii) Transferir a carga externamente aplicada para as fibras internalizadas.
- (iv) Determinar as propriedades elétricas, comportamento químico e desempenho sob elevadas temperaturas do compósito.
- (v) Proteger as fibras contra danos superficiais resultantes da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente (corrosão/oxidação),

seja durante a fabricação ou mesmo ao longo da vida em serviço do material compósito.

Os compósitos reforçados com fibras contínuas são os que apresentam o melhor desempenho mecânico, muito superior aos de fibras longas, e mais ainda relativamente aos de fibras curtas, estes últimos se aproximando dos compósitos ditos particulados. Tal fato está intrinsecamente relacionado à capacidade de transferência de carga da matriz às fibras, e que cresce exponencialmente com o comprimento destas últimas (Callister, 2003; Fu et al, 1999). Além disso, postula-se que o maior número de extremidades de fibras presentes no material atue como concentrador de tensão, inserindo tensões cisalhantes na interface, sendo potenciais iniciadores de trincas (Silva & Spinelli, 2003).

Desta forma, para aplicações estruturais de alta responsabilidade, tal como na indústria de construção aeronáutica, materiais compósitos reforçados por fibras contínuas são invariavelmente empregados, embora na indústria automotiva ocorra ampla aplicação das fibras curtas e longas.

A Tabela 2.2 compara as principais vantagens e desvantagens dos CMPs quando empregados na confecção de estruturas aeronáuticas. A Tabela 2.3 compara as características das classes de materiais estruturais metálicos e compósitos, que estão intimamente vinculadas ao desempenho mecânico dos mesmos em serviço.

Tabela 2.2 - Comparação entre materiais compósitos poliméricos avançados e ligas metálicas convencionais de aplicação aeronáutica (Niu, 1988 & 1992).

Vantagens dos CMPs	Desvantagens
Menos densos	Mais caros
Resistência à corrosão	Restrita quantidade de dados estabelecidos e confiáveis de projeto (<i>allowables</i>) e em serviço
Resistência à fadiga	Corrosão dos prendedores metálicos
Mínima usinagem requerida	Degradação em ambientes suficientemente úmidos e quentes
Seções e contornos complexos facilmente fabricados	Relativamente baixa resistência a impactos
Orientação preferencial da resistência e rigidez na(s) direção(ões) necessária(s)	Requer proteção contra descargas elétricas
Número reduzido de montagens e de prendedores	Métodos de inspeção complexos e caros
Absorvem microondas de radar (efeito stealth)	Imprecisão na detecção de defeitos de colagem
Expansão/contração térmicas próximas de zero	Imprecisão na localização de defeitos

Tabela 2.3 - Confronto entre as características típicas de laminados CMPs e de ligas metálicas relativamente ao seu desempenho mecânico e após a introdução de danos (Niu, 1988 & 1992).

Característica	Metal	CMP
Comportamento tensão-deformação	Alta deformação para a fratura	Baixa
Sensibilidade ao entalhe	Relativamente baixa	Relativamente alta
Susceptibilidade ao ambiente	Relativamente insensível	Afetado pela temperatura e umidade
Principais causas de danos	Fadiga, corrosão, corrosão sob tensão, corrosão-fadiga	Impacto em serviço e defeitos de fabricação
Condição crítica de carregamento quanto à tolerância a danos	Tração	Compressão
Detectabilidade do dano anteriormente à falha	Geralmente visual	Requer END (freqüentemente não-visível)
Previsibilidade da integridade estrutural	Boa	De má a inexistente
Experiência em serviço	Extensiva	Ainda limitada

Para resistir aos carregamentos bi-, tri- ou multiaxiais no plano, são geralmente utilizados compósitos laminados, formados pela união de várias lâminas individuais com diferentes orientações preferenciais, em geral 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° , onde 0° corresponde, em princípio, à direção de carregamento mais crítico do componente em serviço. A Figura 2.7 mostra um exemplo de componente primário (asa) de aeronave militar quase que integralmente construído em material compósito reforçado com fibras contínuas. Observa-se que, pela manipulação da disposição das fibras de reforço, é possível contrapor os principais esforços mecânicos atuando no componente estrutural sob condições normais de operação em serviço.

Figura 2.7 - (a) Diferentes tipos de esforços mecânicos atuando numa asa de aeronave; (b) Disposições preferenciais das fibras de maneira a resistir mais adequadamente (a chamada otimização da resistência global) aos esforços aplicados em serviço (Adaptado de Hoskin & Baker, 1986).

2.1.3.1 Compósitos Poliméricos de Matriz Termorrígida

De acordo com Lucato & Fernandes (1991), as resinas epoxi apresentam várias vantagens para o desenvolvimento de projetos estruturais de alto desempenho, tais como, por exemplo: ampla faixa de viscosidades, o que facilita a moldagem; baixa contração, evitando o desenvolvimento de tensões residuais; possibilidade de cura à temperatura ambiente, o que reduz os custos da produção; alto módulo de elasticidade, possibilitando a confecção de componentes de elevada rigidez, além de uma boa compatibilidade térmica, química e mecânica com fibras de carbono. Entretanto, estas resinas termofixas não são re-consolidáveis (reparáveis) nem, a rigor, recicláveis.

Com o intuito de sanar, ou minimizar uma das limitações típicas dos laminados compostos carbono-epoxi, que é a sua resistência a impactos transversais relativamente baixa (Shin & Wang, 2002; Wang & Shin, 2002; Azouaoui et al, 2001; Revuelta et al, 2000; Whitworth, 2000, Kang & Kim 2000), grandes avanços tecnológicos vêm sendo obtidos no desenvolvimento de resinas epoxi tenacificadas pela mistura química ou física de um segundo elemento, como por exemplo, adicionando-se elastômeros no estado líquido, que, inicialmente, se mantêm completamente miscíveis com a matriz epoxi, e, durante a cura, originam uma segunda fase na microestrutura. Outra possibilidade de tenacificação é através da mistura direta da borracha já pré-formada à resina epoxi, no momento em que esta última está sendo polimerizada a partir de seus precursores (Ratna & Banthia, 2004).

Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como alta estabilidade térmica, elevada rigidez, elevada estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico, resistência à fluência, dentre outras.

As resinas epóxi são mais caras que os poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas, também muito utilizadas em aplicações aeroespaciais, porém, em contrapartida, elas possuem melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade e à temperatura.

Exemplo nobre do ainda amplo potencial de uso estrutural dos laminados compósitos do sistema carbono-epoxi é a novíssima aeronave comercial B787, esquematizada na Figura 2.8, que entrará em serviço no próximo ano. Basicamente todo seu revestimento externo (*skin*) é confeccionado com este material, o que inclui estruturas primárias tais como fuselagem, asas e empenagens.

Figura 2.8 - Materiais de construção aeronáutica empregados na fabricação do novo Boeing 787 (Boeing Co.). São indicados os percentuais em massa de utilização dos materiais na aeronave. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=25>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

2.1.3.2 Compósitos Poliméricos de Matriz Termoplástica

Mais recentemente, tem havido um crescente interesse em materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras contínuas. Polímeros termoplásticos de alto desempenho provêm combinações de tenacidade e resistência à temperatura que não podem ser atingidas pela maioria das resinas termorrígidas. Entretanto, não obstante a tenacidade tipicamente elevadas dos termoplásticos melhora substancialmente a resistência dos seus compósitos laminares às falhas por delaminação, as extraordinárias propriedades dos termoplásticos de alto desempenho ainda não tem sido traduzidas em melhores desempenhos do material compósito resultante. Por exemplo, dependendo da configuração do laminado e do carregamento mecânico e ele imposto, um compósito termorrígido contendo um furo pode sustentar uma carga máxima substancialmente superior àquela suportada pelo laminado termoplástico similar concorrente, devido basicamente à capacidade dos primeiros em melhor redistribuir tensões através da geração de danos localizados em torno do furo. Isto pode ser particularmente importante em furos mecanicamente carregados (juntas mecânicas). Por outro lado, os termoplásticos podem ser processados pelo simples aquecimento acima do ponto de fusão/amolecimento e aplicando-se pressão de moldagem. Eles também podem ser repetidamente aquecidos e re-consolidados (reparados) sem significativa degradação das propriedades. Basicamente, as propriedades e características de processamento de termoplásticos de alto desempenho são resultantes de seu alto peso molecular e da estrutura molecular aromática (anel benzênico). Tais materiais oferecem potenciais vantagens de manufatura sobre os concorrentes termofixos,

incluindo rápidos tempos de ciclo, armazenagem prolongada da matéria-prima e a habilidade de ser reparado e re-consolidado. No entanto, sistemas termoplásticos são rígidos à temperatura ambiente, não possuem aderência (*tack*), tem baixa capacidade de serem dobrados e corrugados (*limited drapeability*) para se adequar aos contornos e relevos do ferramental, dificultando assim a orientação múltipla das diversas lâminas (*plies*) que constituem o laminado final. Também, as altas temperaturas de fusão associadas à alta viscosidade do fundido impõem temperaturas de processamento por vezes superiores a 400°C, e pressões de moldagem significativamente maiores que as requeridas para os termorrígidos, limitando a configuração e o tamanho dos componentes às dimensões e potência do equipamento (e do ferramental) utilizado. Grandes componentes têm sido produzidos principalmente em autoclaves, porém as vantagens de tempos mais curtos dos ciclos de fabricação dos termoplásticos são perdidas, devido às limitações de transferência de calor em processos conduzidos no interior de autoclaves.

2.1.3.3 Processos de Fabricação de Laminados Sólidos

Na indústria aeronáutica nacional ainda se destaca a moldagem em autoclave com bolsa de vácuo (*vacuum bag*), processo ilustrado na Figura 2.9 e que proporciona um grau elevado de consolidação de componentes planos e com pequena curvatura, garantindo a ausência de bolhas, porosidades ou vazios, falhas

de preenchimento e bolsões de excesso de resina pura, tanto em laminados de matrizes termorrígidas quanto de termoplásticas.

Idealmente, camadas de fibras previamente impregnadas com resina termorrígida pré-curada (oligomérica), ou semi-impregnadas com polímero termoplástico, denominadas *prepregs* e *semipreg*s, respectivamente, são cortadas e empilhadas na geometria e disposição desejada no plano, gerando uma estrutura laminar. Em seguida, elas são revestidas por uma embalagem plástica, permitindo a aplicação de vácuo, que remove o ar retido entre as camadas, e então o laminado é submetido simultaneamente a calor e pressão no interior da autoclave, num ciclo típico apresentado na Figura 2.10.

(a)

Continua

Continuação

(b)

Figura 2.9 - (a) Esquemático de uma autoclave, e (b) Processo de bolsa plástica sob vácuo (Adaptado de Niu, 1988 & 1992).

A transmissão de calor é realizada por convecção e radiação, num ambiente de trabalho pressurizado. Os pré- ou semi-impregnados permitem a produção de laminados com espessura e proporção controlada de resina, com poucos vazios, já que não é necessária a adição de polímero. O processo é capaz inclusive de produzir componentes mais complexos, que requerem a conjugação de duas ou mais partes simultaneamente, e que deve ser realizada numa única operação, a qual é denominada co-cura no caso dos termorrígidos e co-consolidação em se tratando de termoplásticos (Callister, 2003; Niu, 1988 & 1992).

Figura 2.10 - Exemplificação de ciclo de processamento termo-mecânico de laminados compósitos sólidos em autoclave com bolsa de vácuo (Adaptado de Niu, 1988 & 1992).

A simples compressão a quente (*hot compression*) das camadas empilhadas de laminados compósitos termoplásticos fortalecidos com fibras de carbono, vidro, aramida, polipropileno, dentre outras, ou mesmo uma mistura destas, pode também originar um componente plano (Figura 2.11a), ou mesmo possuindo certo grau de curvatura (Figura 2.11b). Este é um processo rápido e bastante empregado atualmente na confecção de componentes aeronáuticos e automotivos mais simples e de tamanho mediano, com espessuras variando entre 2 e 5 mm.

Figura 2.11 - Processo de consolidação por compressão a quente (*hot press*): (a) Painel plano; (b) Curvo. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=39>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

Processos mais avançados e produtivos de fabricação de estruturas laminares compósitas têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados em especial na indústria aeronáutica. Dentre eles destacam-se a colocação de fita (*tape placement*) e deposição de fibras (*fiber laying*), que são técnicas cujo princípio se aproxima bastante ao do chamado enrolamento de filamento (*filament winding*) quando aplicadas à fabricação de superfícies de revolução. Na Figura 2.12 é mostrado um exemplo em que a fuselagem da nova aeronave Boeing 787 é confeccionada por

meio do processo de colocação de fita de fibras contínuas de carbono impregnadas com resina epóxi, para posterior cura em autoclave.

Figura 2.12 - Fabricação de fuselagem de aeronave pelo processo de colocação de fita. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=45>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

2.1.3.4 Aplicações na Indústria Aeronáutica

Na Figura 2.13 é possível visualizar o relativamente grande número de aplicações dos materiais compósitos na indústria aeronáutica nacional (Embraer S/A) em um projeto já bem estabelecido (EMB145), de fato até antigo, onde se destaca a ampla aplicação de laminados carbono-epoxi em superfícies de controle tais como flapes, ailerons e freios aerodinâmicos.

Figura 2.13 - Componentes da aeronave Embraer EMB145 tipicamente confeccionados com materiais compósitos (cortesia da Embraer S/A).

Já a Figura 2.14 mostra uma vista explodida de uma aeronave mais moderna (superjumbo Airbus A380), já em operação, destacando-se componentes estruturais confeccionados em compósitos de matriz termoplástica.

Continua

Continuação

Figura 2.14 - Componentes da aeronave A380 potencialmente confeccionáveis com resina termoplástica fortalecida com fibras contínuas de alta resistência mecânica. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=51>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

2.2 Desgaste e Tribologia

2.2.1 Definições

No contexto deste trabalho, desgaste é considerado como a perda progressiva, em termos de massa ou volume, de substância da superfície de um corpo sólido em decorrência do movimento relativo contra outra superfície sólida (a qual inclusive pode também sofrer desgaste no processo), afetado ou não pela presença do resíduo sólido gerado pelo evento. De modo mais generalizado, desgaste pode ser definido como a perda progressiva de matéria da superfície de

um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo com outro corpo sólido, líquido, ou mesmo gasoso (Gahr, 1987).

Tribologia é, portanto, definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e das práticas relacionadas. A palavra tribologia é derivada da palavra grega *tribos* significado de fricção. Tribologia envolve, portanto, a investigação científica de todos os tipos de fenômenos de fricção, de lubrificação e de desgaste, e também as aplicações técnicas do conhecimento tribológico (Gahr, 1987).

Um sistema tribológico consiste basicamente nas superfícies de dois materiais que estão em íntimo contato e sob movimento relativo entre si, e pela sua circunvizinhança. O tipo, o progresso e a extensão do desgaste são essencialmente determinados pelos materiais em contato, pelo acabamento dos componentes, por qualquer subproduto gerado no processo, por influências ambientais e por condições operacionais.

A Figura 2.15 ilustra os elementos básicos que constituem um sistema tribológico:

Figura 2.15 - Esquemático ilustrativo dos elementos que compõem um sistema tribológico.

onde:

1. Material base.
2. Material oponente ou contraface.
3. Influências externas, tais como temperatura, pressão, umidade relativa e ambiente.
4. Material intermediário, tal como lubrificante, contaminante, resíduo oriundo do desgaste.
5. Carga mecânica.
6. Movimento relativo.

2.2.2 Desgastes Abrasivo e Adesivo

Desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é mecanicamente carregado (friccionado) contra partículas de um material que tenha uma dureza igual ou superior à sua. De fato, a base da resistência ao desgaste abrasivo dos materiais é a sua dureza, e, geralmente, é aceito que materiais mais duros experimentam menores taxas de desgaste abrasivo do que os materiais mais macios para uma dada condição de ensaio ou uma mesma circunstância de operação em serviço.

Desgaste adesivo pode ocorrer quando as superfícies em contato deslizam uma contra a outra. A alta pressão local entre as asperezas superficiais em forte contato resulta em deformação plástica das mesmas, na sua adesão e, conseqüentemente, na formação de junções (soldagem) altamente localizadas. O deslizamento relativo entre as superfícies em contato causa a ruptura destas junções

e, freqüentemente, transfere parte de material de uma superfície para a outra. No caso dos polímeros, é muito freqüente o emprego do termo “filme polimérico de transferência”, tradução literal de *polymer transfer film* (Lhymn, 1987; Böhm et al, 1990; Friedrich et al, 1993 & 1995; Harsha & Tewari, 2003; Kawakame, 2003; Lhymn & Bozolla, 2003; Hou & Ye, 2004; Kim et al, 2005 & 2007; Suresha et al, 2007 & 2008). Os polímeros, dada a sua natural plasticidade (em especial os termoplásticos) e sua relativamente baixa temperatura de fusão (termoplásticos), são bastante propensos em serviço ao desgaste adesivo. Isto pode aumentar o risco de sobrecarga do componente devido à tensão, à velocidade ou à temperatura, sendo este risco diretamente relacionado a um grande aumento do coeficiente de fricção e desgaste. Em casos extremos, é possível ocorrer até mesmo o impedimento do movimento relativo entre as partes em contato. Por outro lado, alguns autores se reportam ao efeito do filme de transferência polimérico como um moderador da força de fricção atuando na interface de contato. Estes pontos serão detalhados ao longo do texto.

A tendência para formar juntas aderidas depende das propriedades físicas e químicas dos materiais em contato, do modo e da intensidade do carregamento, bem como da presença de contaminantes e rugosidades superficiais.

Uma vez que a adesão depende da área real de contato, ela é influenciada pela resistência mecânica dos materiais, pela sua deformação plástica ou permanente, sua estrutura cristalina e pelo número de sistemas (planos e direções) de escorregamento.

Dentre os componentes de equipamentos que tipicamente envolvem desgaste adesivo destacam-se as cavidades para extrusão, os *comes* e guias, as

engrenagens, os mancais, as ferramentas de corte e as juntas mecânicas (Gahr, 1987).

Entretanto, cabe ressaltar que, em geral, e particularmente dos compósitos poliméricos, ocorre uma transição entre os mecanismos de desgaste operantes e/ou predominantes na medida em que prossegue o contato com movimento relativo entre as partes. Por exemplo, no caso das juntas mecânicas, embora de início o desgaste adesivo possa vigorar, com o passar do tempo alguns produtos de desgaste vão sendo criados, e o mecanismo controlador do processo passa a ser o desgaste abrasivo.

2.2.3 Desgaste de Pares de Fricção Metal / CMP

2.2.3.1 Considerações Iniciais

A questão do desgaste por fricção entre materiais de diferentes classes ou naturezas tem atraído cada vez mais a atenção da comunidade científica especialista na área (Galea et al, 1993; Qu et al, 2005; Klett et al, 2005; Ciornei et al, 2006; Caccese et al, 2007; Kabche et al, 2007). O contato entre dois materiais dissimilares entre si, e que se movimentam um relativamente ao outro, sob baixa ou alta frequência, em pequena ou grande amplitude, e sob cargas baixas ou elevadas, fatalmente conduzirá, mais cedo ou mais tarde, ao processo de desgaste, de um, de outro, ou mesmo de ambos os componentes envolvidos. Um caso particular deste

fenômeno é freqüentemente observado em juntas mecânicas de laminados compósitos de matriz polimérica unidos por prendedores metálicos¹, as quais são empregadas particularmente na indústria da mobilidade (aeronáutica, aeroespacial, automotiva, naval e ferroviária).

2.2.3.2 Juntas Mecânicas de Laminados CMP

O projeto de sistemas estruturais freqüentemente envolve elementos que são conectados por meios de adesivos, parafusos, rebites, pinos, ou várias combinações destas conexões. Nas estruturas e componentes confeccionados em laminados compósitos de matriz polimérica (CMP), diversos tipos de juntas são comumente empregadas, quais sejam: (i) as mecanicamente acopladas, (ii) as co-curadas (matrizes termorrígidas), (iii) as co-consolidadas (termoplásticas), (iv) as coladas (termorrígidas), (v) as soldadas (termoplásticas), além das (iv) híbridas (Mallick, 1986; Agarwal & Broutmann, 1990; Galea et al, 1993; Hart-Smith, 1993; Yoshiki, 1999; Starikov, 2001; Starikov & Schön, 2002; Schön & Starikov, 2003; Kelly & Hallström, 2004; Klett et al, 2005; Nichols et al, 2007; Kabche et al, 2007; Thoppul et al, 2008 & 2009).

Juntas co-curadas, co-consolidadas, coladas e soldadas são muito dependentes do tamanho das partes a serem unidas e da quantidade de sobreposição requerida para suportar o carregamento aplicado em serviço.

¹ Quase que invariavelmente os prendedores são de natureza metálica (em especial ligas de alumínio, de titânio e aços), não obstante, mais atualmente, haver um grande esforço para o desenvolvimento de prendedores confeccionados em CMP, especialmente na indústria de construção aeronáutica.

Atualmente, elas são aceitas, quase sem exceção, apenas nos componentes estruturais ditos secundários de uma aeronave, sendo, em geral, evitadas em estruturas primárias devido aos elevados níveis de resistência mecânica necessários, às altas temperaturas de operação, aos efeitos nocivos da umidade e, particularmente, a questões de confiabilidade no uso e de reprodutibilidade e repetibilidade na confecção, na inspeção e nos ensaios mecânicos de certificação e controle de qualidade das mesmas (Niu, 1988 & 1992).

Desta forma, as juntas mecânicas e as juntas híbridas (o termo é aqui aplicado para designar o emprego simultâneo de união mecânica e por adesão) são ainda predominantes nas estruturas feitas em laminados compósitos avançados de matriz polimérica.

Em princípio, tanto prendedores confeccionados em ligas de titânio, de alumínio, quanto em aços inoxidáveis são aplicáveis em estruturas de laminados compósitos. Entretanto, vários fatores devem ser considerados na especificação de prendedores para materiais compósitos:

- (i) A expansão/contração térmica diferencial do prendedor relativamente ao compósito.
- (ii) O efeito da usinagem da furação na integridade estrutural do material, assim como a ocorrência de delaminação causada pelo prisioneiro sob carga.
- (iii) A entrada de água entre o prendedor e o laminado.
- (iv) A continuidade elétrica do compósito e corrosão galvânica da junta compósita.
- (v) O peso do sistema de prisioneiros.

- (vi) A vedação proporcionada pelo prisioneiro (ex: em um reservatório de combustível líquido ou gasoso).

Neste sentido, prendedores confeccionados em liga de alumínio e em aços inoxidáveis se expandem e se contraem acentuadamente quando expostos a temperaturas extremas do envelope de operação de aeronaves (tipicamente -70°C a $+100^{\circ}\text{C}$ em aeronaves comerciais). Em laminados fortalecidos com fibras de carbono, a grande variação dimensional exibida por estes prendedores pode causar afrouxamento da carga de aperto (torque) aplicado durante a montagem do sistema. Além disso, a corrosão por par galvânico em juntas de laminados sólidos compósitos fortalecidos com fibras de carbono e unidos por prendedores de liga-Al ou aço é um fenômeno já bastante conhecido e freqüentemente evitado nas práticas de construção naval e aeronáutica.

De fato, as juntas representam uma descontinuidade na estrutura e resultam naturalmente em elevadas tensões localmente concentradas (Figura 2.16 e 2.17), as quais podem iniciar a falha do conjunto, geralmente por mecanismos de fratura. Por exemplo, é amplamente reconhecido que concentrações de tensão em cantos de furações em laminados compósitos avançados são altas o suficiente para reduzir a eficiência destas conexões por um fator de até 50% (Thoppul et al, 2008 & 2009; Hart-Smith, 1993). Além disso, o processo de desgaste por contato entre furo e prendedor acelera significativamente, por diferentes vias, o processo de fratura da junta, podendo culminar no colapso de todo o sistema.

Figura 2.16 - Modelo de uma junta mecânica simples, em que um laminado plano é carregado em tração por um prendedor inserido em furo passante circular (Adaptado de Agarwal & Broutmann, 1990).

Figura 2.17 - Distribuição de tensões no plano do laminado ao redor do pino de tracionamento da junta: (a) Tensão compressiva no lado de carregamento do prendedor (pino); (b) Tensão trativa através da seção do material; (c) Tensão de cisalhamento fora do plano de máxima tração (Agarwal & Broutmann, 1990). As setas vermelhas indicam a intensidade, direção e sentido dos máximos esforços desenvolvidos na furação pinada tracionada.

Para juntas mecânicas perfeitamente acopladas e ajustadas (se é que existem), ou seja, para tolerâncias mínimas entre as partes furadas e unidas, pequenos movimentos relativos (da ordem de microns) entre as partes não de ocorrer devido à sollicitação dinâmica (cíclica) da estrutura, dando origem ao

fenômeno do fretting, o qual é amplamente estudado e estabelecido na comunidade científica no caso de ligas metálicas, mas que ainda carece de maior atenção no caso dos laminados CMPs.

Entretanto, o fenômeno de desgaste pode adquirir uma conotação ainda mais grave em termos de perda de material e de rapidez para o estabelecimento da falha da junta mecânica quando movimentos relativos mais amplos entre as diversas partes da junta são permitidos (Mallick, 1986; Yoshiki, 1999). Isto é especialmente verificado em juntas mecânicas com folga proposital entre prendedores e furações (as chamadas *clearance joints*) que são, por vezes, empregadas especialmente em estruturas aeronáuticas confeccionadas em CMPs. O artifício da folga intencional entre furo e prendedor visa basicamente possibilitar a livre expansão/contração diferencial dos materiais dissimilares, como decorrência de flutuações térmicas (o amplo envelope de temperaturas de operação em aeronaves comerciais subsônicas modernas foi anteriormente especificado no texto) e/ou de umidade em serviço. O artefato da folga objetiva, assim, evitar tensões de origem termo-mecânica que possam se somar àquelas de origem puramente mecânicas previstas em projeto (Thoppul et al, 2008 & 2009; Nichols et al, 2007; Kelly & Hallström, 2004).

A facilitação do movimento relativo entre as partes que constituem uma junta mecânica intensifica naturalmente seu desgaste, mensurado em termos da perda de massa ou, preferencialmente, de volume das partes (visto que é uma questão de caráter essencialmente dimensional), a partir das respectivas superfícies de contato (Mallick, 1986; Yoshiki, 1999). Isto pode ocorrer entre as faces dos laminados em contato entre si, bem como entre as bordas de suas furações e o perímetro dos respectivos prendedores, num processo moto-contínuo e acelerado. Preconiza-se que o processo transite do mecanismo de desgaste por fretting puro para aqueles

envolvendo adesão e, mais tarde, abrasão devido à geração de fragmentos (3º corpo).

O resultado do processo de desgaste é o aumento da folga da junta e, conseqüentemente, a redução da sua resistência residual aos esforços mecânicos aplicados, como decorrência, dentre outros efeitos, da distribuição não-uniforme do campo de tensões no interior do laminado e da redução progressiva das seções líquidas efetivamente suportando o carregamento mecânico aplicado. A rigor, para juntas sobrepostas (*lap shear joint*) e situações em que o modo de falha é o desejável, qual seja, por esmagamento da furação (*bearing failure*), a deformação do furo é levemente maior no caso de juntas com folga comparativamente a juntas muito ajustadas (i.e., sem folga), para um dado nível ou intensidade de carregamento mecânico, em função da menor área efetiva de contato entre furo e prendedor nas primeiras. Além disso, a rigidez da junta é menor quanto maior a folga, devido tanto à reduzida área de contato, como às maiores deformações do furo. Ademais, o efeito da folga, provocada e/ou intensificada pelo desgaste entre as partes em contato, é também substancial quanto à resistência ao esmagamento para uma deformação da furação da ordem de 4% (critério extensivamente empregado no projeto de juntas mecânicas compósitas). Nestes casos, invariavelmente observa-se uma significativa redução da resistência mecânica das juntas folgadas (Kelly & Hallström, 2004).

Durante o carregamento em fadiga trativa de juntas unidas mecanicamente, foi experimentalmente determinado que, inicialmente, o coeficiente de fricção entre as faces em contato dos laminados unidos por prendedores aumenta devido à redução do espaço disponível para estes se moverem no interior da furação, redução esta promovida por resíduos gerados durante os primeiros estágios do

processo de desgaste. Enquanto o carregamento cíclico perdura, a quantidade de danos na furação tende a aumentar, e, quando as partículas compactadas de pó residual são transportadas para fora da furação, mais espaço disponível é criado para o movimento, ocorrendo então a relaxação dos prendedores. Com o incremento do número de ciclos, o pré-torque nos prendedores é reduzido na medida em que aumenta a folga entre o prendedor e os laminados, assim como entres estes últimos. A degradação dos furos, o desgaste entre as faces em contato dos laminados, e o desgaste entre as superfícies interna e da borda dos furos e os prendedores, permitem um maior deslocamento entre os laminados, e assim sucessivamente, até que a integridade estrutural do conjunto esteja totalmente comprometida (Starikov, 2001; Starikov & Schön, 2002; Schön & Starikov, 2003).

Alguns estudos tem se dedicado à determinação do número de ciclos necessários para a observação visual dos produtos de desgaste, os quais tendem a ser expulsos da região em que foram gerados, criando e/ou incrementando assim a folga entre furo e prendedor, além de, obviamente, constituírem um 3º corpo que determina a prevalência do mecanismo de desgaste por abrasão a três corpos sobre o fretting e/ou o desgaste por adesão vigorando inicialmente na junta. Thoppul et al (2008 & 2009), Kelly & Hallström (2004) observaram que este tempo varia de sistema para sistema mecânico avaliado.

A Figura 2.18 apresenta exemplos de união mecânica de peças aeronáuticas confeccionadas, respectivamente, em material compósito e em liga metálica, originando juntas aqui denominadas híbridas.

(a)

(b)

Figura 2.18 - (a) Componente estrutural aeronáutico da Airbus (viga em I) obtido pela junção mecânica de dois materiais dissimilares entre si (metal à esquerda, e CMP à direita); (b) Faces reforçadas e plana, respectivamente, de um painel híbrido metal / CMP de aeronave Airbus. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=37>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

A Figura 2.19 apresenta um esquema da junta mecânica híbrida entre um material compósito (na forma de painel) e uma subestrutura metálica tipo longarina, potencialmente utilizada nas indústrias aeronáutica e naval.

Figura 2.19 - Esquematisação do conceito de junta mecânica híbrida impermeável a líquidos. Adaptado de fonte na internet Acesso em: 10 jan. 2009.

A Figura 2.20 ilustra o modelamento, por meio de malha de elementos finitos, de uma junta mecânica entre dois materiais estruturais dissimilares entre si, unidos por um terceiro e também diferente material (prendedor).

Figura 2.20 - Modelo em elementos finitos de uma junta mecânica totalmente híbrida. Fonte: internet Acesso em: 10 jan. 2009.

A Figura 2.21 apresenta o caso real da união mecânica, por meio de rebites e parafusos, entre enrijecedores (*stiffners*) estruturais confeccionados em laminados CMPs (PPS fortalecido com fibras de carbono) e longarinas de liga-Ti que compõem

a estrutura interna de flapes e estabilizadores horizontais em aeronaves comerciais de grande porte.

Figura 2.21 - Componente estrutural primário aeronáutico (aeronaves Airbus A330 e A340) formado pela junção mecânica de laminado CMP e liga metálica. Disponível em: <<http://w1.rob.com/pix/oops?page=67>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

A Figura 2.22a ilustra o projeto estrutural da aeronave Phenom da Embraer S/A, que emprega uma montagem similar àquela observada na Figura 2.21, porém desta feita aplicada na deriva (ou estabilizador vertical) localizada na empennagem da aeronave (indicada por seta). Na Figura 2.22b é mostrada uma aeronave em pleno voo ainda em estágio de teste e certificação.

(a)

(b)

Figura 2.22 - (a) Projeto estrutural do mini-jato Phenom 300 da Embraer; (b) Aeronave em voo. Acesso em: 10 jan. 2009.

Considerado o elevado gradiente de durezas existente entre laminados CMPs e as ligas metálicas estruturais aeronáuticas, e a grande pressão de contato atuante no contato entre prendedor / furação, pode se inferir que as máximas taxas de desgaste hão de se desenvolverem no contato de um prendedor metálico com a furação de um laminado CMP. Daí a importância de se considerarem pares de fricção metal / CMP tal como presentemente avaliados neste estudo.

2.2.3.3 Mecanismos de Desgaste em CMPs Fibrosos

Vários estudos têm sido disponibilizados na literatura acerca do comportamento de desgaste de polímeros e seus compósitos. Boa parte destas pesquisas fornece apenas resultados quantitativos, enquanto que o restante dos trabalhos prima por informações relativamente aos micromecanismos envolvidos no processo mecânico de perda e/ou de transferência de material para a contraface correspondente.

Por exemplo, segundo Tsukizoe & Ohmae (1983), o desgaste dos compósitos de matriz polimérica fortalecidos com fibras de alto desempenho procede via a seguinte seqüência cronológica de eventos, os quais são afetados por dois ou mais fatores essenciais que são abaixo discriminados:

1. Redução da seção transversal das fibras de reforço por desgaste, que é afetada pela carga normal aplicada e pela distância de escorregamento entre as partes.

2. Subseqüente quebra das fibras, que é afetada pela deformação do laminado causada pela força de fricção, pela carga normal aplicada e também pela distância de deslizamento.
3. Arrancamento e descascamento das fibras de reforço da matriz polimérica, que são determinados pela resistência ao cisalhamento interlaminar do CMP, pela sua deformação, pela carga normal, além da distância percorrida no deslizamento.

Mecanismos mais detalhados de desgaste de CMPs foram propostos por Lee et al (2005). De acordo com os pesquisadores, visto que o eixo das fibras e a superfície em contato com o CMP não são perfeitamente paralelos, é possível que a extremidade das fibras quebradas pelo atrito com a superfície oposta (contraface), e as áreas ricas em resina localizadas naquela região sejam desgastados mais rapidamente, criando espaços onde os fragmentos micrométricos de desgaste são embutidos. Além disso, a rugosidade da contraface de contato induz carga cíclica (na forma de pequenas cargas de impacto repetido) nas fibras, facilitando o descolamento destas com relação à matriz polimérica e criando novos espaços para a alocação dos fragmentos de desgaste (Figura 2.23a). O movimento relativo entre as superfícies transfere assim os produtos de desgaste para aqueles locais, compactando os resíduos gradualmente por esforço cisalhante. Quanto maior a compactação dos fragmentos, maior a intrusão destes nos vazios criados por descolamento entre fibra e matriz, causando a flexão progressiva das fibras de reforço e levando em ultima instância à fratura destas (Figura 2.23b). Como a dificuldade do movimento das partículas micrométricas cresce com a densidade de empacotamento das mesmas, ao final do processo de densificação elas começam a

se comportar como um sólido massivo. Desta forma, as partículas altamente compactadas podem trincar em uma região mais fraca, de mais baixa compactação, e fragmentos desta massa compactada, incluindo partes de fibras quebradas, podem ser destacados e deslocados para outras posições de compactação situadas atrás daquela inicialmente estabelecida (Figura 2.23c), e assim sucessivamente, num ciclo contínuo de compactação e fratura de fragmentos de desgaste, até estes se desgarrarem das superfícies sob deslizamento.

Figura 2.23 - Mecanismos propostos de desgaste de compósitos poliméricos fibrosos: (a) Fragmentos de desgaste e descolamento de fibras; (b) Compactação dos fragmentos e quebra de fibras; (c) Destacamento de fragmento da massa compactada contendo porções de fibras quebradas. Adaptado de Lee et al (2005).

Na Figura 2.24 é mostrado o efeito do tamanho dos fragmentos de desgaste no processo de desgaste abrasivo. Quando os detritos são maiores que a

rugosidade superficial na contraface do laminado CMP (Figura 2.24a), o seu desgaste abrasivo ocorre basicamente devido aos detritos de desgaste, que aumentam a força de atrito entre as partes em contato. Porém, quando os detritos são menores que a rugosidade superficial de deslizamento (Figura 2.24b), o rolamento dos detritos acontece naturalmente, porque este movimento rotativo não é estancado pelas duas superfícies em contato, de forma que a fricção do sistema é minimizada. Neste sentido, os fragmentos de escala micrométrica produzidos pelas asperezas de contato em movimento relativo entre os dois corpos não aumenta a fricção entre os mesmos, porém fibras quebradas da ordem de 10 microns já podem incrementar a fricção, visto suas extremidades serem fácil e freqüentemente engastadas nas rugosidades das superfícies em contato, impedindo seu movimento de rotação ou rolamento livre.

Figura 2.24 - Efeito de tamanho dos detritos, ou fragmentos no desgaste abrasivo: (a) Quando o detrito é maior que a rugosidade superficial; (b) Quando é menor que a rugosidade superficial. Adaptado de Lee et al (2005).

A Figura 2.25 ilustra o efeito da compactação de fragmentos de desgaste, incluindo porções de fibras quebradas, no coeficiente de fricção do sistema. Quando

estes elementos não são compactados, os fragmentos de fibras com tamanhos (comprimentos) tipicamente inferiores a 10 microns são facilmente rolados sob o efeito da tensão cisalhante, incrementando pouco o coeficiente de fricção do sistema. Entretanto, uma vez que elas tenham sido compactadas juntamente aos demais fragmentos de desgaste, o coeficiente de atrito aumenta significativamente, pois mesmo os pequenos fragmentos de fibras são impedidos de rolar livremente, e são favoravelmente engastados nas asperezas da superfície de contraface do CMP. De fato, o efeito é tão intenso que ele é sugerido até mesmo como um mecanismo de criação, ou de incremento da rugosidade na superfície deslizante contra o CMP.

Figura 2.25 - Nova rugosidade criada na contraface do laminado CMP devida à compactação de detritos incluindo fibras quebradas. Adaptado de Lee et al (2005).

Conclui-se que os detritos de desgaste produzidos e compactados são o fator determinante aos comportamentos de fricção e de desgaste dos laminados compósitos de matriz polimérica.

Desta forma, visando-se reduzidos efeitos de fricção e desgaste, o mecanismo de compactação deve ser retardado tanto quanto possível. Tem sido

proposto, por exemplo, que isso seja conseguido por meio do micro-sulcamento da superfície do CMP.

2.2.3.4 Ensaio de Desgaste Via Deslizamento Pino-Sobre-Disco

Segundo Qu et al (2005), o ensaio PSD (esquematizado na Figura 2.26) é geralmente realizado com a intenção de se avaliar o desgaste do par tribológico sob condições predominantes de deslizamento. Porém, na prática, a história de carregamento entre os dois corpos sólido mantidos em íntimo contato entre si consiste, simultaneamente, em deslizamento e choque mecânico, desde que vibrações podem ocorrer caso a superfície do disco não seja perfeitamente normal ao eixo do pino de desgaste, bem como em decorrência da rugosidade superficial dos dois sólidos em contato. A tendência ao impacto é, portanto, proporcional a ambas a velocidade escalar de deslocamento entre as superfícies e à distância entre a pista de desgaste (no caso do ensaio sob condições de múltiplo passe – “*multi-pass condition*”: Bijwe et al, 2002 & 2007^{a,b}) e o centro do disco (elemento rotativo no presente estudo), além de ser uma função combinada da rugosidade superficial do pino e do disco.

Figura 2.26 - Diagrama esquemático de um aparato de ensaio de desgaste por atrito entre pino e disco segundo a norma ASTM G 99-95.

Ainda segundo Qu et al (2005), diferentemente do deslizamento que normalmente causa deformação plástica nos materiais, o choque mecânico repetido, mesmo de baixa intensidade, pode introduzir rupturas catastróficas, tais como trincamento e esmagamento superficial e sub-superficial de ambos os corpos em contato, levando à remoção mais rápida de material e à produção de detritos ou fragmentos afiados (particularmente nos materiais de natureza frágil) que, por sua vez, causarão abrasão à três corpos. É amplamente reconhecido que materiais frágeis são muito mais susceptíveis e sensíveis a estes efeitos que os tenazes. Relações lineares inversas têm sido freqüentemente determinadas entre a taxa de desgaste de materiais essencialmente frágeis (ex. cerâmicos, polímeros termorrígidos, metais tratados termicamente e/ou fragilizados pelo meio: ex. Ti fragilizado por oxigênio: Molinari et al, 1997) e sua tenacidade à fratura como decorrência da quase inevitabilidade dos choques mecânicos (fadiga por impacto) em experimentos destinados a obtenção da resistência ao desgaste. Nestas

circunstâncias, o ranking de resistência ao desgaste se estabelece em ordem inversa a dureza, mas, como supracitado, em ordem idêntica à sua tenacidade à fratura. A literatura registra, por exemplo, no caso dos laminados CMP, que a resina epoxi possui uma superfície com características frágeis, produzindo, em ensaios de desgaste, grandes detritos (Cirino et al, 1998).

A rigor, o desgaste por deslizamento é caracterizado pelo movimento relativo entre duas superfícies sólidas lisas em contato sob carregamento normal, onde os danos superficiais durante o movimento não ocorrem por sulcamentos devido à penetração de asperezas ou por partículas externas (Gahr, 1987).

Entretanto, há de se mencionar que a própria evolução do processo de desgaste propicia condições para que diferentes mecanismos de desgaste se sucedam e vigorem uns com relação aos outros, sem que haja qualquer interferência externa ao ambiente em que o fenômeno se desenvolve. Por exemplo, caso as partículas, fragmentos ou produtos de desgaste naturalmente gerados durante o processo convencional de deslizamento PSD não sejam extraídos do ambiente por alguma intervenção externa ou intencional, desgaste por abrasão (caracterizado por sulcamentos das superfícies) há de ocorrer, da mesma forma que reações triboquímicas (discutidas na seqüência do texto) podem ocorrer, e mesmo eventualmente sobrepujar o mecanismo outrora predominante de abrasão. Desta forma, assume-se que, em contatos por deslizamento, desgaste pode ocorrer por adesão, abrasão, fadiga e oxidação, atuando singularmente ou nas mais variadas combinações, dependendo do sistema tribológico inicialmente formado, o qual é freqüentemente transformado, por si só, ao longo do tempo de processo (Schuitek, 2007).

De acordo com Qu et al (2005), camadas superficiais mecanicamente deformadas exibem reatividade química bastante distinta da massa interna do sólido. As chamadas reações triboquímicas (geralmente definidas como oxidação) podem acelerar significativamente o processo de desgaste, pois deterioraram as propriedades mecânicas do material, resultando em micro-fraturas causando elevada taxa de desgaste. O processo de desgaste desenvolve continuamente “superfícies novas” e pré-dispostas às reações triboquímicas, num círculo vicioso. Técnicas de caracterização química micro-constitucionais (EDS e XRD) são geralmente empregadas na determinação de filmes de transferência para as correspondentes contrafaces de modo a conformar, ou não, possíveis reações triboquímicas entre os pares de desgaste por fricção.

Neto & Kiminami enfatizam que os resultados mais reprodutíveis encontrados quanto à taxa de desgaste utilizaram equipamentos do tipo pino-contra-disco.

2.2.3.5 Efeitos de Algumas Variáveis no Desgaste de Laminados CMPs

2.2.3.5.1 Considerações Iniciais

Lee et al (2005) reiteram que CMPs fortalecidos com fibra de carbono têm, em princípio, uma ampla gama de aplicabilidade em sistemas deslizantes sem lubrificante líquido. Isto, porque a fibra de carbono é composta por planos concêntricos (estrutura tipo-cebola, ilustrada na Figura 2.27) de grafita.

Figura 2.27 - Representação esquemática da estrutura tri-dimensional da fibra de carbono. Adaptado de Lee, 2005.

O deslizamento entre as camadas da grafita, e entre estas e a contraface de desgaste pela aplicação de esforços cisalhantes ocorre facilmente, o que dá à fibra de carbono características auto-lubrificantes.

Em geral, assume-se para os laminados CMP que as características tribológicas das matrizes poliméricas termoplásticas são melhores que matrizes termofixas, porém as propriedades mecânicas de compósitos termoplásticos são, segundo a literatura, geralmente mais baixas que compósitos termorrígidos.

2.2.3.5.2 Teor de Fibras de Reforço

Segundo Cirino et al (1988), Bijwe et al (2002 & 2007^{a,b}), a incorporação de fibras na resina polimérica do CMP geralmente reduz a taxa de desgaste do compósito final submetido a deslizamento contra outro corpo sólido, devido a um

aumento na capacidade do compósito resistir cargas mecânicas. Conforme mencionado no item 2.2.2, o mecanismo de desgaste por adesão, típico de baixos volumes de reforço fibroso e altas concentrações do polímero matricial, tende a ser suplantado pelo de abrasão na medida em que aumenta a percentagem volumétrica da fase de reforço e resíduos abrasivos tendem a ser gerados no processo (Hanmin et al, 1987^{a,b}). O desgaste produzido pelos detritos formados na superfície de deslizamento é desgaste abrasivo, que aumenta a fricção e o desgaste na superfície compósita (Lee et al, 2005). Em geral, a análise das superfícies poliméricas desgastadas em ensaios contra ligas metálicas mostra que o mecanismo de desgaste da fase orgânica é uma combinação de desgaste adesivo e desgaste abrasivo (Mimaroglu et al, 2007).

Dados da literatura (Hanmin et al, 1987^{a,b}) mencionam, entretanto, que, uma vez excedido o teor ótimo de fibras no CMP, incrementa-se a geração de defeitos estruturais entre fibra e resina como decorrência da não-uniformidade da adesão entre estas fases (reforço e matriz). Quanto maior o teor de fibra, mais fácil se torna a ocorrência de falha por descolamento interfacial entre as mesmas, assim como o descascamento da camada de resina entre as lâminas individuais do laminado. Como resultado, muitas partículas com formas e tamanhos irregulares, ou mesmo grande fragmentos são formados durante o contato entre pino de CMP / disco metálico².

Resultados obtidos em estudos científicos sobre desgaste por fricção têm demonstrado que dentre todas as possíveis composições testadas, o melhor desempenho global dos CMPs (i.e., otimização da performance em termos da

² Segundo Quintelier et al (2006), nos estudos de desgaste por deslizamento PSD entre CMPs e ligas metálicas, quase que invariavelmente o CMP é empregado na forma de pino como elemento rotativo e a liga na forma de disco fixo, contrariamente ao que foi realizado na presente Dissertação de Mestrado.

maioria das propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e coeficiente de fricção), foi determinado para compósitos reforçados com 65% em volume de fibra de carbono (FC). Com o aumento adicional de FC, o desempenho piorou como decorrência da maior abrasão exercida pelos detritos formados a partir da fratura das fibras de reforço (Bijwe et al, 2002 & 2007^{a,b}).

2.2.3.5.3 Carga Mecânica Aplicada

O aumento de carga mecânica aplicada ao pino de desgaste no ensaio de deslizamento PSD favorece o dano das fibras de reforço, em especial segundo o mecanismo de trincamento das mesmas (Bijwe et al, 2002 & 2007^{a,b}; Qu et al, 2005). Este fato, associado à pulverização das fibras e à subsequente transferência destas na forma de detritos formando um “terceiro corpo” na interface entre os corpos em contato leva ao incremento da taxa de desgaste do compósito. Além disso, maiores cargas normais aplicadas à superfície do disco geram aumentos locais e instantâneos da temperatura (*hot spots* ou *flash temperatures*) devido ao aumento da fricção, deteriorando a adesão fibra-matriz e facilitando conseqüentemente o arrancamento ou a descamação das fibras pulverizadas que formarão o terceiro corpo abrasivo. Em casos extremos, foram detectadas em alguns experimentos conduzidos em condições ambiente (Hanmin et al, 1987^{a,b}), temperaturas de até 260°C no desgaste de compósitos PPS-C friccionados contra superfícies metálicas, portanto muito próximas à fusão do polímero termoplástico. Segundo os autores, o aumento da taxa de desgaste se deveu, nestas condições, especialmente ao

amolecimento da matriz de PPS e à conseqüente perda de sua resistência mecânica a altas temperaturas, não obstante a fricção entre as partes tenha sido reduzida pelo efeito moderador do polímero quase-fundido (o PPS funde tipicamente a 290°C).

2.2.3.6 Medidas de Taxa de Desgaste

O desgaste de materiais pode ser quantificado, além da perda de massa (Δm) ou de volume (ΔV), pela taxa específica de desgaste (Equação de Archard & Hirst, 1953-1956), K_s , em que a distância de deslizamento (L), assim como a carga normal aplicada (P), são computadas nos cálculos:

$$K_s = \Delta V / L * P \quad (2.1)$$

2.2.3.7 Algumas Considerações com Relação aos Metais³

O titânio é um material extremamente reativo e tem uma reputação de propriedades tribológicas bastante pobres. O titânio puro tende a se transferir para a contraface, além de se deformar de modo pouco conveniente em sistemas não lubrificado (Budinski, 1991). Assume-se, em geral, que o uso do Ti deve ser evitado

³ Em todos os casos referenciados, bem como naqueles avaliados no presente estudo, considerar-se-ão somente as ligas metálicas no estado de como-fabricadas, sem a aplicação, portanto, de quaisquer revestimentos visando aumento da resistência ao desgaste.

em qualquer tribosistema. As sofríveis propriedades tribológicas do Ti e de suas ligas se devem principalmente aos seguintes fatores (Molinari et al, 1997): (i) Baixa resistência ao cisalhamento plástico; (ii) Reduzida capacidade de encruamento; (iii) Pequena proteção exercida pela camada superficial de óxido que se forma em altas temperaturas induzidas pela fricção durante o deslizamento, a qual é facilmente arrancada e fragmentada, não protegendo assim a camada sub-superficial metálica contra desgaste; (iv) Ação fragilizante do oxigênio ambiente no metal.

Os aços inoxidáveis martensíticos fortalecidos por precipitação (aços PH) são indicados para aplicações onde a combinação de resistência mecânica e à corrosão são requeridas. Entretanto, sua aplicação é restringida pela sua baixa resistência ao desgaste (Bernardelli et al, 2006). Bajguirani (2002) mostrou que a máxima dureza para este material é alcançada quando a precipitação da segunda fase ocorre no intervalo de temperatura entre 400 e 500°C, em duas horas de tratamento. Temperaturas e tempos inadequados de tratamento podem inibir a precipitação, ou mesmo induzir ao coalescimento dos precipitados, conseqüentemente diminuindo a dureza e a resistência mecânica do aço. Embora o aço 15-5 PH possua elevada dureza quando comparado aos aços inoxidáveis austeníticos, Bernardelli et al (2006) considera desejável melhorar as suas propriedades superficiais tais como : resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga, ampliando assim seu leque de aplicabilidade. O tratamento de nitretação a plasma tem sido uma opção para a otimização das propriedades superficiais, por possibilitar a utilização de baixa temperatura de tratamento e apresentar outras vantagens como: alta eficiência, baixa distorção, processo limpo, aporte térmico direto à peça, dentre outros fatores.

Por sua vez, as ligas de alumínio têm alcançado uma posição de destaque como material estrutural por apresentarem uma combinação adequada de

resistência ao desgaste, resistência a quente e rigidez, em especial quando consideradas sua baixa densidade, além da boa resistência à corrosão, ampliando sua utilização no campo da engenharia, principalmente nas aplicações da indústria automobilística e aeronáutica (Navas, 1999). Algumas propriedades como a dureza, e, conseqüentemente, a resistência ao desgaste desta classe de materiais podem ser aprimoradas como, por exemplo, dispersando-se partículas duras, como é o caso da adição de partículas de silício, resultando num acréscimo da resistência ao desgaste (Hekermann, 2002).

2.2.3.8 Filmes de Transferência entre Pares de Desgaste por Fricção Metal / CMP

Os comportamentos de fricção e de desgaste de um polímero em deslizamento contra um material metálico são fortemente influenciados por sua habilidade de formar um filme de transferência na contraface. Em se tratando de CMP, Chen et al (2007) consideram que as fibras de carbono pulverizadas e misturadas a material extraído da matriz polimérica, dando assim origem a um filme de transferência que se deposita na contraface, melhoram as propriedades mecânicas e tribológicas do sistema através da redução do coeficiente de fricção, o que, em teoria, reduziria o desgaste de ambos os elementos do par pino-disco.

Desta maneira, a formação de filmes de transferência, constituído basicamente de fragmentos de desgaste do compósito, poderia em certas circunstâncias mascarar asperezas e rugosidades na contraface metálica de

desgaste, reduzindo assim a ação abrasiva do metal. Para rugosidades muito pequenas na contraface metálica, a formação de filmes de transferência pode até mesmo ser prejudicada, pois não haverá condições para um ancoramento mecânico entre o filme e a superfície de desgaste do metal. Quintelier et al (2006) afirmam que o filme pode ser descontínuo também no caso de uma rugosidade acentuada da contraface, dada a dificuldade do mesmo se acomodar por entre todas as reentrâncias da superfície metálica. Desta forma, parece haver uma rugosidade específica do metal para um mínimo desgaste do par metal / CMP.

Cabe observar que, embora a taxa de desgaste seja inicialmente relativamente pequena no ensaio PSD, a fricção entre as partes tende a aumentar sensivelmente como decorrência da geometria hemisférica da ponta do pino de desgaste, a qual vai se desgastando e dando origem a cada vez maior área de contato com o CMP. Além disso, a interação que ocorre entre o polímero presente nas duas faces que estão em íntimo contato pode contribuir adicionalmente (por exemplo, sob baixas temperaturas) para um eventual acréscimo adicional da fricção.

O efeito da velocidade de escorregamento na capacidade de geração do filme parece também ser prejudicial sob ambas baixa e alta velocidade de rotação, indicando a existência de uma velocidade relativa de contato ideal para a minimização da taxa de desgaste.

Sob baixas cargas, um filme uniforme de transferência tende a ser formado devido aos pequenos fragmentos gerados e aos efeitos térmicos desprezíveis. Sob cargas maiores, o desenvolvimento significativo de filme de transferência não se efetiva devido à ação mais abrasiva do metal (Zhao & Bahadur, 1998 & 2002).

Os termoplásticos têm, em geral, uma baixa energia de superfície, suas propriedades de adesão a outros materiais estruturais são geralmente pobres, e,

portanto, a formação de filmes de transferência para uma contraparte metálica é geralmente inibida (Lee et al, 2005). Entretanto, o PPS possui boa habilidade de transferir filmes em contra-superfícies de aço, devido à formação de uma interface de FeS resultante da reação do metal com enxofre do PPS, que obviamente promove a adesão do filme termoplástico ao aço (Yamamoto & Hashimoto, 2002 & 2004).

Silva et al (2008) observaram que o termoplástico PEEK na forma pura se desgasta no deslizamento contra o aço por um mecanismo de abrasão (em oposição ao mecanismo de adesão, frequentemente observado nos sistemas tribológicos metal/polímero puro). Eles confirmaram, via análises por MEV-EDX, a presença de várias partículas de FeO_2 na zona de contato, indicando o desgaste também do contra-corpo metálico. A elevação na temperatura de contato entre os corpos facilitou a oxidação de ferro e tendeu a formar um filme denso de óxidos de ferro (material duro e antiaderente). Hanmin et al (1987^{a,b}) verificaram em condições semelhantes, porém empregando CMP de C-PPS, a existência de um filme polido e reflexivo azul escuro é visível a olho nu na superfície metálica desgastada, conduzindo, eventualmente, a uma redução na taxa de desgaste.

Todos estes efeitos fornecem uma clara noção do elevado grau de complexidade da análise do comportamento de desgaste de sistemas tribológicos constituídos de dois materiais com naturezas tão diversas entre si, tal como o caso dos metais e laminados CMPs.

3. MATERIAIS

3.1 Ligas Metálicas Monolíticas Estruturais

3.1.1 Considerações Iniciais

Os materiais metálicos avaliados neste estudo foram empregados na forma de pinos de desgaste, os quais foram fixados em um dispositivo imóvel e friccionados contra discos de laminados compósitos rotativos. Três diferentes ligas metálicas foram estudadas: (i) Al7475-T7351, (ii) Ti6Al4V, e (iii) Aço PH 15-5, todas fornecidas pela Embraer S/A na forma pronta para aplicação em serviço.

3.1.2 Liga de Alumínio

Foi investigada uma liga de alumínio de alta resistência SAE-AMS 7475, tratada para a condição T7351, produzida na forma de placa laminada a frio com espessura nominal de 60 mm.

A composição química da liga, listada na Tabela 3.1, foi determinada pela técnica de espectrometria de emissão óptica, sendo confrontada com a

especificação fornecida pela norma SAE-AMS 2355 (2002), a qual é também suprida na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composições químicas, determinada para a liga-Al 7475-T7351 ensaiada e requerida pela especificação SAE-AMS 2355 (2002). Porcentagens em massa.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	P	Al
Amostra	0.047	0.065	1.251	0.003	1.949	0.239	5.793	0.052	0.010	Bal.
SAE-AMS			1,2-		1,9-	0,18-	5,2-			
	<0,1	<0,12		<0,06				<0,06	<0,05	Bal.
2355			1,9		2,6	0,25	6,2			

Conclui-se da tabela acima que a composição química do material ensaiado encontra-se dentro das faixas de valores normatizados.

As propriedades mecânicas em tração da liga-Al, ensaiada na forma de corpos de prova com seção transversal circular com diâmetro de 12,5 mm, são apresentadas na Tabela 3.2, juntamente à dureza e densidade do material, enquanto que a sua microestrutura típica é mostrada na Figura 3.1.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática (velocidade aproximada de alongamento de 2 mm/min) da liga-Al segundo a orientação longitudinal (de laminação) da placa (L). Média aritmética de três espécimes ensaiados. Dureza e densidade da liga são também reportadas.

Temperatura (°C)	E (GPa)	SE (MPa)	SR (MPa)	RA (%)	AL (%)*	HV**	ρ (g/cm ³)
25	71	395	470	19	17	140	2,8
100	69	341	391	21	19	—	—

* $L_0=8$ mm

** Valor convertido a partir de dureza Rockwell superficial, na escala 15 T (esfera com diâmetro de 1,6 mm e carga de 150 N), por meio da norma SAE J 417

Figura 3.1 - Microestrutura fortemente texturizada da liga de alumínio 7475-T7351 (Toti & Spinelli, 2004).

Segundo a norma SAE-AMS 4202C (2002), o tratamento termomecânico T7351 imposto à liga de alumínio 7475, cujos elementos de liga principais são Zn e Mg, é realizado em 4 passos sequenciais, os quais são descritos abaixo:

1. Aquecimento no intervalo de 460-500°C para completa solubilização e homogeneização dos elementos de liga, seguido de resfriamento em água a uma temperatura $\leq 40^{\circ}\text{C}$.
2. Deformação controlada por laminação, entre 1,5 e 3%.
3. Novo aquecimento no intervalo de 100-135°C, por um período de 3 a 24 h.
4. Envelhecimento entre 155-175°C, sob uma taxa de aquecimento que não exceda 20°C/h, por um tempo entre 8 e 30 h.

3.1.3 Liga de Titânio

Avaliou-se uma liga aeronáutica Ti6Al4V, fornecida na forma de placa laminada a quente com 12,5 mm de espessura, tratada para a condição recozida conforme norma SAE-AMS 4911 (2002). Segundo esta norma, o tratamento termomecânico imposto a liga obedece a seguinte sequência:

1. Um tarugo resultante de fusão e re-fusão sob pressão e vácuo para a eliminação de gases oxigênio e hidrogênio é laminado na temperatura de 900°C.
2. A placa obtida é recozida por uma hora em temperatura de 720°C, e resfriada ao ar.
3. A placa é descamada e aplainada para a espessura final.

A composição química da liga-Ti, listada na Tabela 3.3, foi determinada pela técnica de espectrometria de emissão óptica e confrontada com a especificação estabelecida na norma SAE-AMS 4911 (2002), a qual é também apresentada Tabela 3.3.

Conclui-se da tabela abaixo que a composição química do material ensaiado encontra-se dentro das faixas de valores normatizados.

As propriedades mecânicas da liga Ti, obtidas de ensaios de espécimes com seção transversal circular com diâmetro de 12,5 mm, são apresentadas na Tabela 3.4, juntamente à dureza e densidade da liga, enquanto que a sua microestrutura típica é mostrada na Figura 3.2.

Tabela 3.3 - Composições químicas, determinada para a liga-Ti6Al4V ensaiada e requerida pela especificação SAE-AMS 4911 (2002). Porcentagens em massa.

Elemento	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Amostra	6,189	4,213	0,081	0,023	–	–	–	Bal.
SAE-AMS 4911	5,5-6,7	3,5-4,5	<0,30	<0,20	<0,10	<0,05	<0,01	Bal.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática (2 mm/min) da liga-Ti segundo a orientação longitudinal (de laminação) da placa (L). Média aritmética de três espécimes ensaiados. Dureza e densidade da liga são também reportadas.

Temperatura (°C)	E (GPa)	SE (MPa)	SR (MPa)	RA (%)	AL (%)*	HV**	ρ (g/cm ³)
25	114	830	900	30	14	275	4,6
400	80	595	642	23	10	–	–

* $L_0=8$ mm

** Valor convertido a partir de dureza Rockwell superficial, na escala 15 T (esfera com diâmetro de 1,6 mm e carga de 150 N), por meio da norma SAE J 417

Figura 3.2 - Microestrutura texturizada da liga de titânio Ti6Al4V (Gregui & Bose, 2005).

3.1.4 Aço PH

Ensaiou-se um aço inoxidável martensítico PH 15-5 (versão livre de ferrita do aço PH 17-4) laminado a quente e endurecido por precipitação e tratado termicamente conforme a norma SAE-AMS 5659 (2002). Segundo esta norma, o tratamento termomecânico imposto ao aço obedece tipicamente o roteiro:

1. Laminação entre 900-1100°C.
2. Solubilização, ou homogeneização, entre 1025-1050°C e resfriamento em óleo ou ar para obtenção de martensita.
3. Usinagem de desbaste.
4. Envelhecimento a 538°C durante 4 horas para revenimento da martensita e reações de precipitação causando fortalecimento da liga.
5. Usinagem para a espessura final.

Placas de aço PH 15-5 (cuja composição química é fornecida na Tabela 3.5) com 12,5 mm de espessura foram fornecidas pela Embraer S/A. A empresa tem grande interesse em empregá-lo em substituição às de ligas-Ti devido ao relativamente alto custo e freqüente escassez no mercado internacional destas últimas, como resultado de sua grande demanda pela aviação e equipamentos militares, particularmente em épocas belicistas.

A composição química do aço, listada na Tabela 3.5, foi determinada pela técnica de espectrometria de emissão óptica, e confrontada com a especificação estabelecida na norma SAE-AMS 5862 (2002), esta também suprida na Tabela 3.5. Comparando-se com a referida norma, verifica-se que o material encontra-se dentro da faixa de valores por ela estabelecidos.

As propriedades mecânicas do aço inoxidável PH 15-5 fortalecido por precipitação, determinadas a partir do ensaio de corpos de prova (cdps) com seção transversal circular com diâmetro de 12,5 mm, são apresentadas na Tabela 3.6, juntamente à dureza e densidade do material, enquanto que a sua microestrutura típica está na Figura 3.3.

Tabela 3.5 - Composições químicas, determinada para o aço PH 15-5 ensaiado e requerida pela especificação SAE-AMS 5862 (2002). Porcentagens em massa.

Elemento	Si	Al	C	Co	Cr	Cu	Mn	Mo
Amostra	0,463	0,011	0,039	0,045	14,812	3,165	0,741	0,192
SAE-AMS 5862	<1,0	-	<0,07	-	14,0- 15,5	2,5-4,5	<1,0	-
Elemento	Nb	Ni	P	S	Ti	V	W	Fe
Amostra	0,283	4,691	0,021	0,001	0,021	0,048	0,042	Bal.
SAE-AMS 5862	0,15- 0,45 (+Ta)	3,5-5,5	<0,03	<0,015	—	—	—	Bal.

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas em tração monotônica quase-estática (2 mm/min) do aço PH 15-5 segundo a orientação longitudinal (de laminação) da placa (L). Média aritmética de três espécimes ensaiados. Dureza e densidade da liga são também reportadas.

Temperatura (°C)	E (GPa)	SE (MPa)	SR (MPa)	RA (%)	AL (%)*	HV**	ρ (g/cm³)
25	186	1035	1110	41	11	265	7,9
400	166	878	943	33	09	—	—

* $L_0=8$ mm

** Valor convertido a partir de dureza Rockwell superficial, na escala 15 T (esfera com diâmetro de 1,6 mm e carga de 150 N), por meio da norma SAE J 417

Figura 3.3 - Microestrutura texturizada do aço PH 15-5 tratado para a condição H1000 (Gregui & Bose, 2005).

Assim como para todas as ligas metálicas anteriormente descritas, a face de desgaste nos ensaios de deslizamento PSD é a ST (ou L).

3.2 Laminados Compósitos Poliméricos

3.2.1 Considerações Iniciais

Laminados CMP foram empregados neste estudo na forma de discos rotativos friccionados contra os pinos metálicos fixos. Foram eles (laminados): (i) Carbono-Epoxi (C-EPX), e (ii) Carbono-Poli(Sulfeto de Fenileno) (C-PPS), ambos

fornechos pela Embraer S/A. A estrutura básica, repetida ao longo da espessura dos laminados CMP é ilustrada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Esquemático da arquitetura básica de camadas dos laminados CMP, cuja seqüência de empilhamento é [(0/90),(+45/-45)₂,(0/90)].

3.2.2 Carbono-Epoxi

O laminado Carbono-Epoxi (C-EPX) é constituído por resina termorrígida epóxi, tenacificada com partículas de elastômero termoplástico e fortalecida com fibras contínuas de carbono numa fração volumétrica de aproximadamente 60%. Ele é confeccionado por meio da justaposição de 24 lâminas de tecido bidirecional 0/90° com trancamento 5HS (*harness satin*) pré-impregnado com oligômero epoxídico, reproduzindo-se 6 vezes o arranjo básico [(0/90),(+45/-45)₂,(0/90)] mostrado na Figura 3.4, e perfazendo desta forma uma espessura total do laminado de 5 mm. Os laminados foram consolidados em autoclave, por meio de bolsa de vácuo, em

temperatura próxima a 180°C, A microestrutura do CMP C-EPX é mostrada na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Microestrutura da seção longitudinal do laminado termorrígido C-EPX com distribuição quase-isotrópica de fibras no plano.

As propriedades mecânicas básicas do laminado C-EPX foram determinadas sob carregamento em flexão a três pontos (F3P) a partir de placas nas dimensões no plano de (150x100) mm² (Figura 3.6). A Tabela 3.7 lista as propriedades de flexão do material, juntamente aos seus valores de dureza e de densidade mássica.

(a)

(b)

Figura 3.6 - (a) Placa de laminado termorrígido C-EPX ensaiadas em flexão. Os espécimes para ensaios de desgaste foram extraídos de placas similares a esta; (b) Estrutura química da resina termofixa EPX.

Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas básicas em flexão lenta sob três pontos do laminado C-EPX à temperatura ambiente. Média aritmética de três espécimes ensaiados. Dureza e densidade do laminado são também reportadas.

E (GPa)	RF (MPa)	ϵ_{CM} (%)	TCM (MJ/m ³)	HV*	ρ (g/cm ³)
42,3	727	1,9	7,6	120	1,6

* Valor convertido a partir de dureza Rockwell superficial, na escala 15 T (esfera com diâmetro de 1,6 mm e carga de 150 N), por meio da norma SAE J 417

3.2.3 Carbono-Poli(Sulfeto de Fenileno)

O laminado Carbono-Poli-Sulfeto de Fenileno (C-PPS) é formado por resina termoplástica PPS também reforçada com fibras contínuas de carbono numa fração volumétrica de aproximadamente 60%. Ele é confeccionado por meio da justaposição de 16 lâminas de tecido bidirecional 0/90° com trançamento 5HS (*harness satin*) semi-impregnado com o polímero PPS, reproduzindo-se 4 vezes o arranjo básico [(0/90),(+45/-45)₂,(0/90)] mostrado na Figura 3.4, e perfazendo também uma espessura total do laminado próxima de 5 mm. Os laminados foram consolidados por compressão a quente sob uma temperatura do forno de aproximadamente 320°C e do molde de 170°C (Costa, 2006).

A microestrutura do CMP C-PPS é mostrada na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Microestrutura da seção longitudinal do laminado termorrígido C-PPS com distribuição quase-isotrópica de fibras no plano.

As propriedades mecânicas básicas do laminado C-PPS foram determinadas sob carregamento em flexão a três pontos de placas nas dimensões no plano de (150x100) mm² (Figura 3.8). A Tabela 3.8 lista as propriedades de flexão do material, juntamente aos seus valores de dureza e de densidade mássica.

(a)

(b)

Figura 3.8 - (a) Placa de laminado termorrígido C-PPS ensaiadas em flexão. Os espécimes para ensaios de desgaste foram extraídos de placas similares a esta; (b) Estrutura química da resina termoplástica *p(para)*-PPS. No laminado, a fase branca corresponde ao polímero PPS puro semicristalino, e a preta as fibras de carbono.

Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas básicas em flexão lenta sob três pontos do laminado C-PPS à temperatura ambiente. Média aritmética de três espécimes ensaiados. Dureza e densidade do laminado são também reportadas.

E (GPa)	RF (MPa)	ϵ_{CM} (%)	TCM (MJ/m ³)	HV*	ρ (g/cm ³)
46,2	767,0	1,7	6,6	85	1,6

* Valor convertido a partir de dureza Rockwell superficial, na escala 15 T (esfera com diâmetro de 1,6 mm e carga de 150 N), por meio da norma SAE J 417

4. CORPOS DE PROVA

4.1 Ligas Metálicas (Pinos)

Pinos de desgaste, confeccionados com as ligas metálicas Al7475-T7351, Ti6Al4V e aço PH 15-5 foram usinados segundo o croqui mostrado na Figura 4.1a. Um exemplo da peça pronta e acabada, após lixamento da calota de desgaste com lixa metalográfica de granulometria 600 é mostrado na Figura 4.1b.

A rugosidade média (R_a) da ponta de desgaste dos pinos na condição como-usinada foi, assim como no caso as outras duas ligas metálicas avaliadas, próxima de $0,65\mu\text{m}$, o que satisfaz plenamente as exigências da norma ASTM G-99 neste quesito, que especifica uma rugosidade máxima tolerável para o início do ensaio de $0,8\mu\text{m}$.

(a)

(b)

Figura 4.1 - (a) Geometria e dimensionais dos pinos metálicos de desgaste; (b) Exemplo de pino após acabamento final por lixamento fino.

4.2 Laminados CMP (Discos)

Discos de desgaste, confeccionados com as os laminados compósitos de matriz polimérica EPX e PPS fortalecidos com fibras contínuas de carbono foram usinados segundo o croqui mostrado na Figura 4.2a. Os espécimes foram extraídos das placas de laminados compósitos (Figura 4.2b) por meio de disco de corte diamantado, empregando-se na tarefa uma ferramenta esmeril utilizada na indústria da construção civil, sob abundante refrigeração aquosa para evitar o aquecimento e emplastro das resinas poliméricas, particularmente a termoplástica (PPS).

Continua

Continuação

(c)

Figura 4.2 - (a) Geometria e dimensionais do corpo de prova tipo disco de desgaste; (b) Estratégia de extração dos Cdps de desgaste a partir das placas de laminado CMP similares àquelas ilustradas respectivamente nas Figuras 3.6 e 3.8.

A rugosidade média (R_a) da superfície de desgaste dos laminados CMP na condição de como fabricados foi de aproximadamente $1,15\mu\text{m}$ no caso do C-EPX e de $1,34\mu\text{m}$ para o C-PPS, portanto algo superior ao valor limite requerido pela norma ASTM G-99, que especifica uma rugosidade máxima tolerável para o início do ensaio de $0,8\mu\text{m}$. Decidiu-se, entretanto, conduzir-se os ensaios de desgaste dos discos na condição de como-recebidos, a se realizarem qualquer procedimento de acabamento superficial para reduzir a rugosidade até níveis que satisfizessem a referida norma técnica.

5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL E ANALÍTICO

5.1 Ensaio de Desgaste por Deslizamento Pino-Sobre-Disco

Os ensaios de deslizamento PSD foram conduzidos em condições controladas de laboratório, em que se objetivou primordialmente a determinação do desgaste (em termos de perda de volume) do par de materiais dissimilares mantidos em permanente contato dinâmico durante todo o teste.

Nestas condições, o pino metálico foi submetido a uma carga constante e mantido em uma posição fixa contra uma das faces do disco, com seu eixo principal (do pino) ortogonal à superfície do disco que rotacionou a uma determinada velocidade também constante.

Durante todo o processo de deslizamento entre pino e disco, realizado sob condições fixas de temperatura e umidade (monitoradas por instrumento de medição ilustrado no Apêndice A ao texto - Figura A1), admitiu-se a ação simultânea exercida pelos resíduos assim formados, ou seja, permitiu-se a ação abrasiva dos produtos de desgaste em ambos os elementos pino e disco.

O sistema de ensaio de desgaste PSD empregado neste estudo pertence à Empresa MIB S.A. (*Materials Institute of Brazil*), localizada na cidade de São Carlos, e segue as diretrizes básicas estabelecidas pela norma ASTM G 99-95. A Figura 5.1a mostra uma vista lateral geral do sistema de ensaios PSD, enquanto a Figura 5.1b apresenta um maior detalhamento do par pino-disco em pleno contato durante o transcorrer de um ensaio realizado à temperatura ambiente.

Os suportes de pino e de disco de desgaste foram manufaturados em aço AISI 1050, de acordo com as geometrias e dimensões providas no Apêndice B a este texto (Figuras B1 e B2, respectivamente).

Figura 5.1 - (a) Sistema de ensaio PSD empregado neste estudo; (b) Detalhe do par pino-disco de desgaste por fricção (ensaio à temperatura ambiente).

Utilizaram-se nos ensaios cargas de, respectivamente, 10 kgf e 20 kgf (anilhas de ferro fundido foram pesadas e aferidas em dispositivo mostrado no Apêndice A do texto - Figura A2), e empregaram-se temperaturas de, respectivamente, 25°C e 100°C. Todas as possíveis combinações entre ligas metálicas (na forma de pinos) e CMPs (discos), num total de seis (06), foram avaliadas. A velocidade de rotação do disco CMP foi mantida em 155 RPM (rotações por minuto), dando origem a uma pista circular de desgaste no disco, com aproximadamente 36 mm de diâmetro, o que resultou, após cerca de 5400 ciclos, em uma distância percorrida no deslizamento de 610 m, para um tempo de aproximadamente 45 min. de desgaste contínuo.

A Figura 5.2 mostra o sistema de ensaio equipado com forno acoplado a um controlador PID para a realização dos ensaios na temperatura de 100°C. O tempo de residência do par pino-disco no interior do forno, antes do início do ensaio propriamente dito, foi apenas o suficiente para o completo equilíbrio da temperatura almejada em todos os componentes.

(a)

Continua

Continuação

Figura 5.2 - (a) Vista geral do sistema de ensaio equipado com um forno; (b) Detalhe do forno com a montagem do sistema pino-disco em seu interior.

Após o término dos ensaios, todos os fragmentos oriundos do desgaste entre pino e disco foram cuidadosamente coletados por meio da completa varrição do par de desgaste e dos dispositivos de suporte, empregando-se um pincel, sendo posteriormente armazenados em sacos plásticos individualizados e lacrados para subsequente análise ao microscópio de varredura (MEV) e, quiçá, em uma microsonda analítica (EDX) e em difratômetro de raios-X.

Da mesma forma, os pares pino/disco foram também cuidadosamente embalados em recipientes individualizados e estanques, de modo a evitarem-se quaisquer danos e contaminações que pudessem prejudicar as futuras análises ópticas, metrológicas, fratrográficas e químicas das partes desgastadas.

5.2 Cálculo da Perda de Volume por Desgaste

Basicamente, a perda de volume por desgaste dos pinos e dos discos foi obtida pela conversão da perda de massa de cada peça, considerando-se a densidade dos materiais correspondentes (que é tabelada no Capítulo 3). As massas iniciais dos pinos e dos discos (ou seja, antes do ensaio de desgaste) e finais (após o término destes) foram obtidas em balança de precisão mostrada no Apêndice A deste texto (Figura A3).

5.3 Cálculo da Taxa de Desgaste

As taxas de desgaste dos pinos e dos discos foram obtidas por meio da Eq.(1) desenvolvida por Archard & Hirst (item 2.2.3.6), que leva em conta, respectivamente, a perda de volume por desgaste, a distância percorrida no correspondente deslizamento, e o peso aplicado ao pino incidindo normalmente na superfície de desgaste do disco sob a ação de uma força.

5.4 Condições e Variáveis do Ensaio de Desgaste e Códigos de Identificação dos Pares de Fricção

A Figura 5.3 resume todas as combinações de pares de fricção, cargas de contato pino-disco e temperaturas de ensaio de deslizamento PSD empregadas no presente estudo.

Figura 5.3 - Todas possíveis combinações entre pares de fricção e variáveis de ensaio de desgaste PSD realizadas nesta dissertação de mestrado.

A Figura 5.4 mostra os códigos empregados na identificação dos ensaios de desgaste PSD, considerando-se, respectivamente, o par de fricção (pino metálico e disco compósito, respectivamente), a temperatura de ensaio, e a carga de contato entre os elementos de desgaste.

Figura 5.4 - Códigos de identificação dos ensaios de desgaste PSD. Material do Disco = EPX: Carbono-Epóxi, PPS: Carbono-PPS; Material do Pino = PH: Aço PH 15-5, AL: Liga-Al 7475-T7351, TI: Liga-Ti6Al4V; Carga Aplicada = 10: 10 kg, 20: 20 kg; Temperatura de Ensaio = 25: 25°C, 100: 100°C.

5.5 Medidas de Rugosidade Superficial

Nas medidas de rugosidade média das superfícies metálica e compósita no início do ensaio de desgaste por deslizamento PSD foi empregado um rugosímetro eletro-mecânico Talysurf 10 da Taylor Hobson®, com resolução vertical de 1,2 nm e pertencente ao Laboratório de Metrologia do Laboratório de Máquinas e Ferramentas (LAMAFE) da EESC-USP.

Após os ensaios, a mensuração da rugosidade superficial das superfícies de desgaste dos pinos metálicos e dos discos compósitos foi realizada em um rugosímetro eletro-mecânico Form Talysurf PGI 820 da Taylor Hobson® (Figura 5.5), com resolução vertical de 3,2 nm e pertencente ao Grupo Schaeffler de Sorocaba.

Figura 5.5 - Vista geral do rugosímetro Form Talysurf PGI 820 da Taylor Hobson® empregado neste estudo.

Foram realizadas medidas de rugosidade média R_a , que consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos de perfil de rugosidade, em relação ao perfil médio. Este último corresponde a uma linha horizontal tal que, no comprimento L (Figura 5.6), a soma das áreas cheias acima da linha é igual à soma das áreas vazias abaixo, considerando a superfície sem ondulação.

Figura 5.6 - Esquemático de um perfil genérico de rugosidade em que são mostrados os elementos básicos para a determinação do índice de rugosidade média R_a .

As Figuras 5.7a e 5.7b mostram o procedimento de avaliação da textura superficial das superfícies desgastada de, respectivamente, um pino metálico e do correspondente disco compósito após os ensaios de desgaste PSD.

Figura 5.7 - (a) Processo de medição de rugosidade realizada na superfície de desgaste de um pino metálico; (b) Em um disco composto.

A Figura 5.8 ilustra as trajetórias de medição, sobre as superfícies de desgaste dos pinos e dos discos, respectivamente, seguida pela agulha do perfilômetro durante a determinação dos correspondentes perfis de rugosidade dos pares de desgaste PSD.

Figura 5.8 Trajetória de medição do perfil de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) No pino metálico; (b) No disco composto.

5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura e Micro-Análise Química

Após os ensaios de desgaste, alguns corpos-de-prova na forma de pinos metálicos, assim como alguns produtos de desgaste na forma de pó, foram submetidos à inspeção fractográfica em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nestas análises, foi utilizado um equipamento marca LEO - Carl Zeiss®, série 440, acoplado a um detector de EDX da marca Oxford® modelo 7060, operando no modo de imagens através de elétrons secundários acelerados sob uma diferença de potencial de 20 kV, pertencente ao Instituto de Química de São Carlos. Ampliações de imagem de 50 a 3000 X foram empregadas de modo à melhor visualizar os aspectos da superfície de desgaste da ponta dos pinos, enquanto que ampliações máximas de 1500 X foram tipicamente empregadas na inspeção dos pós residuais de desgaste.

A análise das superfícies (trilhas) de desgaste dos discos compósitos foi realizada apenas por meio de um microscópio estereoscópico Leica® para trabalhos de rotina em campo claro com ampliações de imagem entre 6,3 a 40 X.

Na preparação das amostras na forma de pós, estes foram dispersos em uma fita de carbono, realizando-se posteriormente a deposição de um filme fino de ouro sobre as amostras de modo a incrementar a sua condutividade elétrica e possibilitar a aquisição de imagens com melhor definição.

Análises químicas por microsonda EDX foram realizadas nas pontas desgastadas dos pinos metálicos, bem como nas trilhas de desgaste dos discos compósitos. Infelizmente não foi possível a verificação composicional dos pós de desgaste por meio desta técnica, em virtude do pouco tempo existente para as

análises, da pequena quantidade de material disponível, bem como pela necessidade da aspersão de ouro sobre as amostras particuladas de modo à melhor visualizá-las, o que inviabilizaria, ou comprometeria futuras análises das mesmas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Desgaste dos Pares de Fricção Pino-Disco

6.1.1 Comportamento Geral

Neste estudo, foi exclusivamente determinado o desgaste em termos de perda global de volume do par de deslizamento pino-disco. Isto porque o interesse maior é no desempenho geral do sistema tribológico, e não no resultado de seus componentes individuais. De fato, a rigor, desgaste é uma propriedade característica de cada sistema tribológico, não cabendo quaisquer extrapolações quanto ao desempenho de seus componentes em circunstâncias distintas daquela originalmente avaliada. Ademais, considerado o caso de uma junta mecânica entre laminados compósitos unidos por prendedores metálicos, a folga gerada pelo desgaste decorrente da fricção entre pino e furação é mensurada em unidades de volume (e não de massa), e ambos os materiais em contato contribuem decisivamente para o alargamento da folga com o passar do tempo, sob o esforço aplicado e nas condições vigentes.

De qualquer modo, merece ser destacado que os resultados obtidos neste estudo revelaram que o melhor, ou o pior desempenho (ou seja, respectivamente o menor, ou o maior desgaste) dos pares de fricção pino-disco sempre coincidiu com o melhor, ou pior desempenho, respectivamente, dos discos confeccionados em

laminados CMPs. Em outras palavras, o ranqueamento do desempenho em desgaste dos pares pino-disco sempre correspondeu exatamente ao ranqueamento dos discos CMPs. Entretanto, nem sempre estes ranqueamentos corresponderam àquele dos pinos metálicos, embora tenha freqüentemente havido uma boa correspondência entre estes dados experimentais.

Estes fatos são mais claramente entendidos através da análise da Figura 6.1a, em que se verifica a absoluta coincidência entre os picos e vales da perda de volume por desgaste dos pares pino-disco (traço em amarelo) e dos discos CMPs (em azul). Nota-se também que os dados relativos ao desgaste dos pinos metálicos (traçados em magenta) guardam uma boa correlação com aqueles pares de dados (pino-disco e disco, respectivamente), especialmente no caso dos desgastes mais severos.

Continua

Continuação

Figura 6.1 - (a) Perda de volume por desgaste dos pinos metálicos, dos discos CMPs, e dos conjuntos pino-disco, respectivamente; (b) Correlações entre perda de volume por desgaste dos pinos e discos, individualmente, relativamente aos conjuntos pino-disco. A nomenclatura dos pares de fricção e das condições de ensaio segue aquela previamente estabelecida no Capítulo 5 deste texto.

A Figura 6.1b demonstra perfeita coincidência dos ranqueamentos de desgaste dos discos e dos pares pino-disco, quando uma excelente correlação linear de dados é obtida (curva tracejada em azul), enquanto que uma correlação linear mais pobre é estabelecida entre os dados de desgaste dos pinos plotados contra os dos pares pino-disco (tracejado em vermelho).

A Figura 6.2 reproduz os dados experimentais de desgaste dos pares pino-disco anteriormente fornecidos na Figura 6.1a, porém agora re-ordenados em ordem crescente de desgaste em volume no eixo das abscissas.

Os círculos tracejados em vermelho e verde identificam, respectivamente, os pares de desgaste pino-disco que apresentaram os piores e os melhores

desempenhos nas diversas condições de ensaio em termos de temperatura e de carga normal empregadas.

A Tabela 6.1 lista estes pares pino-disco e as respectivas condições de ensaio de desgaste PSD.

Numa primeira apreciação dos dados da tabela abaixo, poder-se-ia inferir que os discos de laminado C-PPS (simplesmente identificados como PPS na tabela) apresentam muito melhor desempenho em desgaste (i.e., menor desgaste) que os confeccionados em C-EPX, e que os pinos de aço (PH) são significativamente superiores (desgastam menos) aos de liga de titânio (TI). Entretanto, como são os pares pino-disco que devem ser prioritariamente avaliados neste estudo, e não seus componentes metálicos e compósitos individuais, o par PH / PPS aparenta ser o mais indicado para uso na maioria das circunstâncias avaliadas (i.e., menor desgaste), enquanto que nenhum par, *a priori*, parece ser o mais indesejável na maioria das circunstâncias. Entretanto, os dados da Figura 6.2 indicam que, independentemente do laminado compósito empregado, a liga-Ti não é uma boa escolha nos casos em que resistência ao desgaste é um critério determinante de projeto, tal como pode vir a ser o caso, por exemplo, de juntas mecânicas de compósitos unidos por prendedores metálicos.

Figura 6.2 Ordenamento crescente quanto à perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD. A nomenclatura dos pares de fricção e das condições de ensaio consta no item 5.4 desta Dissertação.

Tabela 6.1 - Pares de fricção apresentando, respectivamente, os melhores e os piores desempenhos em desgaste nas várias condições de ensaio de deslizamento PSD.

ENSAIO	25°C&10kgf	100°C&10kgf	25°C&20kgf	100°C&20kgf
MELHOR PAR	PH / PPS	AL / PPS	PH / PPS	PH / PPS
PIOR PAR	PH / EPX	TI / EPX	AL / EPX	TI / PPS

6.1.2 Efeito da Carga Aplicada ao Pino

A Figura 6.3 mostra o efeito da carga aplicada ao pino de liga-Al, no desgaste dos pares pino-Al / disco CMP ensaiados sob duas diferentes temperaturas.

Observa-se claramente que o aumento por um fator de 2 na carga aplicada causa, no mínimo, um acréscimo por um fator de 3 no volume desgastado do par de

fricção (caso do compósito EPX ensaiado a 100°C), podendo este incremento no desgaste alcançar até a um fator de 8 (caso do compósito EPX ensaiado a 25°C). É interessante observar que o efeito da carga normal no desgaste dos pares de fricção é maior nos ensaios realizados à temperatura ambiente, relativamente àqueles conduzidos a 100°C. De fato, sob a carga de 10 kgf, os resultados são, em princípio, tais como esperados, ou seja, maior desgaste dos pares na temperatura mais elevada; porém, sob o esforço aplicado de 20 kgf, surpreendentemente tende a ocorrer uma inversão deste comportamento. Entretanto, visto que somente um ensaio foi realizado para condição, vale realçar que os dados mostram apenas uma tendência de comportamento.

Figura 6.3 - Efeito da carga aplicada ao pino de liga-Al, no desgaste dos pares de fricção pino-disco CMP para as duas temperaturas de ensaio.

A Figura 6.4 mostra o efeito da carga aplicada no pino de liga-Ti, no desgaste dos pares pino-Ti / disco CMP ensaiados sob duas diferentes temperaturas.

Observa-se neste caso uma diferenciação muito maior do comportamento de desgaste dos pares tribológicos se comparado ao verificado para o pino

confeccionado em liga-Al (Figura 6.3). Nota-se que o efeito do incremento na carga aplicada é muito maior para o conjunto formado pelo disco de compósito termoplástico C-PPS (particularmente a 100°C), se confrontado ao ocorrido com o disco de compósito termorrígido C-EPX. É interessante observar que o efeito do esforço aplicado ao pino é excepcionalmente pequeno no desgaste do par TI / EPX ensaiado a 100°C, não obstante as grandes perdas de volume deste par de fricção em ambas as cargas de ensaio. De fato, o desgaste do par TI / EPX à temperatura de 100°C e sob carga de 10 kgf é surpreendentemente elevado frente às condições concorrentes. Poder-se-ia concluir daí a grande susceptibilidade da resina termoplástica PPS a variações na pressão nominal de contato com a liga-Ti, em especial na temperatura mais elevada, enquanto que a resina termofixa EPX parece ser menos afetada por variações da carga aplicada ao pino de liga-Ti e mais influenciada pela temperatura do ensaio.

Figura 6.4 - Efeito da carga aplicada ao pino de liga-Ti, no desgaste dos pares de fricção pino-disco CMP para as duas temperaturas de ensaio.

A Figura 6.5 mostra o efeito da carga aplicada no pino de aço PH 15-5, no desgaste dos pares pino-PH / disco CMP ensaiados sob duas diferentes temperaturas.

Verifica-se, em geral, um desempenho muito melhor (i.e., menor desgaste) dos pares tribológicos contendo o pino de aço PH, comparativamente ao emprego de, respectivamente, pinos de liga-Al (Figura 6.3) e de liga-Ti (6.4), especialmente sob a temperatura de 100°C. Pode-se concluir, portanto, pela relativamente alta estabilidade térmica exibida pelos sistemas de desgaste formados por pino de aço inoxidável martensítico deslizando contra os laminados compósitos em questão. Numa primeira análise, este comportamento atrativo dos pares de fricção contendo o aço PH poderia se creditado à natureza antioxidante da liga.

Figura 6.5 - Efeito da carga aplicada no pino de aço inox PH 15-5, no desgaste dos pares de fricção pino-disco CMP para duas temperaturas de ensaio.

Entretanto, um sensível diferencial de comportamentos de desgaste ainda existe com relação aos diversos pares tribológicos formados com o aço PH. Assim,

embora o par PH / PPS ensaiado a 25°C seja o mais afetado pelo incremento na carga aplicada ao conjunto (variação próxima a uma ordem de magnitude), ele sempre apresenta o melhor desempenho (ou seja, o menor desgaste). Ao contrário, embora o par PH / EPX ensaiado a 100°C seja talvez o menos afetado, em termos percentuais, pela variação da carga de contato entre pino e disco, ele invariavelmente apresenta os máximos valores de desgaste (ou seja, os piores desempenhos).

A Figura 6.6 apresenta alguns dos resultados de desgaste por deslizamento PSD, em termos de perda de volume, anteriormente apresentados nas Figuras 6.3 a 6.5, considerando-se agora apenas os resultados relativos aos discos C-PPS rotativos atuando contra, respectivamente, os três tipos de pinos metálicos, nas duas temperaturas de ensaio e sob as duas cargas aplicadas.

Nota-se o desgaste causado pelo emprego do pino de liga-Ti, para ambas as cargas aplicadas e sob a temperatura de 100°C, é o mais crítico dentre todas as combinações de pares de fricção envolvendo o laminado C-PPS. No extremo oposto, o uso do pino de aço PH à temperatura ambiente gera o mínimo desgaste do par de fricção, sob ambas as cargas impostas ao pino metálico. Já a utilização do pino de liga-Al conduz, grosso modo, a desgastes intermediários dos pares formados com os laminados CMPs.

Figura 6.6 - Efeito da carga aplicada ao pino de desgaste, na perda de volume dos pares pino metálico-disco de C-PPS para as duas temperaturas de ensaio.

A Figura 6.7 apresenta alguns dos resultados de desgaste por deslizamento PSD, em termos de perda de volume, anteriormente apresentados nas Figuras 6.3 a 6.5, considerando-se apenas os resultados relativos aos discos C-EPX rotativos atuando contra, respectivamente, os três tipos de pinos metálicos, nas duas temperaturas de ensaio e sob as duas cargas aplicadas.

Observa-se que o pior caso (i.e., máximo desgaste) é, assim como no caso do laminado C-PPS (Figura 6.6), alcançado pelo compósito C-EPX quando friccionado contra o pino de liga-Ti a 100°C, para ambas as cargas normais empregadas. Observa-se, neste caso, o pequeno efeito desta variável nos resultados. Destaca-se, novamente, o elevado desgaste exibido pelo par TI / EPX a 100°C e 10 kgf.

À semelhança do C-PPS (Figura 6.6), pode-se também assumir que, em geral, o laminado C-EPX desempenha melhor (i.e., ambos o disco e o par pino-disco desgastam menos) quando operando contra o pino de aço PH. O máximo efeito da

carga normal aplicada é verificado para o pino de liga-Al, especialmente nos ensaios realizados à temperatura ambiente.

Figura 6.7 - Efeito da carga aplicada ao pino de desgaste, na perda de volume dos pares pino metálico-disco de C-EPX para as duas temperaturas de ensaio.

Na Figura 6.8 são plotados os dados de desgaste dos pares pino-disco anteriormente apresentados nas Figuras 6.3 a 6.5, considerando-se apenas a temperatura de ensaio de 25°C, nas duas cargas aplicadas.

Nota-se que os piores desempenhos sob um carregamento de 20 kgf são obtidos para ambos os tipos de disco compósito, respectivamente confeccionados com matrizes termoplástica PPS e termorrígida EPX, friccionados contra pinos de liga-Al. De fato, os pares de fricção com liga-Al são os mais afetados pela variação na carga normal aplicada aos discos, exibindo grandes aumentos no volume desgastado com o incremento da carga mecânica. O par liga-Ti / C-PPS apresenta comportamento de desgaste similar aos acima referidos, enquanto que os desgastes

menos pronunciados são, em geral, obtidos para os pares contendo o pino de aço PH, sob ambas as cargas aplicadas.

Figura 6.8 - Efeito da carga aplicada ao pino de desgaste na perda de volume do par pino-disco à temperatura ambiente.

A Figura 6.9 apresenta os dados de desgaste dos pares pino-disco anteriormente apresentados nas Figuras 6.3 a 6.5, considerando-se apenas a temperatura de ensaio de 100°C, nas duas cargas aplicadas.

Figura 6.9 - Efeito da carga aplicada no pino de desgaste na perda de volume do par pino-disco a 100°C.

Verifica-se o excepcional acréscimo no volume desgastado do par TI / PPS devido ao incremento da carga normal. Um comportamento intermediário aos pares com pinos de liga-Ti (máximo desgaste) e com pinos de aço PH (mínimo desgaste) é observado para os pares de fricção com pino de liga-Al.

6.1.3 Efeito da Temperatura de Ensaio

A Figura 6.10 ilustra o efeito da temperatura de ensaio no comportamento de desgaste dos laminados C-PPS e C-EPX deslizando contra o pino de liga-Al, sob a ação de duas distintas cargas normais aplicadas no ensaio.

Observam-se comportamentos de desgaste pouco afetados pela temperatura de ensaio para dois dos quatro casos avaliados. Um leve e inesperado decréscimo do desgaste com o aumento da temperatura é notado para o par AL / PPS sob a

carga de 20 kgf, o que pode ser creditado a efeitos estatísticos, visto que apenas um conjunto (ou par) de desgaste foi ensaiado para cada condição avaliada. Portanto, mais ensaios devem ser conduzidos para esclarecer esta pretensa tendência ora observada. Por outro lado, o acréscimo no desgaste obtido para os pares de fricção liga-Al / C-EPX e liga-Al / C-PPS a 10 kgf, decorrente do aumento da temperatura, pode ser interpretado como natural e já esperado.

Figura 6.10 - Efeito da temperatura de ensaio no desgaste dos pares de fricção pino-Al / disco CMP, sob as duas cargas aplicadas nos ensaios.

A Figura 6.11 demonstra o efeito da temperatura de ensaio no comportamento de desgaste dos laminados C-PPS e C-EPX deslizando contra o pino de liga-Ti, sob duas diferentes cargas aplicadas no ensaio.

Nota-se que o efeito temperatura é brutal no comportamento de desgaste dos pares de fricção TI / PPS e TI / EPX sob uma carga de 20 kgf, com supremacia absoluta do desgaste do primeiro par sobre o segundo em ambas as temperaturas

de ensaio. Sob a ação da carga mais baixa, de 10 kgf, os efeitos da temperatura são, no caso do par TI / PPS, tal como esperados, ou seja, de menor monta, embora para o par TI / EPX isto não seja verdadeiro em absoluto. Outra vez, destaca-se o ponto de dados referente ao par TI / EPX a 100°C e 10 kgf, que é deveras elevado por razões a serem propostas e discutidas na continuidade do texto.

A Figura 6.12 revela o efeito da temperatura de ensaio no comportamento de desgaste dos laminados C-PPS e C-EPX deslizando contra o pino de aço PH martensítico, nas duas distintas cargas aplicadas no ensaio PSD.

Nota-se apenas o discreto efeito da temperatura nos resultados de desgaste. Pares opostos, de PH / PPS a 10 kgf e de PH / EPX a 20 kgf, exibem comportamentos limítrofes mínimo e máximo, respectivamente.

Figura 6.11 - Efeito da temperatura de ensaio no desgaste dos pares de fricção pino-Ti / disco CMP, sob as duas cargas aplicadas nos ensaios.

Figura 6.12 - Efeito da temperatura de ensaio no desgaste dos pares de fricção pino de aço-PH / disco CMP, sob as duas cargas aplicadas nos ensaios.

Na Figura 6.13 estão plotados alguns dos dados de desgaste dos pares pino-disco anteriormente apresentados nas Figuras 6.10 a 6.12, considerando-se apenas os resultados relativos aos discos de laminado C-PPS atuando contra, respectivamente, os três tipos de pinos metálicos, nas duas temperaturas de ensaio de desgaste PSD.

O pior desempenho do par TI / PPS sob a carga de contato de 20 kgf é notório, assim como o grande efeito do acréscimo da temperatura no incremento da taxa de desgaste. O comportamento inverso ao esperado, de redução do desgaste com o aumento da temperatura de ensaio, é novamente observado para o par de fricção AL / PPS sob carga normal de 20 kgf. Nos casos restantes, à exceção do par PH / PPS sob 10 kgf, todos os outros pares de fricção apresentam pouco ou mesmo nenhum efeito da temperatura em seu comportamento tribológico de desgaste, com

especial destaque neste último caso àquele par contendo o pino de aço inox sob carga de 20 kgf.

Figura 6.13 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume dos pares de fricção pino metálico-disco de C-PPS, para as duas cargas normais aplicadas.

A Figura 6.14 apresenta alguns dos dados de desgaste dos pares pino-disco anteriormente apresentados nas Figuras 6.10 a 6.12, considerando-se apenas os resultados relativos aos discos de laminado C-EPX atuando contra, respectivamente, os três tipos de pinos metálicos, nas duas temperaturas e duas cargas aplicadas nos ensaios de desgaste por deslizamento PSD.

Os pares TI / EPX sofrem um forte efeito da temperatura de ensaio, especialmente sob a carga de 10 kgf, que acelera sobremaneira o desgaste dos conjuntos pino-disco. Chama também a atenção o reduzido desgaste sofrido pelo par AL / EPX sob a carga aplicada de 10 kgf, que surpreende pelo fato de a maioria

dos resultados indicarem o aço PH como o material mais adequado na confecção do pino para garantir pequenos desgastes quando friccionado aos laminados CMPs.

A Figura 6.15 mostra os dados de desgaste dos pares pino-disco anteriormente apresentados nas Figuras 6.10 a 6.12, considerando-se apenas a carga normal de 10 kgf e duas temperaturas de ensaio.

Exceção feita aos pontos de dados relativos aos pares TI / EPX e PH / PPS, que indicam aumentos no volume desgastado da ordem de 4 vezes devido ao acréscimo da temperatura, os resultados restantes revelam um efeito consideravelmente pequeno da variável térmica no desempenho tribológico dos pares de fricção avaliados sob a carga de 10 kgf.

Figura 6.14 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume dos pares de fricção pino metálico-disco de C-EPX, para as duas cargas aplicadas.

Figura 6.15 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume do par pino-disco sob carga de 10 kgf.

Na Figura 6.16 são plotados os dados de desgaste dos pares pino-disco anteriormente apresentados nas Figuras 6.10 a 6.12, considerando-se apenas a carga normal de 20 kgf e duas temperaturas de ensaio.

Observa-se a clara distinção de comportamentos de desgaste dos pares de fricção avaliados, em que o emprego do pino de aço PH conduz aos melhores resultados (pequenos desgastes), enquanto os mais altos valores de perda volumétrica de material são relacionados ao pino de liga-Ti, permanecendo os resultados relativos ao pino de liga-Al numa posição intermediária.

Figura 6.16 - Efeito da temperatura de ensaio na perda de volume do par pino-disco sob carga de 20 kgf.

6.2 Taxas de Desgaste

De modo a verificar a consistência dos resultados experimentais obtidos durante os ensaios de desgaste dos pares pino (P) metálico + disco (D) composto, foram calculados os valores da taxa de desgaste conforme a Equação (2.1) proposta originalmente por Archard.

Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 6.17 conjuntamente com os valores de perda de volume por desgaste de todos os pares de fricção avaliados neste estudo, os quais haviam já sido anteriormente apresentados na Figura 6.2.

Na Figura 6.17 são identificados por círculos tracejados roxos os pares de fricção TI / EPX ensaiado a 100°C e 10 kgf, TI / EPX ensaiado a 100°C e 20 kgf, e TI

/ PPS ensaiado a 100°C e 20 kgf, os quais exibiram máximas perdas de volume por desgaste dentre todos aqueles ensaiados neste estudo.

Figura 6.17 - Ordenamento crescente da perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD (linha amarela, conforme Figura 6.2 anterior) e da taxa de desgaste conforme Archard (linha verde).

Observa-se, em geral, uma boa correlação entre os dados de desgaste absoluto dos pares (em termos de perda de volume de pino+disco) e da taxa de desgaste do conjunto. Esta última variável intenciona basicamente normalizar o desgaste volumétrico dos materiais em termos da distância de deslizamento (que foi mantida constante durante todo este estudo) e da carga mecânica aplicada ao pino metálico que é friccionado ortogonalmente ao disco compósito (que variou por um fator de 2 neste trabalho).

Conclui-se, desta forma, que a desejável normalização do desgaste por meio da proposta de Archard não é bem sucedida nos casos em questão, pois os valores de taxa de desgaste para um determinado par de fricção pino-disco, ensaiado a determinada temperatura, nunca coincidem entre si para as duas cargas aplicadas, de respectivamente 10 e 20 kgf. Em outras palavras, não existe uma proporcionalidade do desgaste do par relativamente à carga mecânica aplicada ao pino, o que de certa forma reflete a grande complexidade dos fenômenos tribológicos.

Nota-se que o gráfico de Archard apresentado na Figura 6.17 contém um ponto de dados claramente discrepante da curva de taxa de desgaste, correspondente ao par de fricção TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 10 kgf.

A Figura 6.18 mostra o disco compósito em questão, assim como seu correspondente pino metálico, após o término do experimento de deslizamento PSD. Na mesma figura é apresentado o par TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf, outro conjunto que também atingiu excepcional desgaste por atrito, sendo ambos assinalados na Figura 6.17.

(a)

(b)

Continua

Continuação

Figura 6.18 - (a) Pino, e (b) Disco correspondentes ao par de desgaste TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 10 kgf; (c) Pino, e (d) Disco correspondentes ao par de desgaste TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf.

Verifica-se uma grande similaridade entre os dois pares de desgaste, o que corrobora os volumes de desgaste muito próximos entre os dois conjuntos, como mostra a curva em amarelo da Figura 6.17. Visto que a expressão de Archard computa a carga aplicada no experimento, a taxa de desgaste assim calculada para o par pino-disco menos carregado mecanicamente foi praticamente o dobro daquela do par submetido a uma carga de metade daquele valor, conforme mostra a curva verde na Figura 6.17.

Nota-se que a trilha de desgaste nos discos compósitos acima são bem heterogêneas quanto à sua largura, que varia de um valor mínimo de 2,54 a um máximo de 4,29 mm no caso do par TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 10 kgf (Figura 6.18a,b), e de um mínimo de 2,75 a um máximo de 4,65 mm no caso do par TI / EPX ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf (Figura 6.18c,d), enquanto que o diâmetro médio dos pinos desgastados é de, respectivamente, 4,37 e 4,78 mm, valores que compatibilizam muito bem com a máxima largura atingida pelas

respectivas trilhas criadas nos discos CMPs. Uma possível explicação para estas pistas irregulares (porém ainda perfeitamente circulares) de desgaste dos discos CMPs seria a do desalinhamento entre a direção normal ao plano do disco CMP e o eixo axial do pino metálico. A Figura 6.19 ilustra um evento plausível que pode ter levado a este não alinhamento (seta vermelha tracejada), qual seja, o mau assentamento do disco na base ou suporte de aço, conduzindo a um excesso de desgaste (alargamento da pista) durante a passagem da região mais elevada do disco CMP junto ao pino metálico (devido ao maior esforço de levantamento do peso), comparativamente ao contato do pino com a região do disco situada mais abaixo, ou seja, que está em contato mais íntimo com o suporte metálico giratório (pois nesse caso ocorre o abaixamento do peso).

Chama a atenção o fato de o fenômeno só ter sido observado nos pares contendo pino metálico de liga-Ti e em ensaios realizados a 100°C, indicando um possível efeito da natureza do metal que constitui o pino, bem como da temperatura de ensaio.

Quintelier et al (2006) destaca que, no início do ensaio PSD, o contato entre pino e disco é pontual, resultando em pressões muito elevadas de contato. Isto pode causar deformações bastante elevadas localmente no polímero que constitui o CMP, especialmente sob temperaturas mais elevadas. Também, tem sido experimentalmente demonstrado que, naturalmente, o rompimento da primeira camada polimérica do disco giratório CMP em contato com o pino metálico fixo, expondo a primeira camada de fibras de reforço do compósito, não ocorre ao mesmo tempo ao longo de toda a trilha de desgaste. Além disso, destacam Quintelier et al (2006), dada a complexidade do empilhamento das lâminas individuais formadoras do laminado compósito, as quais são fortalecidas com fibras de carbono também

dispostas segundo as mais variadas orientações no plano, a sua resistência ao desgaste pelo pino metálico depende fortemente do ângulo de ataque deste último sobre o tecido de reforço fibroso, e esta dependência perdura durante toda a execução do ensaio PSD à medida que novas camadas compósitas vão sendo desgastadas ao longo da espessura do disco CMP. Todos estes fatos afetam, em maior ou menor extensão, a cronologia e mecânica da geração da trilha de desgaste no disco compósito, seja nos estágios iniciais do processo de deslizamento PSD, e mesmo naqueles mais avançados.

Figura 6.19 - Possível modo de desalinhamento entre pino metálico e disco compósito durante os ensaios de deslizamento PSD. Note que um círculo perfeito (linha tracejada amarela) se insere exatamente no centro da trilha de espessura heterogênea de desgaste do disco CMP, demonstrando não haver qualquer movimento de descentralização do disco rotativo, nem mesmo deslocamento e/ou inclinação do pino a partir de sua posição original no sistema de ensaio.

Um terceiro e último exemplo que corrobora os questionamentos quanto aos efeitos tanto do material que constitui o pino de desgaste, quanto à temperatura de ensaio na geração de trilhas não-homogêneas nos discos CMPs é mostrado na Figura 6.20 (o correspondente ponto de dados é também indicado por um círculo tracejado roxo na Figura 6.17), e refere-se ao par de fricção TI / PPS ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf. Nota-se, em menor escala que os dois casos anteriores, mas ainda assim sendo perceptível, uma variação da largura da trilha de desgaste no disco compósito, que atinge os valores mínimo de 3,45 mm e máximo de 4,61 mm, contra o diâmetro médio do pino desgastado de 4,77 mm, que é absolutamente compatível à máxima largura atingida pela trilha de desgaste.

Figura 6.20 - (a) Pino, e (b) Disco correspondentes ao par de desgaste TI / PPS ensaiado a 100°C sob carga de 20 kgf.

Cabe mencionar que, segundo Kato & Adachi (2002), que trabalharam com materiais cerâmicos, basicamente três regimes distintos de desgaste podem ser estabelecidos em ensaios de deslizamento PSD: suave, quando a taxa de desgaste está abaixo de $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, severo, cuja taxa de desgaste supera os $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, e intermediário. Caso este critério seja aplicável ao caso ora em estudo,

em que as taxas de desgaste variaram entre aproximadamente $1,4 \cdot 10^{-5}$ a $7,3 \cdot 10^{-4}$ $\text{mm}^3/\text{N.m}$, pode-se concluir que regimes de desgaste de intermediário a severo foram desenvolvidos nos pares de fricção metal-compósito presentemente avaliados.

A Figura 6.21 reproduz o ordenamento crescente da perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD anteriormente fornecido nas Figuras 6.2 e 6.17. Entretanto, desta feita são indicados apenas os pares pino-disco selecionados para uma análise mais detalhada quanto às suas características de desgaste. São eles: (1) PH-EPX-25-10; (4) PH-PPS-25-10; (8) AL-EPX-25-20; (11) AL-PPS-25-20; (21) TI-EPX-100-20; (24) TI-PPS-100-20.

Figura 6.21 - Ordenamento crescente da perda de volume dos pares de fricção nas diversas condições de ensaio de desgaste por deslizamento PSD. São indicados apenas os seis pares pino-disco escolhidos para a continuidade do estudo. Indicação de cores: verde = relativamente pequeno desgaste; azul = médio desgaste; vermelho = grande desgaste; magenta = Disco PPS; marrom = EPX.

Basicamente os critérios empregados para a seleção destes pares de fricção foram:

- (i) Avaliar os regimes mais e menos severos de desgaste, assim como uma condição intermediária (respectivamente denotados pelos quadrados nas cores vermelho, verde e azul na Figura 6.21).
- (ii) Analisar todos os possíveis pares formados entre pinos metálicos (AL, TI e PH) e discos compósitos (PPS e EPX) para determinadas condições de ensaio.

6.3 Análise da Superfície de Desgaste dos Pinos

A Figura 6.22 fornece várias imagens da superfície de desgaste do pino de aço PH após ensaio de deslizamento sobre o disco de C-EPX à temperatura ambiente e sob uma carga normal de 10 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (1) PH-EPX-25-10 na Figura 6.21.

Observa-se um desgaste relativamente pequeno do metal, que apresenta uma superfície com um padrão regularmente espaçado e bem definido de sulcamentos. Uma vista mais ampliada desta superfície mostra que algumas das trilhas contêm um subproduto de cor escura, o qual foi gerado, ou depositado durante o processo de desgaste contra o disco compósito.

A Figura 6.23 fornece os espectros de absorção de energia dispersiva de raios-X obtidos por meio de microsonda analítica durante a avaliação química de duas regiões na superfície de desgaste mostrada na Figura 6.22. A Figura 6.23a

corresponde a uma área limpa da superfície, delineada pelo quadrado verde da Figura 6.22d, e revela, como já esperado, a presença de uma boa parcela dos elementos de liga do aço PH. Já a Figura 6.23b, correspondente à região mais escura observada na superfície do metal desgastado, contornada pelo quadro amarelo na Figura 6.22d, destaca a presença do elemento carbono (29,8% em massa, ou 61,8% atômico), o qual podem ser origem das fibras de reforço e da matriz epoxídica.

Os elementos sódio, enxofre e cloro aparecem como elementos residuais, e, muito provavelmente, sua presença decorra de contaminação da amostra por manuseio incorreto (Na e Cl), bem como devido a ensaios prévios do laminado C-PPS (rico em S) no mesmo sistema de carregamento para desgaste. Além disso, enxofre é também um elemento residual no aço PH 15-5.

Na Figura 6.23c é realizado o mapeamento dos elementos químicos presentes na superfície que contém a área delimitada pelo quadrado amarelo na Figura 6.22d, quando se observa que o local mais rico em carbono coincide exatamente com uma alta concentração do elemento cromo.

Figura 6.22 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (1) PH-EPX-25-10: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 6.23 - (a) e (b) Espectros de absorção da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.22, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura): (c) Mapeamento de elementos químicos na região que abrange toda aquela compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.24 fornece diversas imagens da superfície de desgaste do pino de aço PH após ensaio de deslizamento sobre o disco de C-PPS à temperatura ambiente e sob uma carga normal de 10 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (4) PH-PPS-25-10 na Figura 6.21.

Observa-se uma perda de volume do metal mais modesta que no caso anterior (quando este foi friccionado contra o compósito C-EPX), com a superfície apresentando um padrão de desgaste deveras mais refinado que o caso anteriormente avaliado, a menos do profundo sulco gerado diametralmente na face de desgaste do pino. Uma ampliação da imagem permite visualizar manchas escuras e maiores que no caso anteriormente avaliado, sugerindo a presença de filmes de transferência a partir da contraface de compósito polimérico termoplástico. De fato, o desgaste do par PH-PPS-25-10 foi bem inferior ao do par concorrente PH-EPX-25-10 avaliado anteriormente, o que está de acordo com a presença de um filme de transferência mais bem distribuído de PPS do que de EPX na superfície metálica. Esta presença mais extensiva do filme polimérico misturado a fragmentos de fibra de carbono, tende, segundo Chen et al (2007), a reduzir o coeficiente de fricção através do mascaramento de asperezas e rugosidades na contraface de aço, reduzindo assim a ação abrasiva do metal sobre o compósito.

Aparentemente, a relativamente pequena rugosidade da superfície de aço deslizando sobre o laminado C-PPS (Figura 6.24), se comparada àquela gerada contra o C-EPX (Figura 6.22), favoreceu em certa extensão o ancoramento mecânico do filme de PPS, visto que, de acordo com Quintelier et al (2006), rugosidades muito acentuadas dificultam a acomodação do filme por entre todas as reentrâncias da superfície metálica. Esta rugosidade adequada da superfície de desgaste do metal, atingida durante o deslizamento contra o compósito C-PPS, foi

suficiente para até mesmo compensar a tipicamente baixa energia de superfície dos termoplásticos, os quais têm propriedades antiaderentes e, portanto, grande dificuldade em se acoplarem a outros materiais (Lee et al, 2005).

Entretanto, conforme reportam Yamamoto & Hashimoto (2002 & 2004), há de se ressaltar que o PPS possui uma particularmente boa habilidade de transferir filmes em contra-superfícies de aço, devido à formação de uma interface de FeS formada a partir da reação do metal com o enxofre do polímero.

A Figura 6.25 fornece os espectros de absorção de energia dispersiva de raios-X obtidos por meio de microsonda analítica durante a avaliação química de duas regiões na superfície de desgaste mostrada na Figura 6.24. A Figura 6.25a corresponde a uma área limpa da superfície, definida pelo quadrado verde da Figura 6.24d, e revela, novamente e como já esperado, a presença de substancial parcela dos elementos de liga do aço PH, além de uma quantidade expressiva de enxofre (2,26% em massa, ou 3,83% atômico), que certamente advém do compósito C-PPS. Este elemento pode estar na forma de sulfeto de ferro (FeS), como decorrência de reações tribológicas do PPS com o aço PH (Yamamoto & Hashimoto, 2002 & 2004), e/ou simplesmente como filme polimérico depositado de poli-sulfeto de fenileno impregnado com fragmentos de carbono. A Figura 6.25b, correspondente à região mais escura na superfície metálica de desgaste do aço PH, e destacada pelo quadro amarelo na Figura 6.24d, praticamente reproduz os resultados obtidos na Figura 6.25a, porém indica a presença mais massiva do elemento enxofre na região analisada (3,89% em massa, ou 3,97% atômico), assim como a grande quantidade de carbono (18,4% em massa, ou 50,0% atômico), com este último elemento originado das fibras de reforço e da matriz polimérica termoplástica do laminado compósito.

Na Figura 6.25c é realizado o mapeamento dos elementos químicos presentes em uma região que envolve a área delimitada pelo quadrado amarelo na Figura 6.22d, quando se pode observar que os contornos da mancha escura se ajustam perfeitamente ao perfil de concentração do elemento enxofre (elipses de contorno tracejado amarelo), demonstrando a grande possibilidade da transferência, para a superfície de desgaste do pino, de filmes a partir da contraface compósita durante o ensaio de deslizamento PSD.

(a)

(b)

(c)

Continua

Continuação

(d)

(e)

Figura 6.24 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (4) PH-PPS-25-10: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

(a)

(b)

Continua

Continuação

(c)

Figura 6.25 - (a) e (b) Espectros de absorção da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.24, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura): (c) Mapeamento de elementos químicos na região que abrange toda aquela compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.26 fornece múltiplas vistas da superfície de desgaste do pino de liga-Al após ensaio de deslizamento sobre o disco de C-EPX à temperatura ambiente e sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (8) AL-EPX-25-20 na Figura 6.21.

Chama a atenção nas Figuras 6.26 a & b a grande deformação plástica experimentada pela ponta desgastada do pino de liga-Al, que passa de uma seção circular para quase-elipsoidal.

Um padrão regularmente espaçado e bem definido de riscos na superfície de desgaste é também verificado. Imagens mais ampliadas revelam a presença de um subproduto de desgaste escuro, localizado no fundo de algumas poucas trilhas de sulcamento geradas no processo de desgaste contra o disco compósito.

A Figura 6.27 fornece os espectros de absorção de energia dispersiva de raios-X obtidos por meio de microsonda analítica durante a avaliação química de duas regiões na superfície de desgaste mostrada na Figura 6.26. A Figura 6.27a corresponde a uma área limpa da superfície, delimitadas pelo quadrado verde da Figura 6.26d, e revela, como já esperado, os elementos químicos típicos da liga leve em questão, além da presença de oxigênio, provavelmente na forma de óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3) gerado periodicamente logo após a exposição da liga metálica fresca, devido ao processo cíclico de abrasão, ao ambiente naturalmente oxidante. Já a Figura 6.27b, que corresponde à região mais escura observada na superfície metálica desgastada, e que é destacada pelo quadro amarelo na Figura 6.26d, realça a presença do elemento carbono, que pode estar tanto na forma de substância pura advinda laminado CMP.

Continua

Continuação

Figura 6.26 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (8) AL-EPX-25-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 6.27 - (a) e (b) Espectros de absorção obtidos da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.26, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (região escura).

A Figura 6.28 fornece cinco vistas da superfície de desgaste do pino de liga-Al após ensaio de deslizamento sobre o disco de C-PPS à temperatura ambiente e sob carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (11) AL-PPS-25-20 na Figura 6.21.

Observa-se nas Figuras 6.28 a & b novamente a grande deformação plástica experimentada pela ponta desgastada do pino de liga-Al, embora desta vez a perda de volume do pino de metal leve seja o dobro daquela verificada na fricção da liga com o CMP C-EPX.

Um padrão regularmente espaçado e bem definido de riscos na superfície metálica de desgaste é novamente verificado, indicando o pequeno efeito da natureza da matriz polimérica do compósito de contraface nas características morfológicas da superfície de desgaste do pino metálico. Entretanto, imagens mais ampliadas revelam a presença de um subproduto de desgaste escuro muito mais disseminado, ou difundido que no caso anterior, o que poderia, em princípio, sugerir

uma maior capacidade do polímero termoplástico (PPS) em transferir filmes durante a fricção com o metal, relativamente à resina termorrígida (EPX).

A Figura 6.29 fornece os espectros de absorção de energia dispersiva de raios-X por microsonda analítica durante a avaliação química de duas regiões na superfície de desgaste mostrada na Figura 6.28. A Figura 6.29a corresponde a uma área limpa da superfície (quadrado verde da Figura 6.28d), e revela os constituintes da liga leve de alumínio, além da presença de oxigênio, provavelmente formando óxido de alumínio ao longo dos ciclos de fricção do pino contra o disco. Já a Figura 6.29b, correspondente à região mais escura observada na superfície metálica de desgaste, e destacada pelo quadro amarelo na Figura 6.26d, denuncia a presença do elemento carbono (48,9% em massa, ou 66,4% atômico), o qual advém do desgaste do laminado CMP.

Os resultados mostram que a presença de enxofre é relativamente pequena, se existente, sobre a superfície de desgaste do pino metálico, pois em ambos os casos, ou seja, na área da mancha e fora dela, o teor deste elemento foi praticamente o mesmo, da ordem de 0,85% massa. Tal fato indica que ele eventualmente forme um filme fino sobre a superfície metálica, e/ou dê origem a compostos químicos estequiométricos do tipo sulfeto de alumínio (Al_2S_3). Entretanto, o grande desgaste sofrido pelo pino de liga-Al friccionado contra o laminado C-PPS (Figura 6.28), se comparado ao ocorrido no deslizamento contra o C-EPX (Figura 6.26), dá margens a questionamentos de se realmente as manchas negras na superfície do pino de liga-Al (Figura 6.28) correspondem a um filme termoplástico de transferência para o metal, conforme acima sugerido. De fato, elas podem ser manchas de carbono puro, e mesmo incluir carbeto de elementos metálicos da liga-Al, conforme anteriormente aventado para o par Al-EPX e destacado na Figura

6.26d (quadrado amarelo), os quais possuem forte poder abrasivo, desgastando rapidamente o pino metálico. Merece ser destacado que este filme de carbono puro, contendo eventualmente carbeto (os quais certamente desgastariam o pino metálico), pode inclusive preservar o disco composto de desgaste. Por exemplo, Quintelier et al (2006) observou estes fenômenos durante ensaios PSD de aço contra composto C-PPS. Outras indicações do mesmo efeito são disponíveis na literatura citada no Capítulo 2 desta Dissertação.

(a)

(b)

(c)

Continua

Continuação

Figura 6.28 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (11) AL-PPS-25-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Continua

Continuação

(c)

Figura 6.29 - (a) e (b) Espectros de absorção da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.28, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura): (c) Mapeamento de elementos químicos na região que envolve a área compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.30 fornece diversas imagens da superfície de desgaste do pino de liga-Ti após ensaio de deslizamento sobre o disco de C-EPX à temperatura de 100°C e sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (21) TI-EPX-100-20 na Figura 6.21.

Nota-se uma superfície originada por expressiva perda de material, com um aspecto de que poderia ser classificado como emplastrado, em que forças cisalhantes aplicadas diretamente ao metal durante a fricção contra o disco de desgaste CMP geraram extensivas deformações plásticas no primeiro. Isto é tipicamente observado nos mecanismos de desgaste por adesão, bastante comuns nesta classe de ligas metálicas (Souza et al, 2007). Imagens mais ampliadas

revelam a presença de pequenas crateras na superfície do metal, porém aparentemente sem que se observem subprodutos originados pelo desgaste.

A Figura 6.31 fornece o espectro de absorção de energia dispersiva de raios-X por microsonda analítica durante a avaliação química da região, na superfície de desgaste, delimitada pelo quadrado verde da Figura 6.30d. Destaca-se a expressiva presença de oxigênio (28,9% em massa, ou 53,4% atômico), dada provavelmente à elevada reatividade do titânio com este gás, gerando TiO_2 , em especial sob temperaturas mais acentuadas, que podem ser atingidas localmente independentemente da temperatura nominal do ensaio de desgaste PSD.

(b)

(c)

Continua

Continuação

Figura 6.30 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD código (21) TI-EPX-100-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 6.31 - Espectro de absorção obtido da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.30, na região delimitada pelo quadrado verde.

A Figura 6.32 fornece várias imagens da superfície de desgaste do pino de liga-Ti após o ensaio de deslizamento sobre o disco de C-PPS à temperatura de 100°C e sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (24) TI-PPS-100-20 na Figura 6.21.

Nota-se uma perda muito expressiva de material, com a superfície de desgaste exibindo um padrão regularmente espaçado e bem definido de sulcos relativamente profundos, cuja aparência relembra, em princípio, aquela anteriormente exibida na Figura 6.22 e correspondente ao par de desgaste PH-EPX-25-10. Entretanto, ainda persiste o aspecto de emplastramento da fratura (tal como verificado para a liga-Ti deslizando contra o compósito de EPX), o qual está intimamente associado ao mecanismo de desgaste por adesão (que deve operar, nos casos em questão, concomitantemente ao de abrasão), que é típico das ligas de titânio como decorrência de sua baixa resistência ao cisalhamento plástico e sua reduzida capacidade de encruamento, conforme enfatiza Budinski (1991).

A Figura 6.32e, aplicando-se máxima ampliação de imagem, revela a presença de múltiplas trincas superficiais (indicadas por setas azuis) propagando-se ortogonalmente à direção de esforço circunferencial desenvolvido entre o pino metálico e o disco rotativo de CMP.

A Figura 6.33 fornece os espectros de absorção de energia dispersiva de raios-X por microsonda analítica durante a avaliação química de duas regiões na superfície de desgaste mostrada na Figura 6.32. A Figura 6.33a corresponde a uma área limpa da superfície (quadrado verde da Figura 6.32d), e revela os constituintes da liga de titânio. Já a Figura 6.33b, correspondente ao material formado ou depositado no fundo do entalhe gerado pelo desgaste, o qual é destacado pelo quadro amarelo na Figura 6.32d, permite concluir pela presença, apesar de

relativamente restrita, de carbono (5,4% em massa, ou 18,1% atômico). Este provavelmente advenha do laminado CMP, os quais são elementos reconhecidamente ávidos por carbono. Tal fato poderá ser confirmado, ou descartado, apenas após a execução de análises difratográficas de raios-X. Praticamente não se detecta, como seria de se esperar, o elemento S, que poderia estar na forma de filmes poliméricos de transferência, ou mesmo formando sulfeto de titânio (TiS) sobre a superfície de desgaste do pino. De fato, a ausência de um filme de transferência poderia mesmo ser a responsável pelo grande desgaste do pino metálico de titânio deslizando contra o CMP C-PPS, uma vez que o filme atuaria como um poderoso redutor da fricção entre pino e disco, isolando o metal do efeito abrasivo / tribológico reativo das fibras fortalecedoras de carbono do laminado CMP. Esta ausência do filme pode estar vinculada em algum grau à relativamente elevada rugosidade desenvolvida na superfície de contato do pino metálico, o que dificulta a o acoplamento efetivo do filme às reentrâncias mais severas da superfície do pino, conforme anteriormente já aventado neste texto.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 6.32 - Diversas imagens da superfície de desgaste do pino metálico correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (24) TI-PPS-100-20: (a) Foto macro; (b-e) Diversas ampliações de imagem em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 6.33 - (a) e (b) Espectros de absorção obtidos da micro-análise química da superfície do pino metálico de desgaste mostrado na Figura 6.32, respectivamente nas regiões compreendidas pelos quadrados verde (matriz) e amarelo (mancha escura na raiz do chanfro gerado por desgaste abrasivo).

A Tabela 6.2 lista os valores de rugosidade R_a e de desgaste (em perda de volume) experimentados pelos pinos metálicos acima avaliados.

Tabela 6.2 - Valores de rugosidade R_a mensurados nas superfícies de desgaste dos pinos metálicos (destaque em vermelho) friccionados contra discos CMP em ensaios de deslizamento PSD. Os valores de desgaste volumétrico dos pinos são também fornecidos.

Pinos Metálicos		Rugosidade R_a (μm)	Desgaste (10^{-3} ml)*
01	PH-EPX-25-10	1,8310	0,227
04	PH-PPS-25-10	0,7388	0,126
08	AL-EPX-25-20	0,4559	3,109
11	AL-PPS-25-20	0,4686	6,545
21	TI-EPX-100-20	0,3652	5,769
24	TI-PPS-100-20	1,1802	7,105

* Dados extraídos da Figura 6.1a

Da Tabela 6.2 pode-se concluir que, se os dados são independentemente avaliados quanto à natureza do pino metálico, existe certa proporcionalidade entre a rugosidade da superfície metálica e o nível de desgaste sofrido pela mesma. Este ponto será retornado em maiores detalhes no item 6.4.

A Figura 6.34 mostra um exemplo de perfil de rugosidade R_a mensurado sobre a superfície de desgaste de um pino metálico de aço PH. Dados similares levantados para outros pinos de desgaste presentemente avaliados são fornecidos no Apêndice C deste trabalho.

Figura 6.34 - Perfil de rugosidade da superfície de desgaste do pino de aço PH quando friccionado contra o disco rotativo de compósito C-EPX, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (1) PH-EPX-25-10, em ensaio realizado à temperatura ambiente e sob uma carga de 10 kgf.

6.4 Análise das Trilhas de Desgaste dos Discos

A Figura 6.35 fornece várias imagens da superfície de desgaste do disco C-EPX atuando contra um pino de aço PH, após o ensaio de deslizamento em

temperatura ambiente e sob uma carga normal aplicada de 10 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (1) PH-EPX-25-10 da Figura 6.21.

Observam-se sulcos especialmente regulares e muito bem distribuídos ao longo da espessura da banda de desgaste, aparentando terem também uma profundidade bastante uniforme. Este padrão combina perfeitamente, como não haveria deixar de ser, com aquele da contraface metálica observada na Figura 6.22.

Figura 6.35 - Diversas imagens do disco composto correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (1) PH-EPX-25-10: (a) Macro; (b-d) Diversas magnificações de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.

A Figura 6.36 fornece o espectro de absorção de raios-X obtido durante a avaliação química por meio de microsonda analítica de uma pequena porção da superfície de desgaste relativamente limpa mostrada na Figura 6.35d (quadrado amarelo). Identificam-se os elementos constituintes do aço PH, quais sejam, Ni (0,62% em massa ou 0,15% atômico), Nb (respectivamente 1,43% ou 0,25%), Cr (respectivamente 1,82% ou 0,50%), Fe (respectivamente 10,4% ou 2,67%), indicando a possibilidade de transferência metálica para o disco compósito acompanhada, muito provavelmente, da formação de alguns tipos de carbetos, de natureza abrasiva, dadas suas elevadas durezas, em suas trilhas de desgaste. Verifica-se, como esperado, grandes quantidades dos elementos carbono e oxigênio, ambos presentes em grandes proporções na resina epoxi.

Figura 6.36 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.35d e compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.37 fornece várias imagens da superfície de desgaste do disco C-PPS atuando contra um pino de aço PH, após o ensaio de deslizamento em temperatura ambiente e sob uma carga normal aplicada de 10 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (4) PH-PPS-25-10 na Figura 6.21.

Observam-se um padrão muito mais refinado de riscos na pista de desgaste, se comparado ao caso concorrente anterior, se destacando um grande sulco exatamente no centro da pista, gerado provavelmente por um fragmento mais massivo de desgaste liberado durante a fricção entre pino e disco. Novamente, e sem qualquer surpresa, o padrão combina exatamente com a contraface metálica vista na Figura 6.24.

Conforme as análises anteriormente realizadas no item 6.3, verificou-se um desgaste do par PH-PPS-25-10 muito inferior ao do par PH-EPX-25-10, justificando-se a menor perda de material metálico no primeiro caso devido à presença de um filme de transferência mais bem distribuído de PPS do que de EPX na superfície do pino de aço. Pode-se inferir, portanto, que as taxas 7 vezes menores de desgaste do correspondente disco de C-PPS, relativamente ao do concorrente C-EPX, também se deva à preservação, quanto ao desgaste, proporcionada ao primeiro disco pela presença do filme termoplástico mascarando asperezas e rugosidades na contraface de aço, reduzindo desta forma a ação abrasiva do metal sobre o laminado compósito (Chen et al, 2007).

Figura 6.37 - Diversas imagens do disco composto correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (4) PH-PPS-25-10: (a) Macro; (b-d) Diversas ampliações de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.

A Figura 6.38 fornece o espectro de absorção de raios-X obtido durante a avaliação química por meio de micro-sonda analítica de uma pequena porção da superfície de desgaste relativamente limpa mostrada na Figura 6.35d (quadrado amarelo). Identificam-se os elementos constituintes do aço PH, quais sejam, Nb (1,81% em massa ou 0,09% atômico), Cr (respectivamente 2,21% ou 0,66%), Fe (respectivamente 11,3% ou 3,14%), indicando a probabilidade da transferência de elementos metálicos para o disco composto. São também revelados os elementos S

(15,5% em massa ou 7,55% atômico), carbono e oxigênio, originados da matriz polimérica, de suas fibras de reforço e de possíveis efeitos oxidativos.

Figura 6.38 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.37d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.39 fornece várias imagens da superfície de desgaste do disco C-EPX atuando contra um pino de liga-Al, após ensaio de deslizamento à temperatura ambiente sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (8) AL-EPX-25-20 na Figura 6.21.

Observa-se uma pista de desgaste levemente irregular quanto à sua largura ao longo da trajetória circular de contato com o pino metálico. Tal fato foi anteriormente identificado como causado por possível desalinhamento entre o eixo do pino metálico de desgaste e a direção normal ao plano do disco CMP devido ao mau assentamento deste último no suporte metálico rotativo do sistema de ensaio, ou, mais provavelmente, como devido a efeitos de desgaste diferencial do disco dependendo do ângulo de contato entre o pino de metal e as fibras de reforço da matriz polimérica que compõem o disco.

As marcas deixadas na trilha de desgaste do disco, confinada pela elipse tracejada amarela na Figura 6.39b, indicam muito provavelmente o movimento local de expulsão de fragmentos abrasivos formados na fricção metal/compósito.

O padrão de riscamento circular de desgaste no disco é consistente com aquele observado na superfície de contraface do pino metálico visto na Figura 6.26, embora naquele caso não se observem estes riscamentos identificados no interior da elipse amarela sobre a trilha de desgaste do disco CMP.

Figura 6.39 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (8) AL-EPX-25-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.

A Figura 6.40 fornece o espectro de absorção de raios-X obtido durante a avaliação química por meio de microsonda analítica de uma pequena porção da superfície de desgaste relativamente limpa mostrada na Figura 6.39d (quadrado amarelo). Identificam-se poucos dos elementos constituintes da liga-Al, quais sejam, Al (21,0% em massa ou 11,8% atômico), Zn (respectivamente 1,67% ou 0,39%), e alguma quantidade de Mg. O elemento S deve ser provavelmente decorrente de contaminação da amostra, visto que ensaios anteriores de laminado CMP C-PPS foram realizados no mesmo sistema de ensaios. O carbono e o oxigênio detectados em grande quantidade provêm da matriz polimérica, de suas fibras de reforço e, eventualmente, de processo oxidativos metálicos e não-metálicos.

Figura 6.40 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.39d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.41 fornece várias imagens da superfície de desgaste do disco C-PPS atuando contra um pino de liga-Al, após ensaio de deslizamento à temperatura

ambiente sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (11) AL-PPS-25-20 na Figura 6.21.

Assim como no caso anterior do disco CMP C-EPX, são observadas, no interior das elipses tracejadas amarelas na Figura 6.41b, marcas que divergem da trajetória circular bem estabelecida pelo movimento relativo entre o pino e o disco. Conforme mencionado, estes riscos devem resultar da expulsão de produtos abrasivos de desgaste durante o forte contato entre a ponta do pino e a trilha de desgaste do disco.

O padrão de riscos de desgaste no disco é consistente com aquele observado na superfície de contraface do pino metálico visto na Figura 6.28, embora naquele caso não se observem riscamentos superficiais compatíveis àquelas marcas no interior das elipses tracejadas na Figura 6.41b do disco CMP.

Figura 6.41 - Diversas imagens do disco compósito correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (11) AL-PPS-25-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.

A Figura 6.42 fornece o espectro de absorção de raios-X obtido durante a avaliação química por meio de micro-sonda analítica de uma pequena porção da superfície de desgaste relativamente limpa mostrada na Figura 6.41d (quadrado amarelo). Identificam-se apenas dois dos elementos constituintes da liga-Al, quais sejam, Al (10,6% em massa ou 5,7% atômico) e Zn (respectivamente 1,27% ou 0,29%). O elemento S é detectado em grande quantidade (9,92% em massa ou

4,5% atômico) por compor, junto ao carbono e hidrogênio a estrutura molecular da matriz polimérica termoplástica. O alto carbono advém originalmente da própria matriz polimérica e de suas fibras de reforço, enquanto que o oxigênio detectado esteja muito provavelmente associado a processos oxidativos metálicos e mesmo a reações deste com o enxofre do PPS.

Figura 6.42 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.41d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.

Um aspecto interessante quanto ao carbono detectado em grandes quantidades na pista de desgaste do compósito C-PPS atuando contra a liga-Al é o de que ele pode estar disponível na forma de carbono puro, eventualmente contendo carbeto de elementos metálicos da liga-Al. Nestas circunstâncias, o filme de carbono atua como um lubrificante, preservando o disco de laminado compósito de desgastes por adesão e abrasão, tal como verificado no presente caso, se comparado com o par AL / EPX anteriormente avaliado. Em se formando carbeto e/ou outros compostos estequiométricos com dureza superior à liga-Al, esta será desgastada simultaneamente à preservação do disco. De fato, os resultados

encontrados no item 6.3 reforçam esta possibilidade, quando filmes mais bem distribuídos e densos foram detectados no caso do disco-rotor de laminado C-PPS.

A Figura 6.43 fornece várias imagens da superfície de desgaste do disco C-EPX atuando contra um pino de liga-Ti, após ensaio de deslizamento a 100°C sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (21) TI-EPX-100-20 na Figura 6.21.

Observam-se uma pista de desgaste irregular quanto a sua largura ao longo da circunferência. Tal fato foi identificado no item 6.2 como associado a possíveis desalinhamentos entre pino metálico e disco CMP, e/ou, mais provavelmente, ao gradiente de desgaste das camadas do compósito em função da orientação de suas fibras de reforço com a trajetória circular de contato pino-disco.

As marcas na superfície do disco confinadas pelos círculos tracejados amarelos na Figura 6.43b aparentam ter sido geradas pelo contato circunferencial intermitente entre pino e disco, levando à trepidação ou vibração do sistema, e, por conseguinte, a cargas locais de impacto repetido que podem ter inclusive incrementado localmente a taxa de desgaste do sistema tribológico, haja vista a natureza frágil da matriz epoxídica (Cirino et al, 1998).

O padrão de riscos de desgaste é consistente com aquele observado na contraface metálica, na Figura 6.30, embora novamente a superfície do pino não revele quaisquer evidências ou sinais que possam ser correlacionados às marcas de sulcamento radial observadas no disco CMP.

Figura 6.43 - Diversas imagens do disco composto correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (21) TI-EPX-100-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.

A Figura 6.44 fornece o espectro de absorção de raios-X obtido durante a avaliação química por meio de microsonda analítica de uma pequena porção da superfície de desgaste relativamente limpa mostrada na Figura 6.43d (quadrado amarelo). Identificam-se apenas dois dos elementos constituintes da liga-Ti, quais sejam, Ti (19,7% em massa ou 6,31% atômico) e Al (respectivamente 1,23% ou 0,99%), não obstante o pico de absorção do V seja praticamente coincidente ao do Ti. O alto teor do elemento S encontrado nesta amostra (3,42% em massa ou 1,43%

atômico) não tem *a priori* qualquer explicação plausível, visto estar bem acima de um valor considerado de contaminação.

O altíssimo teor de carbono advém da matriz polimérica e de suas fibras de reforço, enquanto que a pequena proporção de oxigênio deva estar associada a oxidação do titânio, especialmente se temperaturas elevadas, decorrentes das condições impostas no ensaio e do calor gerado localmente pela fricção entre pino e disco, foram alcançadas no experimento.

Figura 6.44 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrada na Figura 6.43d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.

A Figura 6.45 fornece diversas imagens da superfície de desgaste do disco de C-PPS atuando contra um pino de liga-Ti, após ensaio de deslizamento a 100°C sob uma carga normal de 20 kgf, o que corresponde ao par de desgaste codificado como (24) TI-PPS-100-20 na Figura 6.21.

Observam-se uma pista de desgaste levemente irregular quanto à sua largura ao longo da trajetória circunferencial do contato pino-disco, gerada pelos motivos anteriormente discutidos no texto. O padrão de desgaste apresenta sulcos bastante profundos e regularmente espaçados ao longo da largura da trilha. Observa-se na

região circunscrita pela elipse tracejada amarela na Figura 6.45b uma grande quantidade acumulada de subprodutos de desgaste, os quais, dada a natureza termoplástica da resina polimérica, tende a se emplastrar na superfície do disco pela alta pressão de contato exercida do pino metálico.

O padrão de riscos de desgaste reproduz fielmente aquele observado na contraface metálica mostrada na Figura 6.32.

Figura 6.45 - Diversas imagens do disco composto correspondente ao ensaio de deslizamento PSD denominado (24) TI-PPS-100-20: (a) Macro; (b-d) Diversas magnitudes de imagem em microscópio estereoscópico de baixa ampliação de imagem.

Nas análises dos pinos metálicos conduzidas no item 6.3, praticamente não se detectou enxofre sobre a superfície da liga-Ti deslizando contra o laminado C-PPS, o qual (enxofre) deveria necessariamente estar contido em eventuais filmes poliméricos de transferência, ou mesmo formando sulfeto de titânio (TiS) sobre a superfície de desgaste do pino. A ausência de um filme de transferência foi naquela ocasião sugerida como o fator mais provável pelo grande desgaste do pino metálico, uma vez que o filme atuaria como um poderoso redutor da fricção entre pino e disco, isolando o metal do efeito abrasivo / tribológico reativo das fibras fortalecedoras de carbono do laminado CMP.

Da mesma forma, pode-se agora inferir que a ausência deste filme termoplástico favoreceu o maior desgaste do laminado C-PPS frente ao seu concorrente C-EPX (ilustrado na Figura 6.43), visto que a rugosidade (e, conseqüentemente, o poder de corte destas asperezas superficiais) do pino metálico atuando contra o laminado termoplástico foi cerca de 3 vezes maior que no caso daquela gerada durante seu contato (do pino de liga-Ti) contra o laminado termorrígido.

A Figura 6.46 fornece o espectro de absorção de raios-X obtido durante a avaliação química por meio de microsonda analítica de uma pequena porção da superfície de desgaste relativamente limpa mostrada na Figura 6.45d (quadrado amarelo). Identificam-se os três principais elementos constituintes da liga-Ti, quais sejam, Ti (31.4% em massa ou 12,1% atômico), Al (respectivamente 1,69% ou 1,15%) e vanádio (respectivamente 1,67% ou 0,60%), não obstante o pico de absorção do V seja praticamente coincidente ao do Ti. O alto teor do elemento S (4,72% em massa ou 2,71% atômico) decorre da natureza da matriz polimérica. O

alto teor de carbono advém da matriz polimérica e de suas fibras de reforço, enquanto que a relativamente pequena proporção de oxigênio advenha provavelmente da formação de óxido de titânio nas relativamente elevadas temperaturas alcançadas localmente e instantaneamente no contato pino-disco.

Figura 6.46 - Espectro de absorção da micro-análise química de uma porção da superfície do disco CMP, livre de resíduos visualmente detectáveis, mostrado na Figura 6.45d, na região compreendida pelo quadrado amarelo.

A Tabela 6.3 lista os valores de rugosidade R_a mensurada nas superfícies de desgaste dos discos CMP, assim como fornece os resultados de desgaste volumétrico destes elementos rotativos do sistema de desgaste por deslizamento PSD.

Assim como anteriormente observado para os pinos metálicos (Tabela 6.2), nota-se que, na maioria dos casos avaliados mais profundamente neste estudo (06 pares de desgaste, designados na Tabela 6.3), existe certa proporcionalidade entre os valores de rugosidade e os de desgaste superficial dos laminados compósitos.

Tabela 6.3 - Valores de rugosidade R_a mensurados nas superfícies de desgaste dos discos CMP (destaque em azul) friccionados contra pinos metálicos em ensaios de deslizamento PSD. Os valores de desgaste dos discos são também fornecidos.

Discos Compósitos		Rugosidade R_a (μm)	Desgaste (10^{-3} ml)*
01	PH-EPX-25-10	2,0704	7,115
04	PH-PPS-25-10	1,4145	1,465
08	AL-EPX-25-20	1,0346	31,186
11	AL-PPS-25-20	1,8325	26,175
21	TI-EPX-100-20	0,7271	43,205
24	TI-PPS-100-20	2,0937	54,650

* Dados extraídos da Figura 6.1a

A Figura 6.47 confronta graficamente os dados da Tabela 6.3 relativos aos discos CMP, assim como plota os dados de rugosidade versus desgaste dos correspondentes pinos metálicos (listados previamente na Tabela 6.2). Não obstante o número de espécimes avaliados por gráfico seja pequeno, as tendências observadas podem ser consideradas como, no mínimo, curiosas, mesmo porque há uma boa consistência entre os resultados para múltiplas condições de ensaio (i.e., várias combinações de pares de desgaste, temperatura e carga normal), e para desgastes considerados de pequena, intermediária e grande montas (vide critérios de seleção de dados para análise na Fig.6.21). Desta forma, tais resultados merecem ser analisados mais rigorosamente no futuro, considerando-se todo o amplo conjunto de pares metal/compósito avaliado neste estudo.

A Figura 6.48 mostra que existe uma relação visualmente muito bem definida (e com índices significativos de correlação de dados) entre os desgastes volumétricos dos elementos que compõem os pares de fricção pino metálico / disco compósito. São plotadas duas séries de dados, em que ora os pinos ou os discos referem-se ao eixo das abscissas ou das ordenadas, e vice-e-versa, à escolha do

leitor. Conforme destacado inicialmente no item 6.1.1 deste texto, fica claro que o desgaste do disco é invariavelmente superior, e, na maioria dos casos, muito superior, ao do respectivo pino.

Havendo, portanto, uma correlação clara e bem definida entre os desgastes dos pinos e dos correspondentes discos para todos os pares de fricção ora avaliados, conforme demonstra a Figura 6.48, assim como a demonstrada a viabilidade de se relacionar a rugosidade superficial ao desgaste volumétrico para ambos o pino e o disco, conforme sinalizam os resultados obtidos para alguns pares de fricção selecionados na Figura 6.47, parece aceitável admitir que exista, como decorrência destas observações empíricas, uma correlação bem estabelecida entre as rugosidades dos elementos pino e disco para os pares de fricção ensaiados em deslizamento PSD.

A Figura 6.49 fornece pistas de que esta é uma possibilidade real, e, similarmente ao observado no quesito de desgaste volumétrico, a rugosidade superficial do disco CMP sempre supera à do pino metálico correspondente.

(a)

Continua

Continuação

(b)

(c)

Figura 6.47 - Potenciais correlações de dados de desgaste versus rugosidade para pinos e discos pertencentes a pares de fricção selecionados conforme critério estabelecido na Fig.6.21. A identificação do pino e do correspondente disco de fricção é fornecida nas figuras, juntamente com o código numérico (entre parênteses) do ensaio a que se referem os pontos de dados plotados.

Figura 6.48 - Correlações de desgaste volumétrico entre pinos e correspondentes discos para todos os pares de fricção deste estudo. Dados extraídos da Fig.6.1a.

Figura 6.49 - Correlação de dados de rugosidade superficial de pares de fricção pino-disco para alguns dos ensaios realizados neste estudo.

A Figura 6.50 mostra um exemplo de perfil de rugosidade R_a mensurado sobre a superfície de desgaste de um disco compósito de matriz termorrígida EPX fortalecida com fibras contínuas de carbono. Dados similares levantados para outros discos de desgaste presentemente avaliados são fornecidos no Apêndice C deste trabalho.

Figura 6.50 - Perfil de rugosidade das superfícies de desgaste do disco de compósito C-EPX contra o pino de aço PH, o que corresponde ao par de desgaste classificado como código (1) PH-EPX-25-10, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 10 kgf.

6.5 Análise dos Produtos de Desgaste

A Figura 6.51 mostra três vistas com ampliações distintas dos fragmentos, ou produtos gerados no processo de desgaste do par de fricção código (1) PH-EPX-25-10.

Observam-se partículas de formatos irregulares e bastante diversos, como uma ampla distribuição de tamanhos, oscilando entre 5 e 220 μm .

A grande maioria, senão a totalidade dos fragmentos corresponde à matriz epoxídica, aparentemente sem a presença das fibras de fortalecimento. Na figura 6.51b são nítidas as marcas originadas no polímero pelo descolamento entre fibra e matriz, caracterizando falha por adesão e indicando, em princípio, uma interface relativamente fraca entre estas duas fases do compósito.

Cabe observar que o fundo preto das amostras, contendo trincas em profusão corresponde à fita de carbono empregada para o aterramento da amostra o microscópio eletrônico de varredura.

(a)

(b)

Continua

Continuação

Figura 6.51 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (1) PH-EPX-25-10 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A Figura 6.52 mostra cinco vistas com ampliações distintas dos fragmentos, ou produtos gerados no processo de desgaste do par de fricção código (4) PH-PPS-25-10.

A Figura 6.52a mostra os dois tipos de produtos de desgaste originados no processo, os quais diferem enormemente entre si no aspecto físico, sendo virtualmente impossível decifrar as dimensões características de ambos. O primeiro, circunscrito na elipse tracejada verde apresenta uma aparência esponjosa, vista mais detalhadamente nas Figuras 6.52b,c, enquanto o segundo, contido na elipse tracejada amarela, exibe um aspecto laminar, impregnado com pequenos pedaços de fibra e contendo alguma massa observada anteriormente na elipse verde, conforme pode ser visto nas Figuras 6.52d,e.

O primeiro produto, Figuras 6.52b,c, aparenta ter sido formado pela fusão da matriz termoplástica de PPS, como resultado de altas temperaturas localmente alcançadas em função do elevado atrito entre pino e disco.

O segundo produto, Figuras 6.52d,e, por outro lado, dá mostras de que tenha sido gerado pelo arrancamento, por esforços cisalhantes do pino no disco, de finas camadas de polímero dúctil puro, que se deforma substancialmente, com espessura em torno de 5 μm . Cabe mencionar que estes valores são apenas uma pequena fração da espessura das lâminas ou camadas individuais do compósito C-PPS (tipicamente com cerca de 150-200 μm), as quais foram empilhadas e prensadas a quente, originando o laminado final com espessura da ordem de 5 mm.

Pode-se inferir, portanto, que o produto contido na elipse amarela tenha sido gerado quando as temperaturas atingidas no sistema não eram suficientemente elevadas para a fusão do polímero, num período, portanto, anterior àquele em que a massa da elipse verde se originou.

Interessante notar que o desgaste verificado no ensaio (1) PH-EPX-25-10 foi, considerados respectivamente o pino, o disco, e o par pino-disco, muito superior ao do (4) PH-PPS-25-10, conforme mostram as Tabelas 6.2 e 6.3, assim como a Figura 6.21. Cabe lembrar que a única diferença entre as condições (1) e (4) está no polímero que impregna as fibras de reforço: (1) EPX, que é uma resina termorrígida dura e frágil (a despeito de ter sido tenacificada com elastômero), e (4) PPS, que é um polímero termoplástico semicristalino relativamente macio, tenaz e dúctil.

(a)

(b)

(c)

Continua

Continuação

(d)

(e)

Figura 6.52 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (4) PH-PPS-25-10 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV). (b,c) Correspondem a ampliações da imagem contida na elipse tracejada verde; (d,e) A elipse amarela.

A natureza do polímero parece, portanto, ter afetado decisivamente a geração dos produtos de desgaste, e estes devem, em última instância, ter estabelecido a intensidade com a qual se verificou o fenômeno. Pode-se, assim, postular que o polímero duro e frágil (EPX) deu origem a fragmentos (Figura 6.51) com estas mesmas características, e que, portanto, atuam mais efetivamente como terceiro corpos no processo de desgaste abrasivo do sistema tribológico formado com o aço

PH. Contrariamente, o polímero mais macio e dúctil (PPS) gerou produtos que atuaram mais como lubrificantes do sistema, especialmente se ocorreu fusão polimérica, o que parece ser o caso conforme visto nas Figuras 6.52b,c, preservando, desta forma, ambos o pino metálico PH e o disco compósito C-PPS de um desgaste mais severo.

A Figura 6.53 mostra três vistas com ampliações distintas dos fragmentos, ou produtos gerados no processo de desgaste do par de fricção código (8) AL-EPX-25-20.

Observam-se partículas de formato irregular, e com uma variedade incrível de geometrias. O tamanho das mesmas varia de poucos microns, talvez 3 μm , até um máximo de, digamos, 120 μm , com a predominância clara e inequívoca dos menores fragmentos oriundos do compósito C-EPX. O tamanho médio das partículas é, sem sombra de dúvida, muito inferior ao observado anteriormente na Figura 6.51, quando o mesmo compósito foi friccionado contra um pino de aço PH, porém sob uma carga aplicada duas vezes menor.

As Figuras 6.53b,c permitem identificar claramente partes de fibras fraturadas, exibindo um comprimento típico de 20 μm , diferentemente do que foi observado na Figura 6.51, correspondente ao mesmo compósito C-EPX deslizando contra o pino de aço. Naquela ocasião, praticamente nenhuma fibra foi visualizada, indicando que a trituração das mesmas deva ter ocorrido de modo bastante eficiente, diferentemente do caso presentemente avaliado, em que se empregou um pino de liga-Al. Esta diferença de comportamento esta muito provavelmente associada a grande diferença de dureza entre os dois pinos metálicos. A do aço é praticamente o dobro da liga-Al.

Um mapeamento por micro-sonda de energia dispersiva (EDX) e, eventualmente, uma análise por difratografia de raios-X são necessários para localizar e identificar a natureza dos fragmentos observados em todas as microfratografias ora apresentadas.

A Figura 6.54 mostra três vistas com ampliações distintas dos fragmentos, ou produtos gerados no processo de desgaste do par de fricção código (11) AL-PPS-25-20, o qual difere do par identificado como (8) AL-EPX-25-20 (Figura 6.53) apenas na matriz polimérica empregada na confecção do disco compósito.

Chama a atenção o fato de as partículas maiores serem muito mais robustas que as observadas na Figura 6.53, relativa ao par concorrente de desgaste, código (8). Talvez a explicação para este fato esteja exatamente na diferença de comportamento mecânico entre as matrizes poliméricas em questão, e, conseqüentemente, na dos respectivos laminados compósitos. Sendo o C-PPS (11) muito mais tenaz que o C-EPX (8), pode-se argüir que a dificuldade encontrada para a fragmentação do primeiro seja, também, muito superior a do segundo.

(a)

Continua

Continuação

(b)

(c)

Figura 6.53 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (8) AL-EPX-25-20 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

(a)

(b)

(c)

Figura 6.54 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (11) AL-PPS-25-20 na Figura 6.21: Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Uma apreciação geral das Figuras 6.53 (EPX, código 8) e 6.54 (PPS, código 11) mostra que, enquanto os maiores fragmentos obtidos em (8) são muito menores que os verificados em (11), a presença de fibras fraturadas no primeiro caso é muito mais evidente que no segundo. Pode-se imaginar, neste último caso, que as fibras permaneçam aderidas à matriz termoplástica (denotando forte interface entre as duas fases) e integradas aos grandes fragmentos do compósito (vide Fig.6.54b), sendo a possibilidade de tritramento das fibras descartada em virtude da baixa dureza da liga-Al.

Além destes fatos, nota-se que o aspecto de lascamento do disco C-PPS é muito mais pronunciado do que no caso do laminado C-EPX, dando origem a fragmentos muito mais pontiagudos que no último caso. Desta forma, fragmentos maiores e mais afiados podem ter contribuído para o maior desgaste observado no pino de liga-Al, além da possível formação de carbetos na trilha de desgaste do disco, conforme amplamente discutido nos itens 6.3 e 6.4.

Interessante notar que o desgaste verificado no ensaio (8) AL-EPX-25-20 foi, caso seja considerado somente o par pino-disco, apenas levemente superior ao do (11) AL-PPS-25-20, conforme mostra a Figura 6.21. Entretanto, conforme acima observado, e de acordo com a Tabela 6.2, o desgaste do pino liga-Al friccionado contra o disco C-EPX (8) foi substancialmente inferior ao do mesmo pino deslizando sobre o disco C-PPS (11). A compensação se deu no desgaste dos discos compósitos, conforme listado na Tabela 6.3, em que se verifica que o disco C-EPX (8) foi mais desgastado no ensaio PSD se comparado ao C-PPS (11), para idênticas condições aplicadas.

Conforme também destacado nos itens 6.3 e 6.4, a formação de um filme mais denso e contínuo de carbono (eventualmente contendo carbetos) no disco CMP formando o par código (11) AL-PPS-25-20C-PPS atuou no sentido de preservar o correspondente disco de um desgaste mais expressivo.

A rigor, um mapeamento por micro-sonda (EDX) seria fundamental nas tarefas de identificação dos tamanhos de partículas metálicas presentes nos resíduos de desgaste, e de determinação dos modos de interação entre as fases polimérica, metálica e cerâmica nos produtos gerados no deslizamento PSD. Além disso, difratografia de raios-X seria imperativa para a identificação dos compostos formados nas reações triboquímicas, de modo a se poderem inferir, com base na dureza destes, seus possíveis efeitos como elementos de terceiro corpo abrasivo.

A Figura 6.55 mostra três vistas com ampliações distintas dos fragmentos, ou produtos gerados no processo de desgaste do par de fricção código (21) TI-EPX-100-20, enquanto a Figura 6.56 faz o mesmo relativamente ao par concorrente codificado como (24) TI-PPS-100-20.

Observam-se, na Figura 6.55, partículas de formato bastante irregular e com tamanho excepcionalmente variado, indo de alguns microns até poucas centenas de microns, formando verdadeiros escombros de laminado compósito. É ainda claramente verificada a massiva presença de fibras de carbono, nos mais variados comprimentos, algumas delas chegando até cerca de 150 μm . São nítidas também, e novamente, as marcas originadas no polímero pelo descolamento entre as fibras de carbono e a matriz epoxídica, caracterizando falha por adesão e indicando, em princípio, um acoplamento relativamente fraco entre estas duas fases do compósito. Tal fato é corroborado pelos extensos fragmentos lisos de fibras arrancados do laminado CMP.

Na Figura 6.56, observam-se fragmentos de compósito termoplástico, chegando a casa dos 400 μm . Notam-se também muito poucas fibras soltas, além de sinais mais evidentes do lascamento experimentado pelo disco C-PPS, comparativamente ao de C-EPX da Figura anterior. Tais características foram anteriormente apontadas nas Figuras 6.53 e 6.54, quando eram comparados os dois laminados compósitos friccionados contra a liga-Al. Desta forma, valem todas as implicações lá referidas, especialmente no que diz respeito ao maior desgaste do pino metálico (agora de liga-Ti) friccionado contra o disco CMP C-PPS.

De fato, o desgaste verificado no ensaio (24) TI-PPS-100-20 foi superior ao do (21) TI-EPX-100-20 não só em termos da perda de volume do pino de liga-Ti, mas também do desgaste do disco confeccionado em C-PPS, que superou substancialmente a perda de material do C-EPX.

Nestas condições de ensaios mais críticos, realizados em alta temperatura (100°C) e sob a ação de um carregamento mais severo (20 kgf), o efeito de lubrificação proporcionado pelo termoplástico localmente fundido através da ação simultânea da elevada temperatura do ensaio e do forte atrito no contato entre o pino e o disco (fusão local do PPS ocorreu mesmo na temperatura ambiente: vide Figs 6.52a-c), pode ter sido superado pelo enfraquecimento mecânico global da resina termoplástica, e, conseqüentemente do compósito, em função da elevada temperatura, favorecendo assim a fratura do laminado e altas perdas de volume.

(a)

(b)

(c)

Figura 6.55 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (21) TI-EPX-100-20 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

(a)

(b)

(c)

Figura 6.56 - Diversas vistas e ampliações de imagem dos produtos originados durante o ensaio de deslizamento PSD codificado como (24) TI-PPS-100-20 na Figura 6.21. Imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

6.6 Comparação com Resultados da Literatura

O único trabalho publicado na literatura aberta e que se assemelha ao realizado nesta Dissertação de Mestrado, é o de Quintelier et al (2006), que empregaram um pino de aço (cuja composição química e especificação técnica estranhamente não foram fornecidas pelos autores) deslizando sobre um disco rotativo de laminado compósito C-PPS à temperatura ambiente, este último elemento apresentando alguma similaridade a um dos materiais CMPs avaliados no presente estudo.

Os pesquisadores empregaram um laminado fortalecido com fibras de carbono com arranjo bidirecional 5HS (tal como realizado no presente trabalho), porém com as lâminas individuais empilhadas segundo uma arquitetura bem mais simples $[0/90]_{2S}$ que a ora empregada (que foi quase-isotrópica), gerando um laminado bem menos espesso, com 2,5 mm de espessura (contra aproximadamente 5 mm desta Dissertação). Além disso, o laminado CMP termoplástico empregado no estudo de Quintelier et al (2006) possuía uma fração volumétrica razoavelmente inferior àquela utilizada neste estudo, de aproximadamente 50% contra cerca de 60% neste último.

As condições de ensaio foram também algo distinta entre os dois trabalhos, conforme mostra a comparação realizada na Tabela 6.4.

A Figura 6.57 fornece os resultados experimentais mais relevantes obtidos pelos pesquisadores. Nela, são traçados os comportamentos da força (FN) aplicada ao pino de desgaste, o qual atua ortogonalmente à superfície do disco de desgaste rotativo, que se mantém constante durante todo o experimento.

As curvas de variação da força de fricção (FF) e do coeficiente de fricção (CF, multiplicado por 100), obtidas também por meio de células de carga montadas no dispositivo de ensaio PSD de Quintelier et al (2006), são mostradas.

A curva de desgaste (DG), fornecida em termos da profundidade da trilha formada no disco CMP, somada à redução do comprimento do pino metálico correspondente, foi monitorada por um dispositivo óptico-eletrônico que mensurava continuamente a distância entre um ponto na base do pino e a superfície não-desgastada do disco, e possibilita acompanhar toda a evolução cronológica do processo de desgaste do par de fricção, tal como plotada no gráfico correspondente.

Tabela 6.4 - Condições de ensaio de desgaste por deslizamento entre pino (fixo e de aço) e disco (rotativo e de C-PPS) de Quintelier et al (2006) e do presente trabalho.

Parâmetro de ensaio PSD	Quintelier et al (2006)	Este trabalho
Diâmetro da trilha de desgaste no disco CMP (mm)	127	36
Rotações do disco por minuto (RPM)	03	155
Velocidade escalar de rotação (mm/s)	20	295
Distância de deslizamento por revolução (mm)	400	113
Carga normal aplicada ao conjunto pino-disco (kgf)	12,5-25	10-20
Número total de ciclos ou revoluções	10^5	$5,4 \cdot 10^3$
Distância total de deslizamento (m)	$4 \cdot 10^3$	610
Tempo de ensaio (min.)	$3,3 \cdot 10^3$	45

Figura 6.57 - Curvas de carga ou força normal (FN) aplicada ao disco CMP (leitura no eixo esquerdo), de força de fricção (FF) entre pino e disco (leitura no eixo esquerdo), de coeficiente de fricção (CF*100) entre as superfícies em contato (leitura no eixo esquerdo), e de desgaste (DG) do conjunto pino-disco (leitura no eixo direito). Velocidade escalar de deslizamento de 20 mm/s. Adaptado de Quintelier et al (2006).

O gráfico acima mostra que, após um relativamente curto espaço de tempo, o par pino-disco se desgastou muito lentamente (a rigor, foi essencialmente o disco CMP o elemento de desgaste nesta fase do processo), para, em um determinado instante, iniciar-se o que os autores classificaram como um terrível processo de desgaste do pino metálico, em que altíssimas taxas de perda de massa ou volume foram alcançadas e mensuradas.

Logo antes da ocorrência desta transição entre os regimes lento e rápido de desgaste do par, a força de fricção decresceu, e então ela subiu juntamente ao incremento da taxa de desgaste, para depois cair novamente, desta feita de maneira continua e linear com o tempo até o final do experimento.

A explicação dos pesquisadores para estes efeitos foi a de que, tal como anteriormente mencionado neste texto, a ruptura da primeira, assim como das

sucessivas camadas dos discos CMPs fortalecidos com fibras contínuas de carbono, e em contato contínuo de fricção com pinos metálicos ao longo do processo de desgaste, é fortemente influenciada pelo ângulo de ataque do pino nas fibras. Visto que cada camada, ou lâmina individual do laminado possui fibras de reforço dispostas em orientações específicas (tipicamente 0 , ± 45 , ± 60 e 90°), que em geral diferem grandemente do posicionamento adotados nas camadas logo acima e logo abaixo da mesma, pode-se antever a complexidade do processo global de desgaste do compósito, tendo em vista que os locais preferenciais de desgaste se alternam camada a camada. Isto sem considerarem-se os possíveis efeitos advindos dos gradientes de espessura das camadas formadoras do laminado, haja vista que o processo de fabricação deste último foi (e em geral é, no caso dos laminados compósitos termoplásticos) por compressão a quente (*hot press*), que é um processo pródigo em gerar estas descontinuidades, tal como exulta o trabalho de Quintelier et al (2006).

A Figura 6.58 exemplifica bem a questão do diferencial de desgaste da superfície dos laminados CMP, em que se observa que a camada superficial do laminado avaliado por Quintelier et al (2006) apresenta sinais de desgaste bastante distintos entre si nas diversas posições angulares ao longo da trilha circunferencial gerada descontinuamente no disco CMP. Observa-se neste caso específico que as direções preferenciais de desgaste são as identificadas pelos ângulos 0° e 180° , enquanto que um desgaste de menor intensidade e extensão é observado a 90° e 270° , sendo que as demais regiões praticamente não exibem quaisquer sinais de desgaste.

Conforme já comentado, a camada sub-superficial exhibe em geral as fibras com disposição distinta daquela adotada superficialmente, de modo que o

comportamento será também distinto em termos da localização das regiões mais e menos susceptíveis ao desgaste, e assim sucessivamente, ao longo da espessura do laminado. Como resultado, um padrão de desgaste irregular do disco CMP, tal como aqueles observados nas Figuras 6.18 e 6.19 do presente estudo, tende a se desenvolver e se estabelecer definitivamente no laminado.

Figura 6.58 - Estados iniciais de desgaste na superfície do disco compósito após cerca de 450 revoluções. Adaptado de Quintelier et al (2006).

A Figura 6.59 mostra que, tal como haveria de se esperar, os comportamentos de desgaste dependentes dos ângulos de ataque do pino às fibras de reforço das camadas do laminado CMP são acompanhados por distintas forças de atrito ou fricção entre as superfícies de contato, as quais são também dependentes das orientações das fibras de reforço e sua interação dinâmica e repetida com o pino metálico.

Figura 6.59 - Resultados da evolução da força de fricção (FF) no tempo para diversas posições angulares ao longo da trilha circunferencial de desgaste do disco CMP. Ensaio com força normal (FN) de 12,5 N e velocidade de contato pino-disco de 10 mm/s. Adaptado de Quintelier et al (2006).

De volta à Figura 6.57, dois pontos são lá designados, e identificados por:

- (i) t = Equivalente em tempo dos ensaios conduzidos no presente trabalho (45 min. = 2700 s).
- (ii) R = Equivalente em revoluções do disco dos ensaios conduzidos no presente trabalho (5400 ciclos).

Desprezando-se efeitos de velocidade escalar de desgaste, visto que os ensaios de Quintelier et al (2006) foram muito mais lentos que os realizados neste trabalho, o critério R (que define o número de contatos repetidos entre o pino metálico e um determinado ponto na trilha de desgaste do disco compósito) é certamente o que melhor se adéqua aos propósitos de se compararem os resultados

dos dois trabalhos (de fato, o ensaio codificado nesta Dissertação como PH-PPS-25-20 seria o que melhor se compararia ao divulgado por Quintelier et al, 2006).

Neste sentido, visto que o ponto R na Figura 6.57 encontra-se ainda no regime de transição de desgaste preferencial do disco CMP para o de desgaste prioritário e acelerado do pino de aço, pode-se concluir que os ensaios apresentados nesta Dissertação não atingiram os estágios de altíssimos desgastes alcançados por Quintelier et al (2006). Isto é corroborado pelos pequenos desgastes observados nos pinos de aço PH, sejam atuando contra o disco de C-EPX (Fig.6.22) ou de C-PPS (Fig.6.23), este último caso sendo o que mais se aproxima das condições empregadas nos ensaios de Quintelier et al (2006).

Interessante observar que a conclusão acima concorda em certa extensão com aquela afirmação realizada anteriormente (item 6.2), com base nos achados de Kato & Adachi (2002) em materiais cerâmicos, de que regimes de desgaste de intermediário a severo foram desenvolvidos nos pares de fricção metal-compósito presentemente avaliados.

De volta ao trabalho de Quintelier et al (2006), a transição entre dois regimes bastante distintos de desgaste do par pino de aço-disco C-PPS foi justificada por eles da seguinte forma: uma vez que a trilha de desgaste é completamente formada por toda a circunferência da superfície do disco (um estágio além, portanto, daquele mostrado na Figura 6.58), o filme de carbono gerado pelo arrancamento e trituração das fibras de reforço do laminado CMP começa a desempenhar um papel fundamental no processo de desgaste. Embora esta camada de carbono reduza a força de fricção FF, conforme mostra por duas ocasiões a Figura 6.59, o que tende a preservar a trilha já estabelecida no disco CMP de um desgaste mais acentuado, a geração de carbeto de ferro e de eventuais elementos de liga já num estágio mais

avançado do processo (algo como tempos acima de 10^5 segundos no caso de Quintelier et al, 2006) irá intensificar sobremaneira o desgaste metálico e criará fragmentos que ativarão ainda mais o processo de desgaste abrasivo a três corpos, num processo moto-contínuo e auto-acelerante.

Se considerados os grandes desgastes metálicos observados nas Figuras 6.30 e, principalmente, 6.32 para a liga-Ti operando neste último caso contra o compósito C-PPS, cujos valores estão listados na Tabela 6.2, pode-se argüir que, nestes casos específicos, o processo desgaste já tenha atingido o estágio de perda significativa de metal e de preservação da trilha de desgaste do disco CMP. Nestes casos, seria plausível admitir a geração de carbetos de titânio e de vanádio que, pela sua alta elevadíssima dureza, desgastariam a liga metálica, gerando assim fragmentos que atuariam como terceiro corpo num processo de abrasão, e assim sucessiva e continuamente.

7. CONCLUSÕES

Ensaio de deslizamento pino-sobre-disco (PSD) em múltiplos passes foram realizados em diversos pares de fricção metal / compósito polimérico de grau aeronáutico sob duas diferentes cargas e duas distintas temperaturas. Ao final do processo de desgaste, foi mensurada a perda de volume do par pino metálico / disco compósito.

As principais conclusões que podem ser extraídas deste trabalho são:

1. O par formado pelo aço PH 15-5 / compósito de termoplástico PPS (polissulfeto de fenileno) fortalecido com fibras contínuas de carbono apresentou o melhor desempenho (i.e., menor desgaste) na maioria das circunstâncias avaliadas.
2. Nenhum par de fricção se destacou como a pior opção (i.e., apresentou o maior desgaste) na maioria das condições de ensaio estudadas.
3. Em geral, cargas e temperaturas mais elevadas levaram a um maior desgaste do pino, do disco e do par pino-disco.
4. As perdas de volume do disco compósito sempre superaram as do correspondente pino metálico, havendo, entretanto, uma proporcionalidade bem definida entre estas duas variáveis.
5. A liga Ti6Al4V foi a pior opção dentre os pinos metálicos, independentemente do laminado compósito empregado, devido à sua baixa resistência ao cisalhamento e à conseqüente alta rugosidade da

superfície, que desfavoreceu o ancoramento de filmes poliméricos de transferência.

6. O aço PH se apresentou como a melhor escolha dentre os pinos metálicos, fruto de sua alta dureza relativamente aos metais concorrentes e da rugosidade superficial para o efetivo ancoramento do filme de transferência.
7. O laminado compósito C-PPS se mostrou mais susceptível às variações na carga de contato, enquanto que o C-EPX (epóxi) foi mais afetado pela temperatura de ensaio.
8. Discos de laminados compósitos exibindo desgaste extremamente elevado apresentaram expressivos gradientes de largura da trilha de desgaste, fruto da dependência da sua resistência ao desgaste com a orientação das fibras de reforço, a qual se intensificou pelo uso do pino de liga-Ti e de uma temperatura mais elevada de ensaio.

Uma das várias implicações interessantes desta Dissertação de Mestrado é a de que seus resultados se contrapõem frontalmente, por exemplo, ao extensivo emprego de prendedores de liga-Ti (que, na maioria das vezes, não é utilizada na condição revestida, dado o alto custo do processo, mesmo para a indústria aeronáutica) em juntas estruturais de laminados compósitos poliméricos, visto que esta liga metálica possui um coeficiente de variação dimensional térmica e um potencial de eletrodo compatíveis aos dos laminados fortalecidos com fibras de carbono, especialmente em ambientes salinos.

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- i. Reprodução dos ensaios de deslizamento PSD em ambiente agressivo (salino, ácido, básico).
- ii. Reprodução dos ensaios PSD em temperaturas da ordem de -50°C, ou mesmo criogênicas.
- iii. Avaliação dos perfis de profundidade e de largura das trilhas de desgaste dos discos CMP, bem como da topografia dos pinos metálicos, para fins de modelamento do processo de desgaste do par de fricção.
- iv. Verificação do efeito da arquitetura de empilhamento das camadas individuais dos laminados compósitos na geração dos gradientes de profundidade e de largura das trilhas de desgaste.
- v. Realização de micro-análise EDX e de difração por raios-X dos produtos de desgaste que formaram o terceiro corpo para desgaste abrasivo, acompanhados de uma caracterização completa quanto à geometria e ao tamanho das partículas.
- vi. Análise de todos os pinos, discos e produtos de desgaste obtidos neste estudo, de modo a confirmar as tendências apontadas por um grupo seletivo de condições de ensaio avaliadas mais profundamente nesta Dissertação.

REFERÊNCIAS

- ✓ AERONAUTICAL Technologies for the Twenty-First Century, Committee on Aeronautical Technologies, Aeronautics and Space Engineering Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., ISBN: 978-0-309-04732-6, 314 p, 1992. <<http://books.nap.edu/books/0309047323/html>>. Acesso em: 03 Dez 2008.
- ✓ AGARWAL, B. D, BROUTMAN, L. J, ***Analysis and performance of fiber composites***, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 578 p, 1990.
- ✓ AMERICAN Society for Testing and Materials Standard. ***Designation G 99***: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. New York: ASTM International Handbook, 2005.
- ✓ ARCHARD, J. F., ***Contact and rubbing of flat surfaces***, Journal of Applied Physics v.241, p.891-988, 1953.
- ✓ ARCHARD, J. F.; HIRST, W. Wear of metals under unlubricated conditions. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, ***Mathematical and Physical Sciences***, v.236, pp.397-410, 1956.
- ✓ AZOUAOU, K.; RECHAK, S.; AZARI, Z.; BENMEDAKHENE, S.; LAKSIMI, A.; PLUVINAGE, G. Modeling of damage and failure of glass/epoxy composite plates subject to impact fatigue. ***International Journal of Fatigue***, v.23, p.877-885, 2001.
- ✓ BAIGUIRANI, H. R .H. The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel, ***Materials Science & Engineering***. A, v.338, p.142-159, 2002.
- ✓ BERNARDELLI, E. A.; BRUNETTI, C.; BRASIL, J. K.; SILVA, W. D.; MALISKA, A. M. ***Efeito da temperatura de solubilização no tratamento de envelhecimento do aço inoxidável 15-5 PH envelhecido em forno mufla ou em reator de plasma***, 18º Congresso Brasileiro de Ciências dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil (trabalho 306-021), 2008.
- ✓ BIJWE, J.; INDUMATHI. J.; GHOSH, A. K. On the abrasive wear behaviour of fabric-reinforced polyetherimide composites. ***Wear***, v.253, p.768-777, 2002.
- ✓ BIJWE, J.; RATTAN, R.; FAHIM, M. Abrasive wear performance of carbon fabric reinforced polyetherimide composites: influence of content and orientation of fabric. ***Tribology International***, v.40, p.844-854, 2007.
- ✓ BIJWE, J.; RATTAN, R. Influence of weave of carbon fabric in polyetherimide composites in various wear situations. ***Wear***, v.263, p.984-991, 2007.

- ✓ BÖHM, H.; BETZ, S.; BALL, A. The wear resistance of polymers. ***Tribology International***, v.23, p.399-406, 1990.
- ✓ BUDINSKI, G. K. Tribological properties of titanium alloys. ***Wear***, v.151, p.203-217, 1991.
- ✓ BUSS, A. H. ***Estudo do comportamento mecânico da liga de alumínio AA 2124 com diferentes adições de partículas de silício***. 2002. 201 f. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Ciência e Engenharia de Materiais, 2002.
- ✓ CACCESE, V.; KABCHE, J. P.; BERUBE, K. A. Analysis of a hybrid composite/metal bolted connection subjected to flexural loading. ***Composite Structures***, v.81, p.450-462, 2007.
- ✓ CALLISTER, W. D. ***Materials Science and Engineering: an Introduction***, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, NY, USA, 702 p, 2003.
- ✓ CHEN, Z.; LIU, X.; LU, R.; LI, T. Friction and wear mechanisms of PA66/PPS blend reinforced with carbon fiber. ***Journal of Applied Polymers Science***, v.105, p.602-608, 2007.
- ✓ CIORNEI, F.; IRIMESCU, L.; DIACONESCU, E.N. Upon radial fretting of dissimilar materials, ***Annals of University "Dunărea de Jos" of Galati***, v.8, Tribology, p.134-142, 2006.
- ✓ CIRINO, M.; FRIEDRICH, K.; PIPES, R. B. Evaluation of polymer composites for sliding and abrasive wear applications. ***Composites***, v.19, p.383-392, 1998.
- ✓ COSTA, G. G. ***Avaliação da influência dos ciclos térmicos nas propriedades dos compósitos termoplásticos de PPS e PEI com fibras de carbono e vidro conformados por prensagem a quente***. 2006. 156 f. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, 2006.
- ✓ FRIEDRICH, K.; LU, Z.; HÄGER, A. M. Overview on polymer composites for friction and wear application. ***Theoretical and Applied Fracture Mechanics***, v.19, p.1-11, 1993.
- ✓ FRIEDRICH, K.; LU, Z.; HÄGER, A. M. Recent advances in polymer composites' tribology. ***Wear***, v.190, p.139-144, 1995.
- ✓ FU, S. Y.; LAUKE, B.; MADER, E.; YUE, C.Y. Fracture resistance of short-carbon-fiber-reinforced polypropylene under Charpy impact load and its dependence on processing. ***Journal of Materials Processing Technology***, v.89-90, p.501-507, 1999.

- ✓ GAHR, K. H. Z. Microstructure and wear of materials. Amsterdam: **Elsevier**, 560 p, 1987.
- ✓ GALEA, S, C.; MIRABELLA, L.; CHIU, W. K. Non-destructive evaluation of composite-to-metal mechanically fastened joints. In: AUSTRALIAN AERONAUTICAL CONFERENCE, 5., 1993, Austrália. **Proceedings...** Australia: ACT-Institution of Engineers, 1993. - p.87-94.
- ✓ GREGUI, R. G. **Tenacidade à fratura dinâmica de uma liga de titânio de grau aeronáutico, correlacionada à mecânica da fratura elasto-plástica**. 2005. 180 f. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- ✓ HANMIN, Z.; GUOREN, H.; GUICHENG, Y. Friction and wear of poly(phenylene sulphide) and its carbon fibre composites: 1. unlubricated. **Wear**, v.116, p.59-68, 1987.
- ✓ HANMIN, Z.; GUOREN, H.; GUICHENG, Y. Friction and wear of poly(phenylene sulphide) and its carbon fibre composites: 2. water lubrication. **Wear**, v.116, p.69-75, 1987.
- ✓ HARSHA, A. P.; TEWARI, U. S. The effect of fibre reinforcement and solid lubricants on abrasive wear behavior of polyetheretherketone composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.8, p.751-767, 2003.
- ✓ HART-SMITH, J. Mechanically fastened joints for advanced composites, phenomenological considerations and simple analyses, Fibrous composites in structural design. **Plenum Press**, 643p, 1993.
- ✓ HOSKIN, B, C.; BAKER, A. A. Composite Materials for Aircraft Structures. **American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series**, 630 p, 1986.
- ✓ HOU, M.;YE, L. Understanding the thermoforming issues of carbon fibre reinforced polyphenylene sulphide [PPS] composite, Composite Technologies for 2020: Proceedings of the Fourth Asian-Australasian Conference on Composite Materials, L Ye, Y-W Mai, Z Su Eds., **Woodhead Publishing Limited**, Abington Hall, Abington, Cambridge, England, p.805-813, 2004.
- ✓ <<http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a330a340/a340-300/>>. Acesso em: 03 jan 2009.
- ✓ <<http://www.americanmatrixcorp.com/>>. Acesso em: 03 Mar 2009.
- ✓ <<http://www.boeing.com/commercial/787family/index.html>>. Acesso em: 03 Mar 2009.
- ✓ <<http://www.cpchem.com/enu/index.asp>>. Acesso em: 03 Mar 2009.

- ✓ <http://www.embraerexecutivejets.com/portugues/content/aircraft/phenom300_home.asp>. Acesso em: 10 dez 2008.
- ✓ <<http://www.hexcel.com/>>. Acesso em: 10 dez 2008.
- ✓ <<http://www.mspc.eng.br/tecdiv/rugosid110.shtml#ra>>. Acesso em: 10 dez 2008.
- ✓ <<http://www.tencate.com/>>. Acesso em: 10 dez 2008.
- ✓ <<http://www.ticona.com/home>>. Acesso em: 10 dez 2008.
- ✓ KABCHE, J. P.; CACCESE, V.; BERUBE, K. A.; BRAGG, R. Experimental characterization of hybrid composite-to-metal bolted joints under flexural loading, **Composites: Part B**, v.38, p.66-78, 2007.
- ✓ KANG, K. W.; KIM, J. K. Impact damage behavior and evaluation of residual strength in plain-woven Glass/Epoxy composites. **Key Engineering Materials**, v.183, p.271-276, 2000.
- ✓ KATO, K.; ADACHI, K.; Wear of advanced ceramics. **Wear**, v.253, p.1097-1104, 2002.
- ✓ KAWAKAME, M. S. **Estudo do atrito e desgaste de polímeros e materiais compósitos para uso em vedações de motores elétricos e compressores**. 2003. 215 f. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003.
- ✓ KELLY, G.; HALLSTRÖM, S. Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance. **Composites Part B**, v.35, p.331-343, 2004.
- ✓ KIM, S. S.; LEE, H. G.; LEE, D. G. The tribological behavior of polymer coated carbon composites under dry and water lubricating conditions. **Composite Structures**, v.77, p.364-372, 2007.
- ✓ KIM, S. S.; LEE, H. G.; LEE, D. G. Tribological behaviors of carbon composite grooved surfaces. **Composite Structures**, v.71, p.238-245, 2005.
- ✓ KLETT, L. B.; FRAME, B.; KUNC, V.; HERLING, D. R.; EBERHARDT, J.J.; Damage at holes in bolted composite/steel joints for heavy vehicle chassis components & Attachment techniques for heavy truck composite chassis members, FY 2005 Progress Report. **High Strength Weight Reduction Materials**, US Department of Energy, South Dakota, USA, p.86-94, 2005.
- ✓ LHYMN, C. Tribological properties of unidirectional polyphenylene sulfide-carbon fiber laminate composites. **Wear**, v.117, p.147-159, 1987.

- ✓ LHYMN, C.; BOZOLLA, J. Friction and wear of fiber reinforced PPS composites. **Advances in Polymer Technology**, v.7, p.451-461, 2003.
- ✓ LEE, H. G.; KIM, S. S.; LEE, D. G. Effect of compacted wear debris on the tribological behavior of carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, v.74, p.136-144, 2006.
- ✓ LUCATO, D. **Contribuição ao projeto de validação de trem de pouso tipo "Wittman" em lâmina ortotrópica transversa de material composto vidro e epóxi para aeronaves enquadradas no F.A.R. Part-23**. 1991. 234 f. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. 1991.
- ✓ MALLICK, P. K. Fatigue of bolted continuous fiber sheet molding compound composite metal-joints, Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints: **ASTM STP 927**, JM Potter Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.274-288, 1986.
- ✓ MARTIN, R.; EVANS, D. Reducing Costs in Aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium. **JOM**, v.52, p.24-28, 2000.
- ✓ MIMAROGLU, A.; UNAL, H.; ARDA, T. Friction and wear performance of pure and glass fibre reinforced poly-ether-imide on polymer and steel counterface materials. **Wear**, v.262, p.1407-1413, 2007.
- ✓ MOLINARI, A.; STRAFFELINI, G.; TESI, B.; BACCI, T. Dry sliding wear mechanisms of the Al6Al4V alloy. **Wear**, v.208, p.105-112, 1997.
- ✓ MATERIALS Research Agenda for the Automotive and Aircraft Industries, National Materials Advisory Board, Committee on Aeronautical Technologies, Aeronautics and Space Engineering Board, **Commission on Engineering and Technical Systems**, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., ISBN: 978-0-309-04985-6, 84 p, 1993.
- ✓ NAVAS, E. M. R. **Materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con carburos: optimización del proceso vía aleación mecánica**. 1999. 223 f. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 1999.
- ✓ NETO, E. F.; KIMINAMI, R. H. G. A. Avaliação da resistência ao desgaste de aluminas nanométricas produzidas a partir da decomposição do acetato de alumínio liofilizado. **Cerâmica**, v.53, p.411-416, 2007.
- ✓ NEW MATERIALS for Next-Generation Commercial Transports, Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, National Materials Advisory Board, Aeronautics and Space Engineering Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, Publication NMAB-476, National Academy Press, Washington, D.C., 88 p, 1996.

- ✓ NICHOLS, J. M.; TRICKEY, S. T.; SEAVER, M.; MOTLEY, S. R.; EISNER, E. D. Using ambient vibrations to detect loosening of a composite-to-metal bolted joint in the presence of strong temperature fluctuations. **Journal of Vibration and Acoustics**, v.129, p.710-717, 2007.
- ✓ NIU, M. C. Y. Airframe structural design, **Conmilit Press Ltd.**, Wanchai, Hong Kong, 591 p, 1988.
- ✓ NIU, M. C. Y. Composite airframe structures, **Conmilit Press Ltd.**, Wanchai, Hong Kong, 611 p, 1992.
- ✓ QU, J.; BLAU, P. J.; WATKINS, T. R.; CAVIN, O. B.; KULKARNI, N. S. Friction and wear of titanium alloys sliding against metal, polymer, and ceramic counterfaces. **Wear**, v.258, p.1348-1356, 2005.
- ✓ QUINTELIER, J.; SAMYN, P.; DE BAETS, P.; TUZOLANA, T.; VAN PAEPEGEM, W.; VAN DEN ABEELE, F.; VERMEULEN, J. Wear behavior of carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide). **Polymer Composites**, v.27, p.92-98, 2006.
- ✓ RATNA, D.; BANTHIA, A. Rubber toughened epoxy, **Macromolecular Research**, v.12, p.11-21, 2004.
- ✓ REVUELTA, D.; CUARTERO, J.; MIRAVETE, A. A new approach to fatigue analysis in composites based on residual strength degradation. **Composite Structures**, v.48, p.183-186, 2000.
- ✓ SCHÖN, J.; STARIKOV, R. Fatigue of joints in composite structures, Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics. **Harris B Ed.**, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge, p.655-699, 2003.
- ✓ SCHUITEK, A. J. **Estudo do Comportamento de Desgaste de Materiais Metálicos em Riscamento Circular**. 2007. 266 f. Dissertação de Mestrado - Depto Eng. Mecânica Poli-USP, 164p, 2007.
- ✓ SHIN, C. S.; WANG, C. M. A comparison of as-fatigue and re-consolidation residual properties for notched quasi-isotropic [0/45/90/-45]_{2s} and cross-ply [0/90]_{4s} AS4/PEEK composite laminates. **Composites: Part A**, v.33, p.1519-1528, 2002.
- ✓ SILVA, R. V. **Compósito de resina de poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 189 f. Tese de Doutorado, Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 2003.
- ✓ SILVA, L. V.; SOUZA, J. R.; ROCHA, C. A. F.; SILVA, R. C. L.; MEDEIROS J. T. N. Deslizamento a seco do PEEK e PTFE contra aço-liga, **18º CBECiMat-Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Porto de Galinhas-PE, 2008.

- ✓ SOCIETY of Automotive Engineers – Aerospace Material Specification Standard, **Designation SAE AMS 2355**, Quality assurance sampling and testing of aluminium alloys and magnesium alloys, wrought products, except forging stock, and rolled, 2002.
- ✓ SOCIETY of Automotive Engineers – Aerospace Material Specification Standard, **Designation SAE AMS 4202 C**, Aluminum alloy plate (7475-T7351) solution heat treated, stress relieved by stretching, and precipitation heat treated, 2002.
- ✓ SOCIETY of Automotive Engineers – Aerospace Material Specification Standard, **Designation SAE AMS 4911**, Titanium alloy, sheet, strip, and plate (6Al-4V annealed), 2002.
- ✓ SOCIETY of Automotive Engineers – Aerospace Material Specification Standard, **Designation SAE AMS 5659**, Precipitation hardened stainless steel bar, wire, forgings, extrusion (15-5PH), 2002.
- ✓ SOCIETY of Automotive Engineers – Aerospace Material Specification Standard, **Designation SAE-AMS 5862**, Corrosion resisting alloy 15-5 stainless steel sheet and strip, 2002.
- ✓ SOCIETY of Automotive Engineers – Material Specification Standard, **Designation SAE J 417**, Hardness Tests and Hardness Number Conversions, 2002.
- ✓ SOUTIS, C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. **Materials Science and Engineering A**, v.412, p.171-176, 2005.
- ✓ SOUZA, G. O.; GOMES, J. O.; SCHROETER, R. B. Influência do tipo de interpolação na vida de ferramenta de corte no fresamento de acabamento de superfícies complexas em Ti6Al4V, **8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica**, Cusco, Peru (trabalho 24-30), 2007.
- ✓ STARIKOV, R. Quase-static and fatigue behaviour of composite bolted joints, PhD Thesis, Department of Aeronautics. **Royal Institute of Technology Stockholm**, Sweden, 2001.
- ✓ STARIKOV, R.; SCHÖN, J. Fatigue resistance of composite joints with countersunk composite and metal fasteners. **International Journal of Fatigue**, v.24, p.39-47, 2002.
- ✓ SURESHA, B.; CHANDRAMOHAN, G.; SIDDARAMAIAH, K.; SAMAPTHKUMARAN, P.; SEETHARAMU, S. Three-body abrasive wear behaviour of carbon and glass fiber reinforced epoxy composites. **Materials Science and Engineering A**, v.443, p.285-291, 2007.

- ✓ SURESHAA, B.; CHANDRAMOHANB, G. Three-body abrasive wear behaviour of particulate-filled glass-vinyl ester composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v.200, p.306-311, 2008.
- ✓ THOPPUL, S. D.; GIBSON, R. F.; IBRAHIM, R. A. Phenomenological modeling and numerical simulation of relaxation in bolted composite joints, **Journal of Composite Materials**, v.42, p.1709-1729, 2008.
- ✓ THOPPUL, S. D.; FINEGAN, J.; GIBSON, R. F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures - a review. **Composites Science and Technology**, v.69, p.301-329, 2009.
- ✓ TOTI, F. A. **Tenacidade à fratura dinâmica em uma liga de alumínio de alta resistência AMS 7475 T7351**. 2004. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades em Ciencia e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 2004.
- ✓ TSUKIZOE, T.; OHMAE, N. Friction and wear of advanced composite materials. **Fibre Science and Technology**, v.18, p.265-286, 1983.
- ✓ WANG, C. M.; SHIN, C. S. Residual properties of notched [0/90]_{4S} AS4/PEEK composite laminates after fatigue and re-consolidation. **Composites: Part B**, v.33, p.67-76, 2002.
- ✓ WHITWORTH, H. A. Evaluation of the residual strength degradation in composite laminates under fatigue loading. **Composite Structures**, v.48, p.261-264, 2000.
- ✓ YAMAMOTO, Y.; HASHIMOTO, M. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts - part 1. **Wear**, v.253, p.822-828, 2002.
- ✓ YAMAMOTO, Y.; HASHIMOTO, M. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts - part 2: composites with carbon or glass fibre, **Wear**, v.257, p.181-189, 2004.
- ✓ YOSHIKI, G. Effect of fretting on fatigue strength of mechanically fastened GFRP joint. **Journal of the Society of Materials Science**, v.48; p.753-757, 1999.
- ✓ ZHAO, Q.; BAHADUR, S. A study of the modification of the friction and wear behaviour of polyphenylenesulfide by particulate Ag₂S and PbTe fillers. **Wear**, v.217, p.62-72, 1998.
- ✓ ZHAO, Q.; BAHADUR, S. Investigation of the transition state in the wear of polyphenylene sulfide sliding against steel. **Tribology Letters**, v.12, p.23-33, 2002.

APÊNDICE A

Demais equipamentos utilizados neste estudo:

- Paquímetro digital Mitutoyo®
- Micrômetro digital Mitutoyo®
- Cronômetro digital Mitutoyo®
- Relógio termo-higrômetro marca Minipa® (modelo MT-242, faixa de temperaturas de trabalho de 0°C a 50°C, e de umidade relativa de 20% a 90%, precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 5\%$, respectivamente, e resolução de 0,1°C e 1%, respectivamente), mostrada na Figura A1
- Balança comum marca Tríplíce® (modelo ELC 6/15/30, capacidade máxima 6 kg, 15 kg e 30 kg, mínima 40 g, precisão 2 g, 5 g e 10 g, respectivamente), mostrada na Figura A2
- Balança de precisão marca Balancin® (modelo AY220, capacidade máxima 220 g, mínimo 0,01 g, precisão 0,001 g), mostrada na Figura A3
- Pinça
- Lupa
- Lanterna
- Saco plástico
- Mascara protetora
- Câmera fotográfica digital
- Pincel

Figura A.1 - Relógio termo-higrômetro usado para a aferição da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar.

Figura A.2 - Balança comum empregada para a medição de massa dos pesos utilizados nas aplicações das cargas de desgaste.

Figura A.3 Balança de precisão utilizada para a medição de massa dos discos e pino, antes e após os ensaios de desgaste.

APÊNDICE B

Figura B.1 Suporte de fixação do pino metálico de desgaste.

Figura B.2 Suporte de fixação do disco composto de desgaste.

APÊNDICE C

(a)

(b)

Figura C.1 Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de aço PH; (b) Do disco de compósito C-PPS, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 10 kgf.

(a)

(b)

Figura C.2 Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Al; (b) Do disco de compósito C-EPX, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 20 kgf.

Figura C.3 Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Al; (b) Do disco de compósito C-PPS, em ensaio realizado à temperatura ambiente sob uma carga de 20 kgf.

Figura C.4 Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Ti; (b) Do disco de compósito C-EPX, em ensaio realizado a 100°C sob uma carga de 20 kgf.

(a)

(b)

Figura C.5 Perfis de rugosidade das superfícies de desgaste: (a) Do pino de liga-Ti; (b) Do disco de compósito C-PPS, em ensaio realizado a 100°C sob uma carga de 20 kgf.