

“UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

Lucila Maria Rebello Teixeira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS**

BAURU

2012

Lucila Maria Rebello Teixeira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração em caracterização de materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi e co-orientação do Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini.

BAURU

2012

Teixeira, Lucila Maria Rebello.

Avaliação do comportamento ao desgaste de compósitos poliméricos / Lucila Maria Rebello Teixeira, 2012
159 f. : il.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Co-orientador: Sandro Donnini Mancini

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2012

1. Compósitos poliméricos de engenharia. 2. Tribologia. 3. Ensaio de esfera sobre placa. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUCILA MARIA REBELLO TEIXEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de agosto do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação da Faculdade de Ciências, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUCILA MARIA REBELLO TEIXEIRA, intitulada "AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN

*“Dedico este trabalho a todos que acreditaram em mim e colaboraram de alguma
maneira.”*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por tudo, por me dar condições de concluir mais uma etapa da minha vida.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela orientação, dedicação e confiança.

Ao Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini pelo direcionamento, apoio e pela torcida.

Ao Prof. Dr. Paulo Noronha Lisboa Filho pela atenção e suporte.

À Andressa Castro Talon por todo apoio.

Ao Msc. Fabio Renato Camargo Sirbone, pela confiança, orientação e apoio.

Ao meu chefe Luiz Antonio Segatti de Oliveira pela confiança e pelas horas despendidas do meu trabalho para realizar esta dissertação.

Aos Profs. Drs. Antonio José Felix de Carvalho, Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves, Nilson Cristino Cruz e Carlos Alberto Fortulan pela atenção e disposição.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti e aos seus alunos por me auxiliarem com os ensaios de desgaste.

Aos colegas Eduardo Murbach Júnior, Lázaro Lopes Machado Neto e Gilvan Silva pelas análises e atenção.

A todos os profissionais do POSMAT, da USP de São Carlos, da UFScar de São Carlos, da Solvay e da empresa Schaeffler, que colaboraram com os ensaios e conhecimentos.

Aos amigos e Mestres Fernando Martinatti e Carlos Eduardo Prazzo pela força, incentivo e troca de conhecimento.

Às minhas amigas Tatiane Rabello Koga e Iracema Maria dos Santos por sempre acreditarem em mim, pelo apoio, incentivo e amizade.

Ao “primo” Rodrigo Silva Santa Rita pela paciência e ajuda.

Às minhas primas Carolina Rebello Pereira e Laura Rebello Pereira e a minha tia Vera Lícia Rebello por todo apoio, torcida e atenção.

Aos meus pais, Verli Vieira Rebello Teixeira e José Antonio Teixeira, pelo amor incondicional, pelo carinho, dedicação e por todo o apoio dado durante toda a minha vida.

A minha irmã Ana Maria Rebello Teixeira que sempre esteve ao meu lado, pela companhia, amizade, amor e carinho.

Aos meus avós Lucila Vieira Rebello e Thiago Rebello pelas palavras de incentivo e carinho, pelo amor, pelas orações e pelo exemplo de vida que eles sempre me deram.

“Feliz o homem que acha sabedoria e o homem que adquire conhecimento; porque melhor é o lucro que ela dá do que o da prata, e melhor sua renda do que o ouro mais fino. Mais preciosa é do que pérolas e tudo o que podes desejar não é comparável a ela.”

(Provérbios 3: 13-14-15)

Teixeira, L. M. R. **Avaliação do Comportamento ao Desgaste de Polímeros**. 2012. 159f. Dissertação (Mestre em Ciências e Tecnologia de Materiais) - UNESP, Faculdade de Ciências, Bauru, 2012.

Resumo

Embora os materiais poliméricos têm sido empregados na indústria como alternativa na substituição de outros materiais, por apresentarem vantagens como redução de custo e peso do produto, ainda há questões que limitam a sua utilização. Uma das principais questões enfrentadas é o comportamento tribológico destes materiais. Este trabalho visa o estudo do comportamento tribológico de desgaste dos compósitos termoplásticos de engenharia: Poli (amida-imida) com fibra de carbono e PTFE, Poli (amida-imida) com grafite e PTFE, Poli (éter éter cetona) com fibra de carbono e PTFE, Poli (aril éter cetona) com fibra de carbono e de um polímero termofixo a base de resina fenólica, com fibra de vidro e carga mineral contra o aço à seco. Para a avaliação da resistência ao desgaste foi utilizado o método de esfera sobre placa. A influência da carga aplicada e da distância de deslizamento foi avaliada. Esferas de aço SAE52100 (100Cr6) foram utilizadas como contra corpos. Antes dos ensaios a dureza, a densidade e as características térmicas dos compósitos poliméricos foram analisadas. Para avaliação do contra corpo metálico, foi realizado um ensaio metalográfico e medições de dureza. Após a elaboração dos corpos de prova, os valores de rugosidade foram obtidos para avaliar a padronização das superfícies. As dimensões das crateras após os ensaios de desgaste foram identificadas através de microscopia óptica. Os mecanismos de desgaste foram observados por meio de microscopia eletrônica de varredura e a composição química foi verificada após o ensaio tribológico por espectrometria de energia dispersiva. No geral, os resultados revelaram que os compósitos

termoplásticos apresentaram melhor desempenho tribológico frente ao termofixo, com redução do volume desgastado de 60% a 99%, aproximadamente.

Palavras-chaves: Compósitos poliméricos de engenharia; tribologia; ensaio de esfera sobre placa.

Teixeira, L. M. R. **Evaluation of Wear Behavior of Polymers.** 2012. 159p. Dissertation (Master of Science and Technology of Materials) - UNESP, Bauru, 2012.

Abstract

While polymeric materials have been used in industry as an alternative for the substitution of other materials, because they have advantages such as cost and weight reduction of the product, there are issues that limit their use. One of the major issues facing is the tribological behavior of these materials. This dissertation aims to study the tribological behavior of engineering thermoplastics composites: Poly (amide-imide) with carbon fiber and PTFE, Poly (amide-imide) with graphite and PTFE, Poly (ether ether ketone) with carbon fiber and PTFE, Poly (aryl ether ketone) with carbon fiber and a thermosetting composite based on phenolic resin with glass fiber and mineral filler against steel in dry condition. To evaluate the wear resistance, the method used was the ball cratering. Tests were performed without the presence of lubricants. The influence of the applied load and the sliding distance was measured. In all essays steel balls of SAE52100 (100Cr6) were used as counter bodies. Before testing, the hardness, density and thermal characteristics of the polymeric composites were analyzed. For evaluate the metallic counter face, metallographic essay was carried out and hardness measurements were done. After the preparation of test specimens the surface roughness were measured, to ensure standardization of the surfaces. The size of the craters made up with the wear tests were identified by optical microscopy. The wear mechanisms were observed by scanning electron microscopy and chemical composition was observed after the tribological test by energy dispersive spectrometry. Overall, the results revealed that

thermoplastic composites showed 60% to 99%, approximately on the volume removed.

Keywords: Polymeric engineering composites, tribology, ball cratering test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de um sistema tribológico.	31
Figura 2 – Estudos sobre o atrito de Leonardo da Vinci:(a)força de atrito entre planos horizontais e inclinados;(b)influência exercida pela área de contato aparente na resistência ao atrito;(c)força de atrito em um plano horizontal através de uma polia; (d)torque de atrito em uma roldana semicircular. Adaptado de Persson, 2000	33
Figura 3 – Esquema ilustrado dos princípios do modelo de Coulomb para o atrito e deslizamento. Adaptado de Stoeterau, 2004.....	34
Figura 4 – Representação da área de contato entre duas superfícies exemplificando a área aparente de contato e a área real de contato.Adaptado de Stoeterau, 2004.	37
Figura 5 – Geometria de contato entre dois corpos sólidos, (a) contato do tipo conforme; (b) limiar entre o contato conforme e o não conforme; (c) contato não conforme.	39
Adaptado de Medeiros, 2002.	39
Figura 6 – Ensaio tribológicos. (a) pino-disco; (b) esfera-disco;(c) chapa-disco; (d) pino-disco na borda; (e) cilindro-disco; (f) bloco-roda (roda de borracha).....	43
Adaptado de Lima da Silva, 2006.....	43
Figura 7 – Esquema de desgaste adesivo. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 1996.	44
Figura 8 – Ilustração do processo de desgaste adesivo, com surgimento de debré originado pela fratura das junções.Adaptado de Lima da Silva, 2006.....	45
Figura 9 - Esquema do desgaste abrasivo entre um corpo rígido, um corpo macio e uma partícula rígida. Adaptado de Buschan e Grupta, 1997.....	46
Figura 10 – Esquema do desgaste abrasivo a dois corpos. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.	47
Figura 11 – Esquema do desgaste abrasivo a três corpos. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.	48
Figura 12 – Principais mecanismos de desgaste por abrasão: a) formação de proa, b) sulcamento, c) fratura, d) desprendimento de grão. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.	48

Figura 13 – Esquema da formação e propagação de uma trinca por fadiga. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.	50
Figura 14 – Desgaste corrosivo. a) início de reação química entre as superfícies; b) desgaste das superfícies pelo mecanismo de corrosão. Adaptado de Buschan e Grupta, 1997.	51
Figura 15 – Zonas onde ocorrem os mecanismos de atrito. Adaptado de Briscoe, 1981.	53
Figura 16 - Estrutura da unidade repetida para a poli (amida-imida) – PAI. Adaptado de Callister, 2008.	64
Figura 17 - Estrutura da unidade repetida para a Poli (éter éter cetona). Adaptado de Callister, 2008.	67
Figura 18 - Estrutura da unidade repetida para a PAEK. Adaptado de Qunfeng <i>et al</i> , 2009.	68
Figura 19 - Estrutura da unidade repetitiva para a resina fenólica - <i>fenol-formaldeído</i> . Adaptado de Hong <i>et al</i> , 2009.....	69
Figura 20 - Estrutura da unidade repetida para o Politetrafluoretileno. Adaptado de Callister, 2008.	72
Figura 21 - a) Amostra pesada no ar; b) amostra pesada submersa em água desmineralizada.	77
Figura 22– Esquema de funcionamento do ensaio tribológico esfera sobre placa. Adaptado de Gant & Gee, 2011.	85
Figura 23 – Foto do equipamento utilizado para realização do ensaio tribológico esfera sobre placa.....	85
Figura 24 – Esfera (contra corpo) em contato com a amostra do compósito polimérico (corpo de prova).....	86
Figura 25 – Esquema da calota formada para avaliação do volume desgastado.	91
Figura 26 - Curva termogravimétrica do compósito termofixo com fibra de vidro e carga mineral (RF+FV+CM)	98
Figura 27 - Curva termogravimétrica derivada do compósito termofixo com fibra de vidro e carga mineral (RF+FV+CM)	99
Figura 28 - Curva termogravimétrica do compósito de PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC)	100
Figura 29 - Curva termogravimétrica derivada do compósito de PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC).....	101

Figura 30 - Curva termogravimétrica do compósito de PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE)	102
Figura 31 - Curva termogravimétrica diferencial do compósito de PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE)	103
Figura 32 - Curva termogravimétrica do compósito de PAI com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE)	104
Figura 33 - Curva termogravimétrica derivada do compósito de PAI com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE)	105
Figura 34 - Curva termogravimétrica do compósito de PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE)	106
Figura 35 - Curva termogravimétrica diferencial do compósito de PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE)	107
Figura 36- Curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PAEK+FC .	108
Figura 37 – Temperatura de transição vítrea do compósito de PAEK.....	110
Figura 38 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PEEK+FC+PTFE.....	111
Figura 39 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PEEK+FC+PTFE.....	112
Figura 40- Microestrutura do aço.	114
Figura 41 – (a) Microscopia óptica da superfície desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N gramas.....	121
Figura 42 – (a) MEV da superfície desgastada do PAEK+FC com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N...	122
Figura 43 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.....	123
Figura 44 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PAI+G+PTFE com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.....	125
Figura 45 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.....	126

Figura 46- Gráfico do desgaste volumétrico em função da distância percorrida, com 6,65 N de carga aplicada.	128
Figura 47- Gráfico do desgaste volumétrico em função da distância percorrida, com 13,49 N de carga aplicada.	129
Figura 48- Gráfico do desgaste volumétrico em função da distância percorrida, com 18,26 N de carga aplicada.	130
Figura 49 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.....	133
Figura 50 – Área desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	135
Figura 51 – Área desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	135
Figura 52 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PAEK+FC com ampliação de 200 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.....	137
Figura 53 – Área desgastada do compósito PAEK com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.....	138
Figura 54 – Área desgastada do compósito PAEK+FC com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	139
Figura 55 – MEV da área desgastada do compósito PAEK+FC com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 4401 x.	140
Figura 56 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com ampliação de 200 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.....	142
Figura 57 – Área desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	143
Figura 58 – Área desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	144
Figura 59 – Área desgastada do compósito PAI+G+PTFE com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	146
Figura 60 – Área desgastada do compósito PAI+G+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	146

Figura 61 – Área desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 250 x: (a) MEV; (b) EDS.	149
Figura 62 – Área desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	150
Figura 63 – Área desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos compósitos em estudo, segundo informações obtidas nos catálogos dos fornecedores.....	62
Tabela 2 - Dureza Shore D dos compósitos poliméricos.....	95
Tabela 3 - Densidade dos compósitos poliméricos (g/cm^3).....	96
Tabela 4 - Porcentagem de redução da densidade de um produto, considerando a utilização dos compósito de matriz termoplástica em detrimento ao de matriz termofixa.....	97
Tabela 5 - Temperaturas e entalpias de fusão e cristalização para o compósito polimérico PAEK+FC.....	109
Tabela 6 - Temperaturas e entalpias de fusão e cristalização para o compósito polimérico PEEK+FC+PTFE.	111
Tabela 7 - Dureza HRC do material metálico.....	113
Tabela 8 - Composição química do contra corpo metálico (esfera)	115
Tabela 9 - Valores da rugosidade média, R_a (μm), dos corpos de prova dos compósitos poliméricos medidos antes dos ensaios tribológicos.....	116
Tabela 10 - Valores da rugosidade de profundidade, R_z (μm), dos corpos de prova dos compósitos poliméricos medidos antes dos ensaios tribológicos.	117
Tabela 11 - Valores da rugosidade média R_a (μm) e da rugosidade de profundidade R_z (μm).dos contra corpos metálicos medidos antes dos ensaios tribológicos.....	119
Tabela 12 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico termofixo (RF+FV+CM).....	121
Tabela 13 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito PAEK+FC.....	122
Tabela 14 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico PEEK+FC+PTFE.	123
Tabela 15 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico PAI+G+PTFE.	124
Tabela 16 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico PAI+FC+PTFE.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C – Antes de Cristo

CO – Monóxido de carbono

DSC – Calorimetria exploratória diferencial

EDS – Análise por energia dispersiva

HDT – Temperatura de deflexão térmica [°C]

MEV – Microscopia eletrônica por varredura

N₂ – Nitrogênio (gás)

NO_x – Óxidos de nitrogênio

PA – Poliamida

PAEK – Poli (aril-éter-cetona)

PAI – Poli (amida imida)

PEEK – Poli (éter-éter-cetona)

PI – Poli-imida

POM – Poli (óxido de metileno)

PPA – Poliftalamida

PTFE – Poli (tetraflúor-etileno)

PU - Poliuretano

T_c – Temperatura de cristalização [°C]

T_g – Temperatura de transição vítrea [°C]

TGA – Análise termogravimétrica

T_m – Temperatura de fusão cristalina [°C]

UHMWPE - Polietileno de ultra-alto peso molecular

LISTA DE SÍMBOLOS

b – Diâmetro da calota esférica	[mm]
σ^* - Desvio padrão da distribuição Gaussiana da altura das asperezas	
D – Densidade	[g/cm ³]
D_1 – Diâmetro da esfera	[m]
E_0, E_1, E_2 - Módulos de elasticidade	[MPa]
H – Dureza do material mais macio	
H_c – Entalpia de cristalização	[J/g]
H_f – Entalpia de fusão	[J/g]
h – Profundidade da calota	[mm]
Hz – Hertz (frequência)	[s ⁻¹]
K – Coeficiente de desgaste adimensional	
KD – Coeficiente de desgaste dimensional	M/N]
μ – Coeficiente de atrito	
Mar – Peso do corpo de prova no ar	[g]
M_{H_2O} – Peso do corpo de prova imerso em água desmineralizada	[g]
Q = Distância de deslizamento	[m]
R e r – Raio da esfera	[mm]
Ra – Rugosidade média	[μm]
Rz – Rugosidade de profundidade	[μm]
Sc – Pressão de Hertz	[MPa]
ν_1 e ν_2 – Coeficiente de Poisson	
Ve – Volume desgastado	[mm ³]

W = Carga normal

[N]

ψ – Índice de plasticidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Motivação	27
2 OBJETIVOS.....	29
2.1 Objetivo Geral	29
2.2 Objetivos Específicos	29
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
3.1 Tribologia.....	30
3.2 Teorias de Atrito	31
3.3 Perfil da Superfície	34
3.4 Área de Contato entre Superfícies	36
3.5 Desgaste	40
3.5.1 Regimes de desgaste.....	41
3.5.2 Movimentos relativos.....	42
3.5.3 Mecanismos de desgaste.....	43
3.5.3.1 Desgaste por adesão	44
3.5.3.2 Desgaste por abrasão	46
3.5.3.3 Desgaste por fadiga superficial	49
3.5.3.4 Desgaste por reação química.....	50
3.6 Modelagem de Desgaste.....	51
3.7 Atrito dos Materiais Poliméricos	52
3.7.1 Adesão	54
3.7.2 Deformação.....	55
3.8 Desgaste dos Materiais Poliméricos	56
3.8.1 Desgaste adesivo.....	58
3.8.2 Desgaste abrasivo.....	59
3.9 Parâmetros que Influenciam o Atrito e o Desgaste de Polímeros	60
3.10 Característica dos Materiais em Estudo	61
3.10.1 Matrizes poliméricas.....	63

3.10.1.1 Poli (amida-imida).....	63
3.10.1.2 Poli (éter éter cetona)	66
3.10.1.3 Poli (aril éter cetona)	67
3.10.1.4 Resina Fenólica.....	68
3.10.2 Demais materiais utilizados na pesquisa.....	69
3.10.2.1 Fibra de vidro	69
3.10.2.2 Fibra de Carbono	70
3.10.3 Aditivos.....	71
3.10.3.1 PTFE – Poli (tetrafluor etileno)	71
3.10.3.2 Grafite.....	72
3.10.4 Aço SAE 52100 (100 Cr6)	73
 4 MATERIAIS E MÉTODOS	75
4.1 Caracterização dos Compósitos Poliméricos	75
4.1.2 Ensaio de dureza Shore D	75
4.1.3 Densidade	76
4.1.4 Análise termogravimétrica (TGA)	78
4.1.5 Calorimetria diferencial exploratória (DSC)	78
4.2 Caracterização do Material Metálico	79
4.2.1 Dureza.....	79
4.2.2 Análise microestrutural	80
4.2.3 Composição química.....	80
4.3 Elaboração das Amostras	81
4.4 Acabamento Superficial.....	82
4.5 Medição da Rugosidade.....	83
4.6 Ensaio Tribológico.....	83
4.7 Microscopia Óptica.....	89
4.7.1 Volume desgastado.....	90
4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura e Análise de Energia Dispersiva.....	91
 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
5.1 Compósitos Poliméricos	94
5.1.1 Dureza Shore D.....	94
5.1.2 Densidade	96

5.1.3 Termogravimetria (TGA).....	97
5.1.4 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)	108
5.2 Análise do Material Metálico.....	113
5.2.1 Dureza HRC	113
5.2.2 Análise metalográfica	114
5.2.3 Composição química.....	115
5.3 Rugosidade	116
5.3.1 Rugosidade do corpos de prova (amostras).....	116
5.3.2 Rugosidade dos contra corpos (esferas).....	118
5.4 Microscopia Óptica e Cálculo do Volume Desgastado.....	120
5.5 Desempenho Tribológico dos Compósitos Poliméricos	128
5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS).....	132
5.6.1 Compósito termofixo	132
5.6.2 Compósito PAEK.....	136
5.6.3 Compósito PEEK.....	141
5.6.4 Compósito PAI com grafite e PTFE.....	145
5.6.5 Compósito PAI com fibra de carbono e PTFE.....	148
 6 CONCLUSÕES	 152
 REFERÊNCIAS.....	 154

1 INTRODUÇÃO

Por motivos econômicos e devido ao crescente avanço tecnológico, a competitividade global encontra-se cada vez mais acirrada. O mercado, mais exigente, vem buscando alternativas de baixo custo, melhores produtos e processos mais eficientes que não agredam o meio ambiente, preocupando-se com a escassez dos recursos naturais e a redução do consumo de energia (HEMAIS, 2003).

Todas as indústrias são afetadas pela incessante busca de redução de custo e melhoria da eficiência energética.

A substituição de materiais metálicos por poliméricos esta cada vez mais sendo empregada nos diversos ramos industriais e principalmente no ramo automotivo, onde já ocupam lugar de destaque. Passaram a fazer parte dos automóveis principalmente a partir do desenvolvimento de polímeros de alto desempenho que são capazes de suprir as solicitações desejadas na aplicação (MEDINA, 2002; HEMAIS, 2003).

Durante a elaboração de um projeto, há duas principais características que tornam os polímeros, assim como os compósitos poliméricos, atraentes em comparação com a utilização dos materiais metálicos convencionais. Uma destas características é a capacidade de adaptação aos projetos, garantindo resistência e rigidez necessárias. A outra é a sua densidade, relativamente baixa em comparação com os metais. Além dessas características, o congregado entre custo da matéria-prima e processo de produção econômico, redução do tempo de fabricação e ganho de resistência à corrosão, também tornam estes materiais atrativos (UNAL *et al*, 2005).

Para a seleção do tipo de material que será utilizado, visando melhor atender as solicitações dos clientes, alguns critérios devem ser priorizados, a saber: as especificações dimensionais, de forma e de peso, limitações do produto e da sua aplicação, as propriedades e a estrutura dos materiais, os processos e tipos de tratamentos que serão empregados, a relação custo e benefício, a disponibilidade da matéria-prima e de mão de obra qualificada e os investimentos necessários (FERRANTE, 2007).

Visando a avaliação da vida útil de um produto em uma determinada aplicação que exige contato constante sob movimento, um dos fatores mais importantes e que pode atuar como um fator limitante é o seu comportamento tribológico, ou seja, como a condição de funcionamento pode ser influenciada pelo atrito e pelo desgaste (HUTCHINGS, 1992; UNAL *et al*, 2005).

Através da temática do atrito, do desgaste e da lubrificação pode-se aplicar análises operacionais para a resolução de problemas com grande relevância econômica, como a confiabilidade de sistemas, na manutenção e avaliação de desgaste em equipamentos que envolvem desde aplicações domésticas a aplicações espaciais (SILVA, 2009).

Os polímeros puros apresentam desvantagens em situações onde elevada resistência mecânica, resistência ao atrito e ao desgaste são requeridas, neste sentido os compósitos de matriz polimérica auxiliam na solução destes problemas.

Atualmente, compósitos de matriz polimérica tem sido cada vez mais utilizados em aplicações tribológicas, tais como engrenagens, buchas, vedações e rolamentos. Além de melhorar o desempenho tribológico, o emprego de compósitos poliméricos em substituição a materiais metálicos proporciona uma redução de peso dos componentes (FRIEDRICH *et al*, 2012).

Compósitos são materiais multifásicos que apresentam proporção significativa das fases que o constituem, visando a obtenção de uma melhor combinação de propriedades. Alguns dos tipos de compósitos mais comuns possuem matriz (fase dispersante) polimérica reforçada com cargas (fase dispersa) e são chamados compósitos poliméricos (CALLISTER, 2008).

Fibras de carbono são adicionadas para aumentar a resistência mecânica e a rigidez do polímero. Fibras longas e curtas de vidro e as de aramidas também podem ser acrescentadas para melhorar as propriedades mecânicas. Elementos lubrificantes, assim como PTFE e/ou grafite, são incorporados na sua composição para reduzir o mecanismo de adesão através da formação e transferência de filmes na face do contra corpo, agindo como elementos protetivos (FRIEDRICH *et al*, 2005; FERRANTE, 2007).

1.1 Motivação

Com a crescente utilização de compósitos poliméricos em aplicações automotivas, existe o interesse em desenvolvimentos que envolvam este tipo de material visando avaliar o seu desempenho em relação a uma determinada aplicação. A idéia desta dissertação surgiu com a necessidade do estudo do comportamento tribológico de desgaste de compósitos poliméricos de matriz termoplástica que pudessem substituir um compósito polimérico de matriz termofixa, utilizado na fabricação de pistões que compõe o cilindro mestre de embreagens automotivas. Inicialmente foi selecionado um compósito de matriz termofixa, em razão à sua estabilidade dimensional, bom acabamento superficial e resistência à

altas temperaturas. Porém, algumas dificuldades, como processabilidade, desgaste do pistão possibilitando fratura e quebra e o fato de não ser um material reciclável, geraram a necessidade de se avaliar compósitos poliméricos de matriz termoplástica que apresentassem propriedades semelhantes de dureza, acabamento superficial, boa resistência mecânica e à altas temperaturas e principalmente melhor desempenho frente ao desgaste (sistemas autolubrificantes).

Neste contexto, esta dissertação tem por finalidade avaliar de forma comparativa o comportamento tribológico de cinco compósitos poliméricos, sendo quatro deles de matriz termoplástica e um de matriz termofixa, em contato com um aço SAE52100 (100Cr6), por meio do ensaio tribológico de esfera sobre placa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Verificar, em comparação com um compósito termofixo (resina fenólica, com fibra de vidro e carga mineral) já utilizado em aplicações dinâmicas automotivas contra aço, se dentre quatro compósitos termoplásticos selecionados: Poli (amida-imida) com fibra de carbono e PTFE, Poli (amida-imida) com grafite e PTFE, Poli (éter éter cetona) com fibra de carbono e PTFE, Poli (aril éter cetona), haverá algum com propriedades de desgaste superiores.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios tribológicos de esfera sobre placa em cinco diferentes compósitos poliméricos, com diferentes variações de carga e distância de deslizamento.
- Comparar o desempenho dos compósitos quanto à carga aplicada e a distância de deslizamento, através do cálculo do volume desgastado durante os ensaios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tribologia

Tribologia é o estudo do atrito e deriva das palavras gregas *tribos* (atrito) e *logos* (estudo). É descrita como a ciência e tecnologia que trata do estudo de superfícies e da sua interação em movimento relativo, abrangendo o estudo do atrito, lubrificação e desgaste. Esta interação, sistêmica, não linear e de eminente sensibilidade, proporciona a ação do atrito. Com o passar do tempo, o atrito gera desgaste das superfícies que estão em contato entre si. A lubrificação reduz o atrito em alguns casos, propiciando uma melhoria na durabilidade das superfícies, pois pode evitar o desgaste excessivo (HUTCHINGS, 1992).

Um sistema tribológico (tribossistema) é formado pelo encontro, em contato móvel, das superfícies de dois componentes e da área adjacente. A dimensão, a categoria e o progresso do desgaste são influenciados pelo tipo dos materiais e seus acabamentos superficiais, pela temperatura, pressão, umidade, presença de materiais intermediários como água, graxa, óleo, partículas e contaminantes e pelas condições de operação (carga aplicada e tipo de movimento), conforme Figura 1 (STOETERAU, 2004).

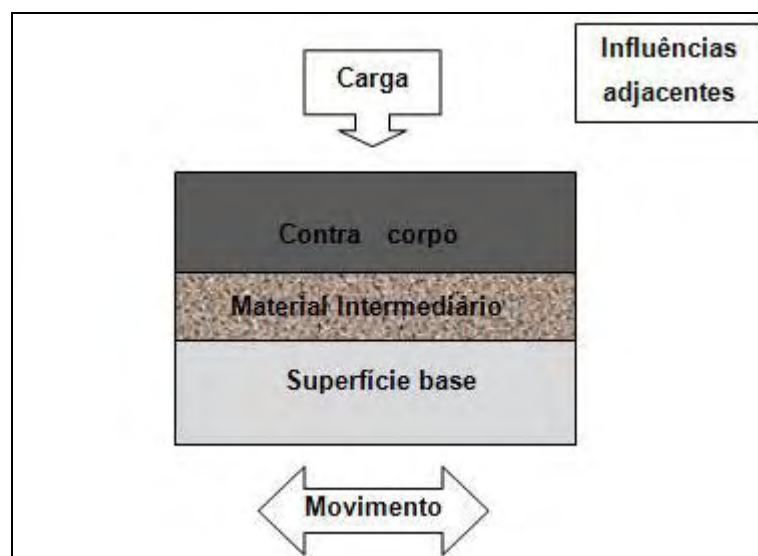


Figura 1 – Representação de um sistema tribológico.

3.2 Teorias de Atrito

O atrito é um parâmetro importante na seleção de materiais que atuam em contato, afetando variáveis como as condições de trabalho, a formação e transferência de filmes (películas), formação de debris e geração de calor. As forças de atrito são difíceis de prever, pois dependem das propriedades das superfícies, que podem mudar ao longo do tempo através do desgaste e por mecanismos de deformação e oxidação (MENEZES, 2011).

Os primeiros dispositivos tribológicos foram criados há milhares de anos, mas o ápice da história da tribologia foi a invenção da roda primitiva por volta de 3500 a.C.. O atrito contribuiu para o desenvolvimento da civilização paleolítica e os relatos mais antigos são a utilização de objetos (brocas) para produção de fogo e para realizar furações. Por volta de 2000 a.C. o desenvolvimento dos primeiros mancais

progrediu com o emprego de mancais de pedra polida nas rodas de oleiro (STOETERAU, 2004).

Os primeiros lubrificantes foram empregados na redução do atrito em movimentos lineares por volta de 3500 a.C. Este fato foi constatado, pois uma carruagem encontrada em uma tumba do Egito antigo continha em seus mancais de rodas lubrificante de origem animal (STOETERAU, 2004).

Por volta de 1100 a.C., assírios movimentaram um enorme bloco de pedra utilizando como apoio pranchas sobre roletes. Neste mesmo período, cálculos do coeficiente de atrito envolvido neste mecanismo, demonstram que ocorreu um desenvolvimento tribológico significativo marcado pela alteração do movimento de deslizamento para o de rolamento (STOETERAU, 2004).

Robert Hooke, em 1684, sugeriu que no lugar de suportes de madeira com ferro, o conjunto de eixos de aço com buchas de bronze (material utilizado em sinos na época) para mancais de rodas fosse empregado. O emprego deste novo material para mancal virou patente por volta de 1840 (STOETERAU, 2004).

Leonardo da Vinci (1452-1519) foi um dos precursores na investigação do atrito, que é um dos princípios fundamentais da tribologia. Em 1699, Amontons enunciou as duas primeiras leis do atrito de deslizamento, constatadas 200 anos antes por Leonardo da Vinci. Ele constatou que a força de atrito é independente da área de contato aparente e proporcional à carga normal aplicada. Amontons “redescobriu” as leis realizando investigações experimentais independentemente de Leonardo da Vinci (PERSSON, 2000).

A Figura 2 mostra os estudos elaborados por Leonardo da Vinci sobre as forças de atrito entre superfícies inclinadas e horizontais e seus estudos sobre a

influência que a área de contato aparente exerce na resistência ao atrito (PERSSON, 2000).

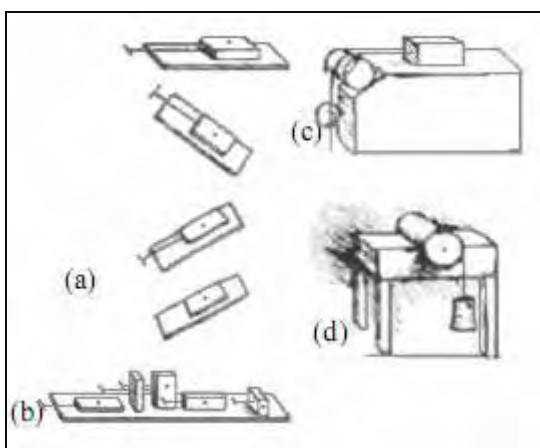


Figura 2 – Estudos sobre o atrito de Leonardo da Vinci: (a) força de atrito entre planos horizontais e inclinados; (b) influência exercida pela área de contato aparente na resistência ao atrito; (c) força de atrito em um plano horizontal através de uma polia; (d) torque de atrito em uma roldana semicircular. Adaptado de Persson, 2000.

Em 1785, aproximadamente, Coulomb confirmou as leis de atrito enunciadas por Amontou e propôs a terceira lei, em que a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

No modelo desenvolvido por Coulomb, a rugosidade é representada pela geometria de dentes de serra. Com o deslizamento do corpo da posição “A” para a posição “B” um trabalho é realizado em oposição à carga normal “L” e as superfícies encontram-se separadas. O trabalho realizado pela força de atrito (μ) contra a carga normal equivale a $tg(\theta)$. Na movimentação do corpo da posição “B” para a posição “C” a carga normal realiza uma quantidade igual de trabalho, não ocorrendo dissipação de energia durante o ciclo todo, pois toda energia armazenada no primeiro deslizamento é recuperada (HUTCHINGS, 1992).

Conforme Coulomb e Amontons a maior influência da força de atrito ocorre devido às interações mecânicas existentes entre as deformações elásticas ou rígidas das asperezas (rugosidade). O modelo de Coulomb está representado na Figura 3 (STOETERAU, 2004).

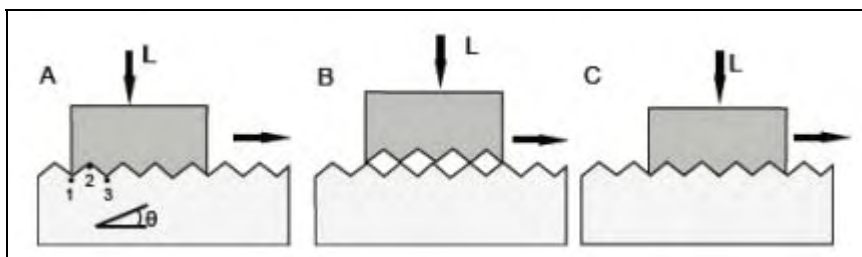


Figura 3 – Esquema ilustrado dos princípios do modelo de Coulomb para o atrito e deslizamento. Adaptado de Stoeterau, 2004.

Entre 1930 e 1970, Bowden e Tabor realizaram estudos que deram origem a maioria das teorias fluentes sobre atrito de deslizamento. Estas teorias são a base para as teorias de deslizamento atuais. O modelo de atrito de deslizamento elaborado por Bowden e Tabor supõe que a força de atrito é formada por duas componentes: uma força de adesão e uma de deformação necessária para idantar as asperezas de uma superfície mais dura em uma superfície mais mole (HUTCHINGS, 1992).

3.3 Perfil da Superfície

Todas as superfícies são rugosas em escala microscópica, conseqüentemente quando duas superfícies estão em contato, a proximidade de

suas asperezas gera interações químicas ou físicas ocasionando contato adesivo, ou seja, junção das asperezas. Quando as duas superfícies que estão em contato encontram-se em movimento relativo, uma força lateral, descrita como força de atrito adesiva, conduz a formação e a ruptura das junções (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1996).

Segundo STOETERAU (2004), nenhum processo de produção permite a obtenção de superfícies perfeitamente lisas, os erros induzidos pelos processos de produção refletem sob a forma de desvios dimensionais e geométricos. As superfícies dos sólidos, mesmo que pareçam perfeitamente lisas, apresentam uma variedade de defeitos e distorções que vão desde desvios de forma (volume superficial) às irregularidades microscópicas locais, da ordem de distância interatômica. Estes desvios e irregularidades exercem forte influência no atrito e no desgaste.

De acordo com a norma DIN 4760, as superfícies apresentam regiões com diferentes planicidades (maiores ou menores), esta diferença é definida como rugosidade. Estes desvios encontrados nas superfícies podem ser divididos em seis ordens e apesar de possuírem características distintas, não são encontrados separadamente, eles se sobrepõem e formam o perfil completo de uma superfície.

Segundo Hutchings (1992), a rugosidade superficial é formada pelo conjunto de vales e picos com amplitude micrométrica que são encontrados nas superfícies de engenharia.

Conforme Gahr (1987), a textura característica de uma superfície é denominada pelo tamanho, forma e arranjo dos elementos individuais, assim como os picos e vales em uma escala microscópica (asperezas).

Persson (2000) supõe para corpos macroscópicos que, ao menos que a natureza das superfícies seja muito rugosa ou muito dúctil, o atrito de deslizamento é aproximadamente independente da rugosidade. No caso de asperezas muito elevadas, a rugosidade pode provocar um aumento do atrito. Para superfícies dúcteis a aderência pode ocasionar o aumento da área de contato e consequentemente aumentar o atrito.

3.4 Área de Contato entre Superfícies

Do ponto de vista macroscópico, quando duas superfícies planas e paralelas são colocadas em contato, a área de uma superfície encosta na área da outra superfície por completo, esta região onde ocorre contato é denominada de área aparente de contato. Entretanto, do ponto de vista microscópico, o contato se dá inicialmente apenas em alguns pontos discretos, devido à rugosidade e esta área é denominada de área real de contato. A área real de contato é formada pela soma de todas as junções (regiões onde ocorre contato pontual). Quando se tem um aumento significativo da carga normal aplicada, ocorre uma aproximação maior das superfícies e o número de pontos em contato aumenta (HUTCHINGS, 1992; GAHR, 1987).

A Figura 4 ilustra a área de contato aparente e demonstra que os contatos pontuais (junções) referentes à área de contato real são, em geral, muito menores que a área de contato aparente (macroscópica) (STOETERAU, 2004).

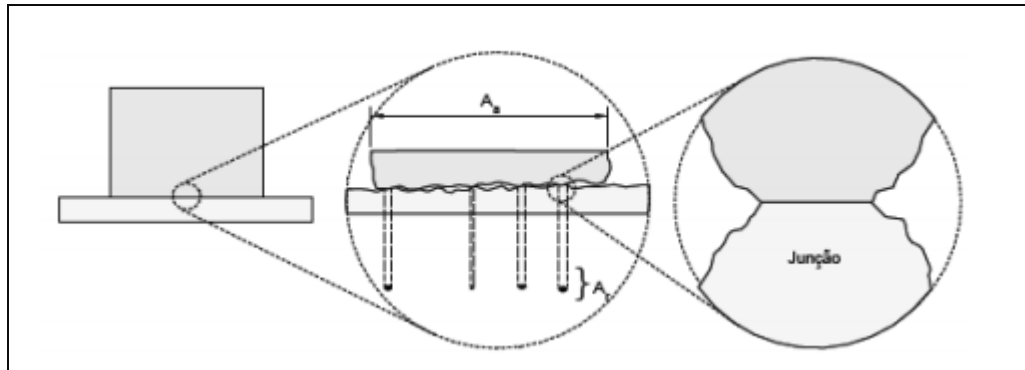


Figura 4 – Representação da área de contato entre duas superfícies exemplificando a área aparente de contato e a área real de contato. Adaptado de Stoeterau, 2004.

O atrito e consequentemente o desgaste de duas superfícies sólidas que estão em contato sem lubrificação depende principalmente da rugosidade das superfícies, da dureza dos materiais e do tipo de deformação das asperezas envolvidas (GAHR, 1987).

Hutchings (1992) cita a teoria de Greenwood e Williamson, mais utilizada para contatos do tipo elástico, mas que pode ser empregada também para fluidez plástica presente entre as asperezas. A teoria propõe que quando uma superfície sofre tensões e deformações de meios externos, o índice de plasticidade Ψ , descreve a transição da deformação elástica para a plástica, através da proporção de contatos necessária entre as asperezas desta superfície para que ocorra a fluidez plástica. O valor do índice de plasticidade é representado pela Equação 1:

$$\Psi = \frac{E^1}{H} \left(\frac{\sigma^*}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde H representa a dureza do material mais dúctil, σ^* é o desvio padrão da distribuição Gaussiana da altura das asperezas, r é o raio das asperezas (considerado o mesmo para todas as asperezas). Com E^1 determinado através da Equação 2:

$$E^1 = \frac{E_1 * E_2}{E_2(1 - \nu_1^2) + E_1(1 - \nu_2^2)} \quad (2)$$

E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade e ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson de dois corpos em contato (HUTCHINGS, 1992).

Se o índice de plasticidade for menor do que 0,6 ($\psi < 0,6$), o contato elástico predomina, porém, se o índice for maior que 1 ($\psi > 1$), o contato plástico prevalece. Para superfícies de material metálico, os valores do índice de plasticidade (ψ) variam entre 0,1 e 100. Geralmente, o fator E/H para materiais cerâmicos e poliméricos, é um décimo do apresentado pelos metais, isto representa uma redução no valor do índice de plasticidade (ψ). Dessa forma, para cerâmicas e polímeros, o contato elástico é mais expressivo que o plástico. (HUTCHINGS, 1992).

Da Vinci definiu a concepção de contato mecânico em função da osculação do contato ou geometria da interseção entre dois corpos sólidos que estão em contato (MEDEIROS, 2000). Esta concepção de contato mecânico está exposta na Figura 5.

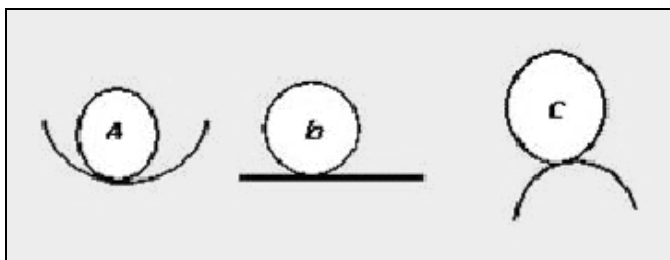


Figura 5 – Geometria de contato entre dois corpos sólidos, (a) contato do tipo conforme; (b) limiar entre o contato conforme e o não conforme; (c) contato não conforme. Adaptado de Medeiros, 2002.

Durante o contato de duas superfícies sob carregamento, pode ocorrer somente uma deformação elástica ou uma deformação elástica e plástica simultaneamente. Em escala macroscópica ou microscópica (asperezas), no caso de contatos não conformes, modela-se a tensão como sendo uma de Hertz (WILLIAM, 2004). Conforme a teoria de Hertz, a compressão gerada pela aplicação de uma tensão normal resulta em um campo de pressão com uma distribuição parabólica (MEDEIROS, 2002).

O cálculo da tensão máxima de contato elástico entre o corpo de prova e o contra corpo pode ser efetuado utilizando-se a equação desenvolvida por Hertz. Esta equação relaciona as características mecânicas dos dois materiais envolvidos, assim com o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. O resultado desta equação representa a pressão no contato da superfície entre os dois corpos. A Equação 3 define a pressão de Hertz (S_c):

$$S_c = 0,918 \left[\frac{P}{(D^2 * E_0^2)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

(3)

Onde P corresponde à carga aplicada em N , D ao diâmetro da esfera em m , e E_0 é obtido através da Equação 4:

$$E_0 = \left\{ \left[\left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) \right] + \left[\left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Com E_1 e E_2 representando os módulos de elasticidade dos materiais em Pa e ν_1 e ν_2 os coeficientes de Poisson (adimensional) para os dois materiais (MEDEIROS, 2002).

3.5 Desgaste

A atividade tribológica está relacionada com o atrito entre um corpo e um contra corpo e é gerada pelo contato e movimento relativo entre estes elementos. A tribologia relaciona e descreve os fenômenos que atuam na área de atrito. O desgaste é o resultado de uma atividade tribológica entre as duas superfícies e provoca remoção de material devido ao atrito ocasionado pelas asperezas das superfícies que estão em contato e em movimento (HUTCHINGS, 1992).

A norma DIN 50320 define o desgaste como sendo um dano a uma superfície sólida gerando perda progressiva de material, como resultado do movimento relativo entre um corpo e um contra corpo sólido, líquido ou gasoso.

O desgaste pode ocasionar danos secundários como desalinhamento e vibração devido a alterações dimensionais ou danos na superfície dos componentes (GAHR, 1987).

3.5.1 Regimes de desgaste

Quando superfícies deslizam entre si, o tipo de atrito encontrado varia com a natureza dos materiais em contato, com a carga aplicada, a área superficial, a rugosidade da superfície e a velocidade do deslizamento. (STOETERAU, 2004).

O regime de desgaste, assim como o regime de atrito, pode ser dividido em três classes: desgaste severo, moderado ou catastrófico. O que define o tipo de regime é a variação na taxa de desgaste e esta pode ser influenciada por variações na severidade do carregamento, ou seja, da carga normal, da velocidade de deslizamento ou da temperatura superficial (LEWIS & OLOFSSON, 2004; HUTCHINGS, 1992).

O desgaste moderado resulta em uma superfície muito menos rugosa que a original. Produz partículas (debrís) de desgaste geralmente de 0,01 a 1 μm de diâmetro e gera mínima deformação plástica (STOETERAU, 2004).

O desgaste severo, em contraste, resulta em superfícies muito mais rugosas com elevada deformação plástica e partículas de desgaste com diâmetros da ordem de 20 a 200 μm que podem ser vistas a “olho nu” (LEWIS & OLOFSSON, 2004; HUTCHINGS, 1992).

O desgaste catastrófico gera falhas bruscas na superfície. Cada regime pode ser identificado pela aparência das superfícies, metalografia das seções dos materiais e partículas formadas pelo desgaste. O desgaste que ocorre no regime moderado pode ser identificado por meio da oxidação superficial, já nos regimes severo e catastrófico, ocorre à formação de trincas na superfície e perda de material devido ao lascamento (LEWIS & OLOFSSON, 2004).

3.5.2 Movimentos relativos

Outra classificação é a mais tradicional para definir os tipos de desgaste é baseada no tipo do mecanismo de desgaste empregado ou no tipo de movimento relativo realizado (RAMALHO & MIRANDA, 2006).

Os cinco principais tipos de movimentos relativos são: deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e fluxo (GAHR, 1987).

Conforme Hutchings (1992), o deslizamento e o rolamento são os mais frequentes e de maior importância. Ele salienta que essas duas classes de movimento não ocorrem de forma isolada, ou seja, um movimento relativo de rolamento quase sempre envolve algum deslizamento.

Baseados no movimento relativo, diferentes ensaios tribológicos foram desenvolvidos para simular o mecanismo de desgaste envolvido em cada caso. Várias técnicas aplicadas a ensaios de desgaste não tem especificação padrão, porém têm sido aceitas por laboratórios de todo o mundo (GAHR, 1987). A Figura 6 apresenta algumas configurações.

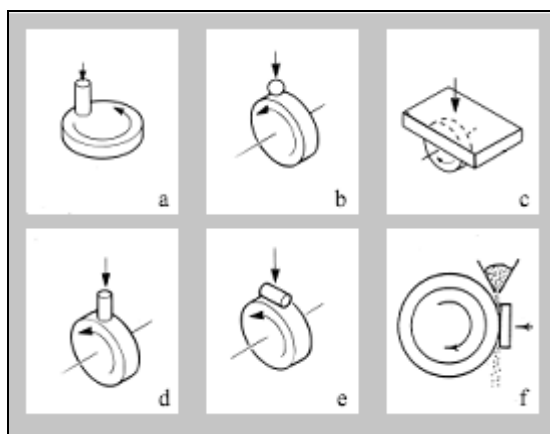


Figura 6 – Ensaaios tribológicos. (a) pino-disco; (b) esfera-disco; (c) chapa-disco; (d) pino-disco na borda; (e) cilindro-disco; (f) bloco-roda (roda de borracha). Adaptado de Lima da Silva, 2006.

3.5.3 Mecanismos de desgaste

Os tipos de desgaste podem ser classificados e definidos de acordo com o mecanismo que gera a remoção do material durante o processo. A norma DIN 50320 agrupa os mecanismos de desgaste em quatro tipos principais, conforme descrito a seguir:

- 1) *Desgaste por adesão*: ocorre ligação e quebra de ligação adesiva interfacial;
- 2) *Desgaste por abrasão*: ocorre a remoção de material devido ao riscamento ou scratching;
- 3) *Desgaste por fadiga superficial*: a fadiga gera formação de trinca na região superficial devido a tensões cíclicas tribológicas que resultam na separação de material;

4) *Desgaste por corrosão*: há a formação de produtos de reação química como um resultado de interações químicas entre os elementos de um sistema tribológico iniciados pela ação tribológica (GAHR, 1987).

3.5.3.1 Desgaste por adesão

O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies em contato entre si deslizam uma contra a outra em movimento relativo e forças de atrito reagem a este movimento. Estas forças de atrito ocorrem devido à adesão entre as superfícies. A junção entre as superfícies causa fratura de material de uma ou de ambas as superfícies. Fragmentos de uma superfície aderem na outra e mais tarde esses fragmentos podem se soltar novamente e aderirem na superfície original ou também formarem partículas soltas. A figura 7 ilustra o esquema de desgaste adesivo (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1996).

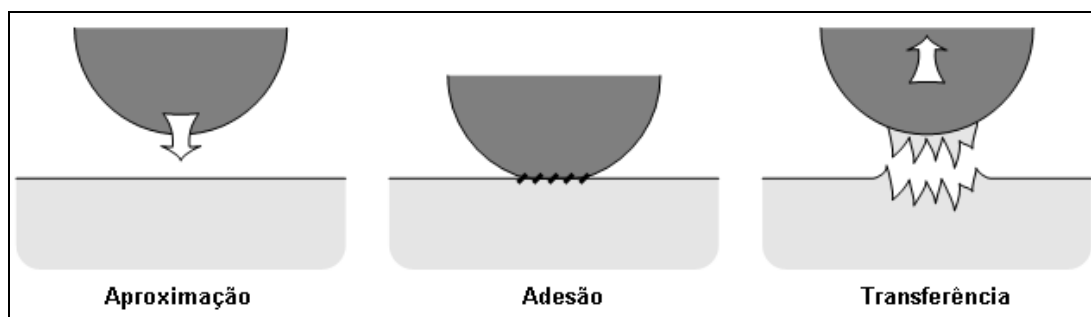


Figura 7 – Esquema de desgaste adesivo. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 1996.

Conforme Myshkin *et al.* (2005), do ponto de vista microscópico, quando dois corpos estão em contato, as forças superficiais de atração e repulsão interagem entre os átomos e as moléculas de ambas as superfícies.

A adesão ocorre na zona interfacial devido às forças de ligações covalente, metálica, iônica, hidrogênio e Van der Waals presentes nos materiais. A adesão é propiciada pela deformação plástica, alta pressão local e por um bom acabamento superficial. Neste mecanismo de desgaste, as asperezas das superfícies que estão em contato formam junções adesivas. Estas junções aumentam com o aumento da deformação plástica e com o movimento relativo contínuo. A ruptura das junções pode transferir material de uma superfície para outra ou gerar debris conforme Figura 8 (GAHR, 1987).

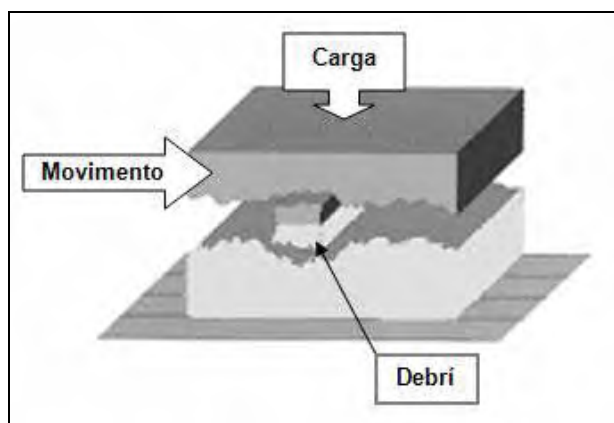


Figura 8– Ilustração do processo de desgaste adesivo, com surgimento de debris originado pela fratura das junções. Adaptado de Lima da Silva, 2006.

3.5.3.2 Desgaste por abrasão

A abrasão geralmente ocorre quando superfícies duras e rugosas, ou superfícies dúcteis que contém partículas duras, deslizam sobre uma superfície mais mole, ou ocorre quando partículas duras soltas rolam ou deslizam entre duas superfícies. Neste último caso, um grão abrasivo adere temporariamente em uma das superfícies, ou é incrustado nela, e risca a superfície oposta. (STOETERAU, 2004). A Figura 9 ilustra o esquema do desgaste abrasivo.

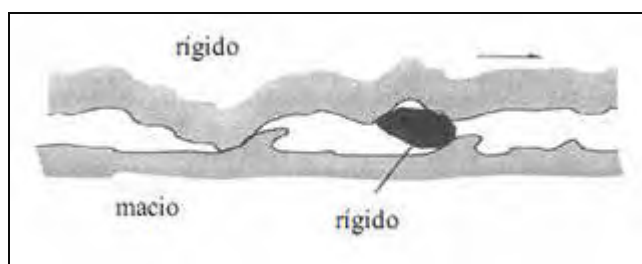


Figura 9 - Esquema do desgaste abrasivo entre um corpo rígido, um corpo macio e uma partícula rígida. Adaptado de Buschan e Grupta, 1997.

O desgaste abrasivo é definido como sendo uma forma de desgaste que resulta na remoção ou deslocamento de material da superfície de um corpo deslizando em contato com um contracorpo, pela ação de partículas duras ou asperezas. Existem dois processos que ocasionam o desgaste abrasivo: o processo de desgaste abrasivo de dois corpos e de três corpos (HUTCHINGS, 1992).

O desgaste do tipo dois corpos envolve apenas duas superfícies em contato, a superfície mais dura e rugosa desloca material da outra, mais mole. Já o desgaste do tipo três corpos envolve, além das duas superfícies que estão em contato, um

terceiro elemento (substância sólida dura) entre as duas superfícies. As taxas de desgaste devido à abrasão três corpos geralmente são menos expressivas do que as de dois corpos (HUTCHINGS, 1992).

A Figura 10 exemplifica o desgaste por abrasão a dois corpos. Onde grãos ou asperezas duras estão presos rigidamente em uma das superfícies e atuam sobre a outra superfície como uma ferramenta de corte.

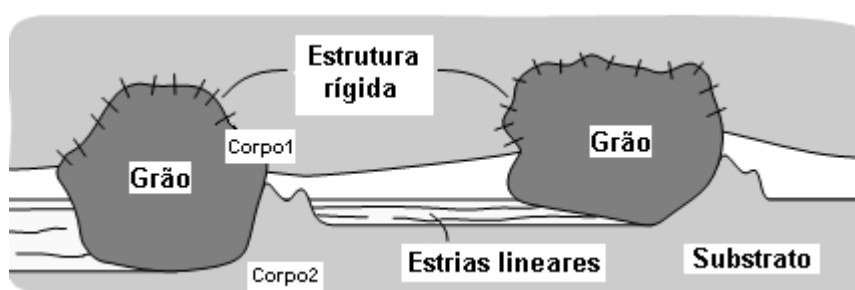


Figura 10 – Esquema do desgaste abrasivo a dois corpos. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.

A Figura 11 ilustra o desgaste por abrasão a três corpos. Neste caso, os grãos estão livres para deslizar e rolar sobre a superfície, desde que não estejam presos rigidamente em alguma das superfícies (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2005).

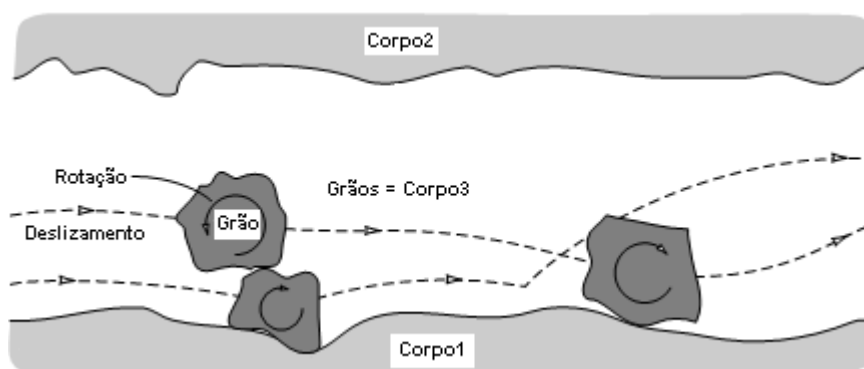


Figura 11 – Esquema do desgaste abrasivo a três corpos. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.

A Figura 12 ilustra a formação de proa e sulcamento (deformação plástica) pelo mecanismo de desgaste por abrasão bem como o surgimento da fratura frágil e desprendimento de grão.

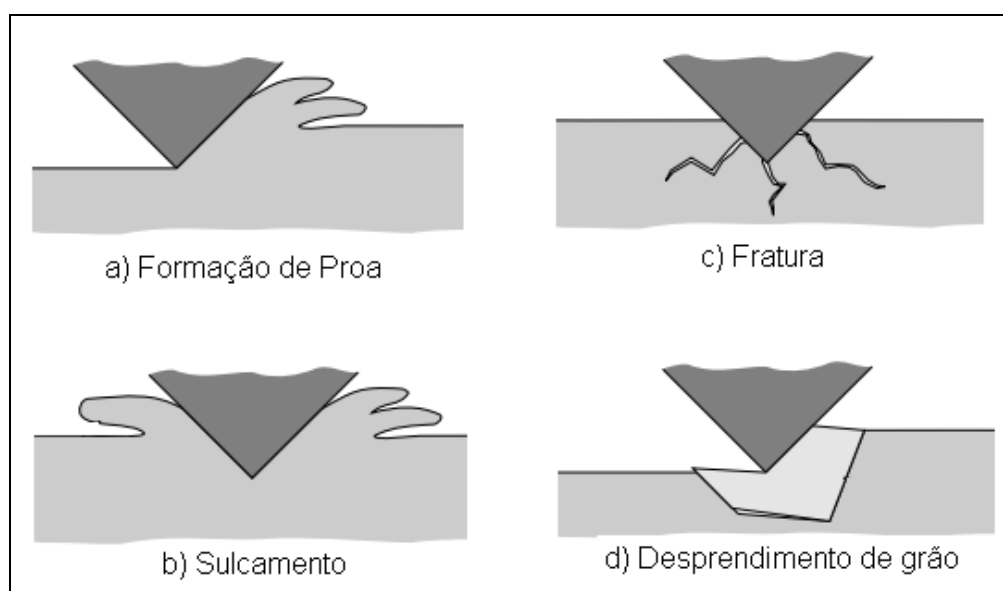


Figura 12 – Principais mecanismos de desgaste por abrasão: a) formação de proa, b) sulcamento, c) fratura, d) desprendimento de grão. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.

O mecanismo de desgaste abrasivo é utilizado, em larga escala, em operações de acabamento superficial. O tipo abrasivo de dois corpos é empregado

em lixas, limas, rebolos, papéis e tecidos abrasivos. O desgaste do tipo três corpos é empregado para processos de lapidação e polimento (STOETERAU, 2004).

3.5.3.3 Desgaste por fadiga superficial

De acordo com Buschan e Grupta (1997), o desgaste por fadiga superficial acontece quando forças cíclicas são aplicadas no material. As tensões, geradas através de partículas ou asperezas livres, ocasionam a formação de trincas superficiais, ou subsuperficiais, gerando a formação de fragmentos. A remoção destes fragmentos gera formação de grandes crateras superficiais.

Segundo Stoeterau (1994), tensões de contato surgem em superfícies que se encontram em movimento de rolamento. Conforme Hertz, estas tensões de contato, geram tensões cisalhantes cujo valor máximo ocorre na subsuperfície. A zona de contato desloca-se através do movimento de rolamento. A tensão de cisalhamento varia de um valor mínimo até um valor máximo e retorna ao valor mínimo, gerando tensões cíclicas que podem ocasionar falha por fadiga. Uma trinca que se forma abaixo da superfície e se propaga devido ao carregamento cíclico, pode chegar à superfície. Quando a trinca chega à superfície e lasca, surge uma partícula superficial gerando a formação de uma cavidade ou pit.

Conforme Gahr (1987), o desgaste por fadiga superficial pode ser descrito pelo destacamento de material e pela formação de trincas e é causado por cargas cíclicas que atuam na superfície. O deslizamento repetido de uma partícula dura sobre uma superfície sólida pode ocasionar a formação e a propagação de trincas

abaixo da superfície. As partículas de desgaste surgem quando uma trinca originada abaixo da superfície se propaga e atinge a superfície.

A Figura 13 representa o fluxo de formação de desgaste por fadiga. A trinca primária forma-se na superfície e propaga-se em direção ao núcleo da peça. Uma trinca secundária pode desenvolver-se a partir da trinca primária. Uma partícula de desgaste é liberada quando a trinca desenvolvida encontra-se com a superfície (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

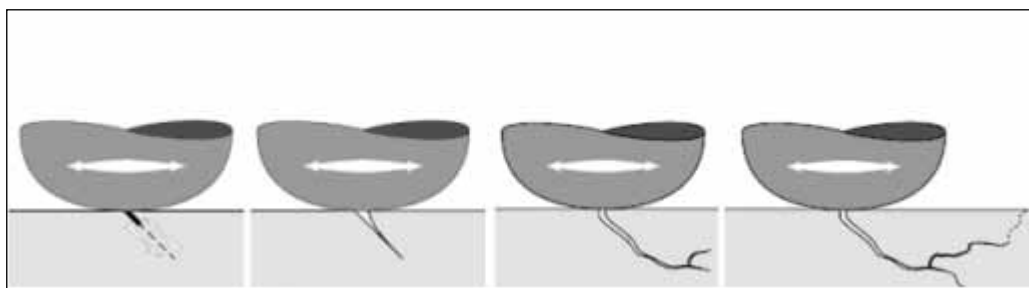


Figura 13 – Esquema da formação e propagação de uma trinca por fadiga. Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2005.

3.5.3.4 Desgaste por reação química

O desgaste corrosivo ocorre em uma vasta gama de situações. A causa fundamental desta forma de desgaste é a reação química que ocorre entre o material desgastado e um meio agressivo quimicamente, que pode ser tanto um reagente de químico, um lubrificante ou mesmo ar. Desgaste corrosivo é um termo geral relacionado com qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivos. Nesta forma de desgaste a taxa de desgaste aumenta

enquanto o coeficiente de atrito reduz. Esta contradição que ocorre entre o atrito e o desgaste serve para identificar estes processos de desgaste (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1996). Uma ilustração de desgaste corrosivo é apresentada na Figura 14.

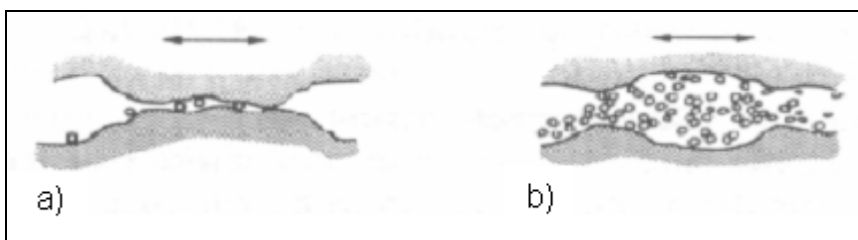


Figura 14 – Desgaste corrosivo. a) início de reação química entre as superfícies; b) desgaste das superfícies pelo mecanismo de corrosão. Adaptado de Buschan e Gupta, 1997.

3.6 Modelagem de Desgaste

Na equação do desgaste desenvolvida por Archard e abordada por Hutchings (1992), o desgaste dos materiais pode ser determinado através de uma análise simples do desgaste que ocorre entre duas superfícies. Ele relaciona a carga normal aplicada no sistema W (N), a distância de deslizamento Q (m) e as propriedades dos materiais envolvidos como a dureza do material mais dúctil H e o coeficiente de desgaste adimensional, K .

O modelo simplificado de Archard, o qual define o volume desgastado pela distância de deslizamento é expresso pela Equação 5:

$$Q = K \frac{W}{H} \quad (5)$$

O coeficiente de desgaste dimensional Kd , é mais empregado em aplicações de engenharia e comparara a severidade dos processos de desgaste existente em diferentes sistemas. O coeficiente de desgaste adimensional equivale a K/H e representa o agrupamento de K (coeficiente de desgaste adimensional) com H (dureza). O valor obtido é o volume de material que foi removido (m^3) pelo desgaste Kd , equivalendo à distância de deslizamento Q (m), por unidade de carga normal W (N) (HUTCHINGS, 1992). Portanto, a Equação 6, que define o coeficiente de desgaste dimensional, pode ser expressa por:

$$Kd = \frac{Q}{W} \quad (6)$$

3.7 Atrito dos Materiais Poliméricos

O atrito encontrado em materiais poliméricos, quando estes sofrem a ação de um contra corpo rígido deslizando sobre a sua superfície, pode ser conferido segundo dois principais mecanismos: a adesão, que ocorre na zona interfacial e a

deformação que ocorre na zona coesiva (HUTCHINGS, 1992). A Figura 15 ilustra os mecanismos de adesão e deformação e as respectivas regiões onde elas ocorrem:

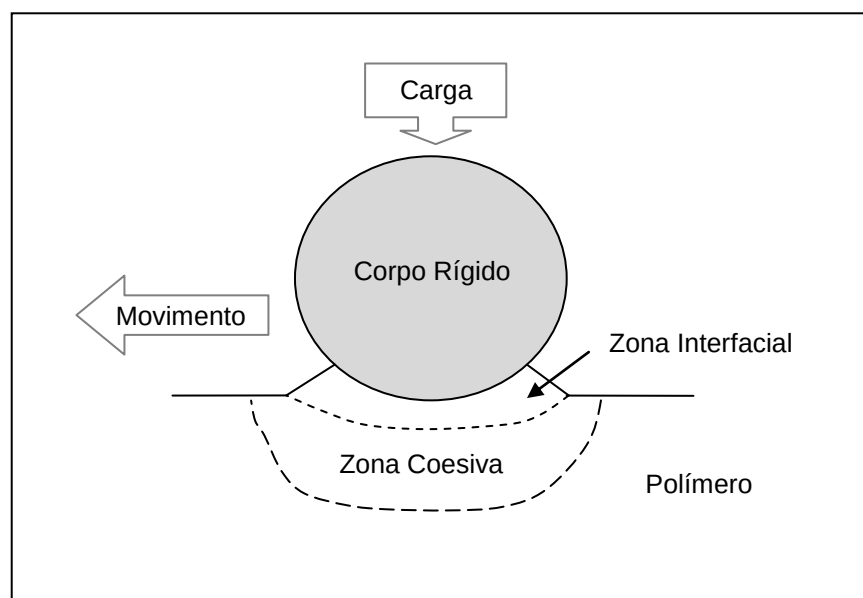


Figura 15 – Zonas onde ocorrem os mecanismos de atrito. Adaptado de Briscoe, 1981.

Quando ocorre uma interação entre um corpo metálico e um polimérico sobre o movimento de deslizamento, o comportamento do atrito é determinado pelas propriedades do corpo polimérico. Isto ocorre devido ao corpo metálico apresentar maior dureza e módulo de elasticidade (RODRIGUES, 2007).

Segundo Hutchings (1992), o coeficiente de atrito de um material polimérico deslizando em contato contra um material metálico encontra-se na faixa de 0,1 a 0,5. Contatos entre metais e polímeros são geralmente contatos elásticos. O índice de plasticidade (Ψ) na região de contato é representado pela relação entre o módulo de elasticidade (E) e a dureza do material (H), conforme descrito no capítulo 3.4.

Para materiais poliméricos o índice de plasticidade fica na ordem de 10 e o dos metais na ordem de 100 ou mais. Ou seja, o índice de plasticidade, para um

mesmo padrão de rugosidade, assume valores da ordem de um décimo do valor de metais, o que representa um contato predominantemente elástico, exceto quando existir rugosidade muito alta (HUTCHINGS, 1992).

3.7.1 Adesão

Segundo Stachowiak e Batchelor (1996), grande parte dos materiais poliméricos adere a outros tipos de materiais através das suas forças intermoleculares. Na maioria das circunstâncias de atrito, o mecanismo de adesão não é forte o suficiente para arrancar pedaços do material através da ruptura por contato.

Uma forte adesão baseada na interação química entre um corpo polimérico e um corpo metálico constitui a base do mecanismo de desgaste do polímero sobre o metal. Quando as ligações interfaciais são mais fortes do que as forças coesivas do material mais fraco, ocorre a fratura e transferência deste material. Porém, sob determinadas condições, alguns elementos do material metálico, também podem ser transferidos para a superfície do material polimérico (MYSHKIN, *et al*, 2005).

Segundo Hutchings (1992), quando uma superfície polimérica polida desliza sobre uma superfície metálica, também polida, a força de atrito origina-se do mecanismo de adesão. A adesão entre estas superfícies ocorre na zona interfacial, onde o contato predominante é o contato elástico. A adesão origina-se de forças de ligação fracas, assim como, a de Van der Waals ou as pontes de hidrogênio. Geralmente o mecanismo de adesão ocorre devido ao cisalhamento das junções e

pode ser caracterizado pela deposição do material do corpo polimérico no contra corpo metálico.

3.7.2 Deformação

O atrito causado pelo mecanismo de deformação pode ser observado na zona coesiva do corpo polimérico onde ocorre a dissipação de energia na região em volta da área de contato, ocasionando uma indentação, quando o contato for estático, ou um sulco (trilha), quando houver um deslizamento. O mecanismo de deformação sofre forte influência da rugosidade. (STOETERAU, 2004).

Czichos (1983) estudou como a rugosidade do contra corpo metálico pode influenciar e alterar o mecanismo de deformação de um corpo polimérico durante um movimento de deslizamento. Ele constatou que inicialmente o atrito dos termoplásticos em estudo, diminuiu com o aumento da rugosidade média (R_z) do corpo ou contra corpo, porém para rugosidades mais altas o atrito aumentou. Ele explica que para menores valores de rugosidade do corpo polimérico, o processo de adesão prevalece, enquanto que para superfícies com uma rugosidade maior, o processo de abrasão predomina. Foi observado um decréscimo no coeficiente de atrito até a rugosidade média (R_z) $0,4 \mu\text{m}$, sendo que acima deste valor foi constatado atrito por abrasão (mecanismo de deformação). O mesmo comportamento foi observado com o aumento da rugosidade superficial do contra corpo, onde para rugosidades acima de $0,8 \mu\text{m}$ e $1,0 \mu\text{m}$ foi constatado desgaste abrasivo.

3.8 Desgaste dos Materiais Poliméricos

O atrito e o desgaste de polímeros são extremamente complexos e dependem das propriedades dos materiais e do tipo da aplicação. Embora o atrito e o desgaste de materiais não metálicos exibam aspectos fundamentais semelhantes aos dos materiais metálicos, existem também diferenças significativas no nível em que o atrito e o desgaste ocorrem, assim como nos mecanismos de desgaste envolvidos. Essas diferenças podem ser investigadas para a produção de novos materiais, aperfeiçoando o desempenho tribológico do sistema (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

A maioria dos materiais poliméricos não é indicada para ser utilizada em aplicações que requeiram resistência ao desgaste e, de fato, esses materiais são, geralmente, inadequados para estas aplicações. Algumas classes de polímeros, no entanto, têm excelentes propriedades tribológicas e diversos estudos são realizados com estas classes relativamente limitadas (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

Alguns dos polímeros que apresentam maior potencial tribológico, devido às suas características são: Poli (tetrafluor-etileno) ou (PTFE), poliamidas (PA), poli (amida-imidas) ou (PAI), poli (óxido de metileno) ou poliacetal (POM), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), poliuretanos (PU), poli imidas (PI), resinas fenólicas e resinas epóxi.

Segundo Briscoe (1981), os materiais poliméricos podem apresentar dois principais tipos de desgaste: o desgaste do tipo coesivo, que envolve os mecanismos de abrasão e fadiga superficial e o desgaste do tipo interfacial, que envolve o mecanismo de adesão e de reação triboquímica.

Conforme Lancaster (1969), o processo de desgaste de polímeros pode ser afetado pelas suas propriedades mecânicas e pela topografia do contracorpo. O mecanismo de corte (*cutting*) é observado em polímeros mais rígidos e a fadiga, em polímeros mais elásticos. Durante ciclos de deslizamento, uma modificação na superfície do contracorpo, pode influenciar o processo de desgaste, tanto pela transferência de material, como por acentuar o desgaste. Neste contexto, as fibras de reforço e as cargas incorporadas em um polímero, desempenham um papel importante.

Menezes (2011) observou a relação entre a textura superficial e as propriedades de atrito e comportamento ao desgaste do polipropileno em contato com o aço. Ele constatou que durante o contato do metal com o polímero sob movimento de deslizamento, a textura superficial do material polimérico influenciou menos o atrito do que a do material metálico.

Nos ensaios de desgaste realizados com corpos poliméricos, o mecanismo de desgaste predominante depende fortemente dos movimentos realizados pelas partículas na área de contato, do movimento rolante, da natureza da partícula abrasiva e dos materiais do contra corpo e da amostra (REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998).

De acordo com Anderson (1982), parâmetros como temperatura, pressão e velocidade de deslizamento podem influenciar a taxa de desgaste. Outros fatores também podem influenciar a taxa de desgaste assim como o tipo da carga e do movimento e a rugosidade do contra corpo.

O mecanismo de desgaste em qualquer polímero é fortemente influenciado pela condição superficial da contra face, ou seja, pela sua rugosidade, dureza e energia superficial. A energia superficial destina-se a definir a diferença entre duas

superfícies de dureza e rugosidade semelhantes. Esta propriedade pode ser definida como o potencial químico do material (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1996).

3.8.1 Desgaste adesivo

Uma das particularidades do desgaste adesivo é o mecanismo de transferência de material, que se origina do crescimento das junções de atrito e sua posterior fratura, resultando no cisalhamento das junções (MYSHKIN *et al*, 2005).

O mecanismo de transferência de material em um tribossistema envolvendo um corpo polimérico e um metálico pode ocorrer das seguintes maneiras: pela formação de um filme polimérico na superfície do corpo metálico, pela fusão do material polimérico, por meio de transferência lamelar e por transferência de fragmentos (SILVA, 2003).

A formação do filme polimérico ocorre quando as asperezas do corpo metálico cisalham e removem uma fração de material da superfície do corpo polimérico. O material removido adere na superfície metálica, formando um filme com espessura homogênea que permanece aderido a esta superfície durante vários ciclos de deslizamento (SILVA, 2003).

A transferência de material por fusão origina-se quando a temperatura na interface das superfícies que estão em contato deslizante, ultrapassa os valores da temperatura de transição vítrea do corpo polimérico (SILVA, 2003).

O mecanismo de transferência lamelar está presente somente quando o corpo polimérico é constituído de polímeros com perfil molecular plano ou liso (SILVA, 2003).

Quando ocorre a transferência de material polimérico através do mecanismo de transferência de fragmentos, o filme formado apresenta espessura irregular. Neste caso um fragmento de material polimérico é transferido para o corpo metálico sem que haja rompimento significativo das cadeias poliméricas e nem degradação química. Os fragmentos poliméricos não aderem completamente ao corpo metálico e permanecem em sua superfície por apenas alguns ciclos e são removidos pelo próprio movimento de deslizamento (RODRIGUES, 2007).

3.8.2 Desgaste abrasivo

Gahr (1987) cita que as principais características do desgaste abrasivo são o sulcamento e a penetração de asperezas ou partículas de elevada dureza na superfície. Ou seja, podem ocorrer dois mecanismos distintos de deformação quando as partículas ou asperezas entram em contato com o corpo polimérico: corte ou *cutting*, onde há remoção de material em forma de microlascas e sulco ou entalhe plástico, onde não há remoção de material da superfície.

Segundo Yousif e Tayeb (2010), o mecanismo de desgaste abrasivo surge quando um corpo sólido sofre carregamento e desliza contra partículas de outro corpo com dureza semelhante ou mais elevada. Este tipo de mecanismo pode aparecer de três principais formas: em forma de micro cortes, sulcamento ou

lascamento. Alguns dos principais fatores que controlam o grau de desgaste abrasivo são: as condições da aplicação, as características do material e suas propriedades abrasivas.

3.9 Parâmetros que Influenciam o Atrito e o Desgaste de Polímeros

O coeficiente de atrito em materiais poliméricos é diferente do de materiais metálicos, e esta diferença é explicada pelo comportamento viscoelástico dos polímeros. Suas características de deformação, assim como suas propriedades relacionadas ao atrito, são dependentes da carga aplicada, da temperatura e da velocidade de deslizamento (ASM HANDBOOK,1992).

Hutchings (1992), cita a dependência das características mecânicas dos polímeros com o tempo, como um outro fator que influencia o atrito em polímeros e que também ocorre devido a sua viscoelasticidade.

Em um sistema tribológico, os materiais poliméricos apresentam melhor performance quando deslizam em contato com contra corpos metálicos do que quando deslizam em contato com contra corpos poliméricos, justamente por conta dessa viscoelasticidade. Um fator que influencia fortemente a tribologia de polímeros em contato com metais é a formação e posterior transferência de um filme polimérico para o corpo metálico mais duro, como abordado no item 3.8.1 (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1996).

O coeficiente de atrito para materiais poliméricos pode variar de acordo com a temperatura, a carga aplicada e a velocidade de deslizamento, assim como para

materiais metálicos. A influência destes fatores é mais acentuada para os polímeros, devido à sua estrutura e comportamento viscoelástico (REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998).

3.10 Característica dos Materiais em Estudo

A seleção das matérias-primas foi feita de acordo com um estudo realizado dentre os materiais poliméricos presentes no mercado e que apresentam as melhores propriedades frente ao desgaste e ao coeficiente de atrito. Porém, estudos realizados sobre as interações e a composição destas matérias-primas e seu efeito no coeficiente de atrito e desgaste, são raramente encontrados (RODRIGUES, 2007).

Segundo Bekhet (1999), existe uma grande dificuldade em se obter informações sobre a taxa de desgaste para materiais poliméricos, pois existe mais do que uma variável que pode influenciar o seu comportamento frente ao desgaste. Algumas destas variáveis são a natureza complicada dos mecanismos de atrito e desgaste e a geração de calor no ponto de contato entre as superfícies.

As matérias-primas empregadas na composição de materiais resistentes ao atrito e desgaste são: cargas (abrasivos, lubrificantes, modificadores de atrito e cargas de enchimento), fibras de reforço e matriz polimérica (RODRIGUES, 2007).

Para este trabalho foram selecionados os seguintes compósitos para serem utilizados como corpos-de-prova, enquanto o aço SAE52100 (100Cr6) foi utilizado na confecção dos contra corpos:

- Poli (amida-imida) com grafite e PTFE;
- Poli (amida-imida) com fibra de carbono e PTFE;
- Poli (éter éter cetona) com fibra de carbono e PTFE;
- Poli (aril éter cetona) com fibra de carbono;
- Resina Fenólica com fibra de vidro e carga mineral.

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas dos compósitos em estudo, segundo informações obtidas nos catálogos dos fornecedores.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos compósitos em estudo, segundo informações obtidas nos catálogos dos fornecedores.

Propriedades	PAEK+FC	PAI+FC+PTFE	RF+FV+CM	PAI+G+PTFE	PEEK+FC+PTFE
Módulo de elasticidade (MPa)	17200	18600	28000	8830	15000
Tensão de ruptura (MPa)	181	114	85	117	180
Alongamento na ruptura (%)	2,2	0,8	0,4	2,6	1,8
Módulo de flexão (MPa)	15200	12400	24000	7310	14500
Tensão de flexão	276	154	180	208	270

3.10.1 Matrizes poliméricas

As principais funções da matriz polimérica são: unir as fibras, atuar como meio de propagação e distribuição da tensão aplicada nas fibras, preservar as fibras dos danos que podem ser causados na superfície em por meio do mecanismo de abrasão ou através de reações químicas com o ambiente e separar as fibras, prevenindo a propagação de trincas de uma fibra para a outra (CALLISTER, 2008).

3.10.1.1 Poli (amida-imida)

A resina poli imida começou a ser comercializada devido a seu excelente desempenho em altas temperaturas. As poli imidas apresentam uma ótima estabilidade dimensional e térmica, resistência química, tenacidade e resistência à oxidação. Além destas propriedades, apresentam também, uma ótima resistência ao desgaste (RODRIGUES, 2007).

A poli (amida imida) foi elaborada a partir da poli imida para suprir as necessidades de alta resistência térmica em aplicações aeroespaciais. Altas proporções de carga podem ser incorporadas a PAI, sem causar perda de suas propriedades (RODRIGUES, 2007).

A PAI é um polímero termoplástico e amorfo. O grupo amida garante a alongação e a flexibilidade, enquanto o grupo aromático em combinação com o grupo imida garante a estabilidade térmica deste material em altas temperaturas. A

excelente estabilidade dimensional é atribuída a sua estrutura amorfa e também por apresentar temperatura de transição vítrea de aproximadamente 275°C, maior do que a temperatura de utilização convencional. A sua estrutura química pode ser observada na Figura 16.

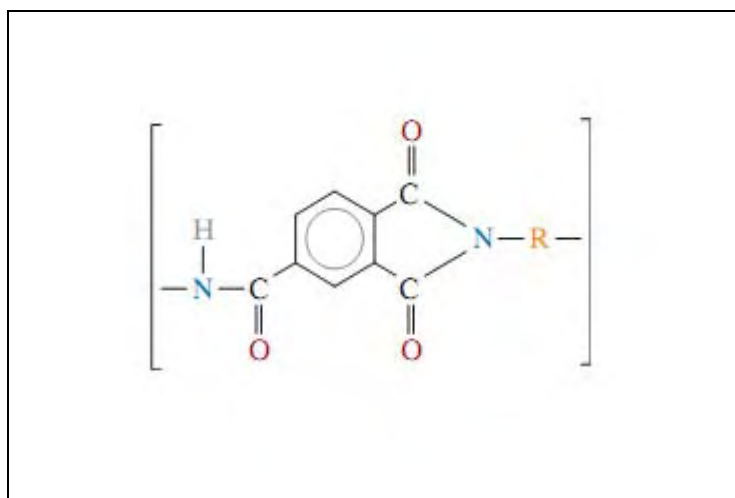


Figura 16 - Estrutura da unidade repetida para a poli (amida-imida) – PAI. Adaptado de Callister, 2008.

Poli (amida-imida) com grafite e PTFE

Este compósito pertence a uma classe que apresenta excelente resistência ao desgaste e excelentes propriedades mecânicas, bem como alto módulo de resistência à tração, baixo coeficiente de fricção e excepcional resistência ao desgaste tanto em condições de altas velocidades, quanto em condições de elevada pressão (TORLON, 2012).

Este material é composto por PAI com de grafite e PTFE (lubrificante). É um polímero alto lubrificante utilizado em aplicações onde resistência mecânica a altas

temperaturas (200°C) e resistência ao desgaste são de extrema importância (WIEBECK & HARADA, 2005).

Este compósito possui a maior resistência e rigidez dentre todos os termoplásticos até 275° C. Tem excelente resistência ao desgaste, às deformações e a agentes químicos (TORLON, 2012).

São aplicados na fabricação de alguns produtos que requerem elevada resistência à altas temperaturas e resistência ao desgaste, assim como: anéis de encosto, assento de válvulas, engrenagens, buchas, rolamentos, anéis de desgaste, entre outros (TORLON, 2012).

Poli (amida-imida) com fibra de carbono e PTFE

Este material apresenta, assim como o descrito anteriormente, excelente resistência ao desgaste e excelentes propriedades mecânicas, além do alto módulo de resistência a tração e baixo coeficiente de fricção até 275° C (TORLON, 2012).

Também é um compósito auto lubrificante empregado em situações que requeiram elevada resistência ao desgaste e lubrificação, além de elevadas propriedades mecânicas (dureza) (TORLON, 2012).

São utilizados na fabricação de alguns produtos, como: anéis de encosto, anéis de vedação, palhetas deslizantes, bobinas, buchas, cilindros de embreagem e pistões (TORLON, 2012).

3.10.1.2 Poli (éter éter cetona)

O PEEK foi sintetizado pela primeira vez em 1977 pela ICI. Em 1983 O PEEK foi lançado como um novo material de engenharia pelas empresas Bayer e ICI (WIEBECK & HARADA, 2005).

O PEEK faz parte do grupo das policetonas, resinas termoplásticas, assim como a poliétercetona (PEK). É um polímero de estrutura cristalina, apresenta alta resistência à temperatura, na faixa de 240° C. Possui um custo elevado, mas este pode ser justificado em muitas aplicações na indústria de eletrônicos, aeroespacial e em instalações de redes elétricas (WIEBECK & HARADA, 2005).

As poliacetonas em geral, possuem um elevado limite operacional em altas temperaturas, acima de 260° C, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência ao desgaste, à fadiga e a fricção e excelente resistência química. As resinas podem ser naturais, com fibras de vidro, de carbono ou possuir cargas minerais. Este tipo de material é apropriado para aplicações que sofrem alta tensão de contato (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996). A Figura 17 apresenta a estrutura de uma molécula de PEEK.

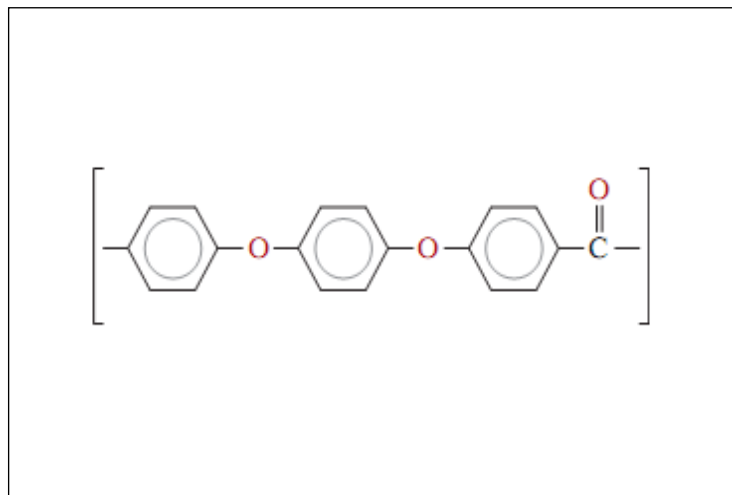


Figura 17 - Estrutura da unidade repetida para a Poli (éter éter cetona). Adaptado de Callister, 2008.

Poli (éter éter cetona) com fibra de carbono e PTFE

Este compósito apresenta excelentes propriedades tribológicas, ótima resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e de expansão térmica e boa resistência química em ambientes agressivos. É empregado na fabricação de produtos para aplicações tribológicas que requerem elevada resistência em geometrias com seções finas ou longas (VICTREX, 2009).

3.10.1.3 Poli (aril éter cetona)

O PEAK reforçado com fibra de carbono oferece melhor estabilidade dimensional e resistência a deformações que o PEEK reforçado com a mesma quantidade de fibra de carbono. Apresenta alta rigidez e elevada resistência mecânica. Além disso, essa resina possui os atributos das fibras de carbono

incluindo resistência química, resistência à fadiga e longo prazo de estabilidade oxidativa térmica (AVASPIRE, 2010).

Suas excelentes propriedades fazem com que este tipo de polímero seja empregado em diversos ramos industriais, como indústrias de transporte, de assistência médica, eletrônica e de processamento químico (AVASPIRE, 2010). A Figura 18 apresenta a estrutura de uma molécula de PAEK.

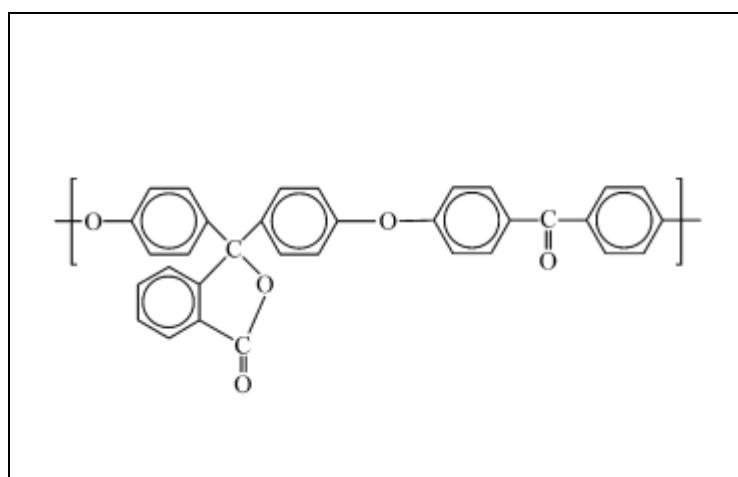


Figura 18 - Estrutura da unidade repetida para a PAEK. Adaptado de Qunfeng *et al*, 2009.

3.10.1.4 Resina Fenólica

O compósito polimérico termofixo estudado consiste de uma resina fenólica preenchida com carga mineral e fibra de vidro. As resinas fenólicas são utilizadas como agentes ligantes em materiais compósitos. A Figura 19 mostra a unidade de repetição de uma resina de *fenol-formaldeído*. São líquidas à temperatura ambiente e, após processadas no formato da peça são submetidas à cura, ou seja, formação

de ligações covalentes trifuncionais entre as cadeias poliméricas, adquirindo consistência de sólido.

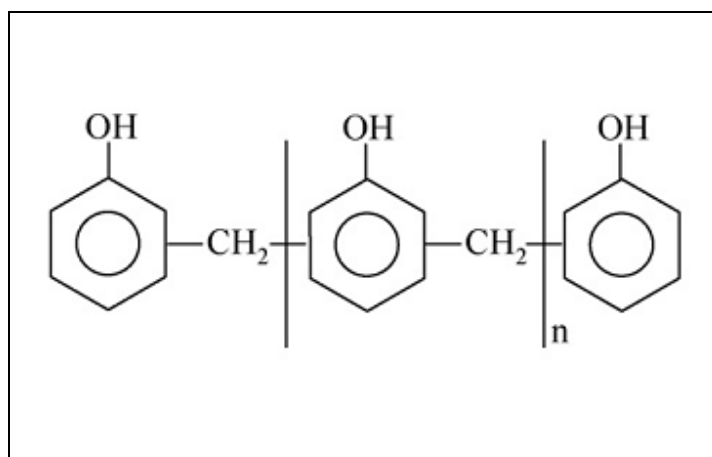


Figura 19 - Estrutura da unidade repetitiva para a resina fenólica - *fenol-formaldeído*. Adaptado de Hong *et al*, 2009.

3.10.2 Demais materiais utilizados na pesquisa

A seguir será feita a apresentação de outros materiais utilizados no presente trabalho, para a elaboração dos compósitos poliméricos.

3.10.2.1 Fibra de vidro

Os estudos sobre a utilização de fibras de vidro como reforço para resinas poliméricas teve início no século XIX. Porém só começaram a ser comercializadas a

partir de 1939, como reforço de compósitos e na fabricação de produtos isolantes térmicos (WIEBECK & HARADA, 2005).

Atualmente as fibras de vidro são os reforços mais empregados na formação de compósitos de matriz polimérica, por apresentarem além do baixo custo, excelentes propriedades em diversas aplicações. As principais vantagens dos materiais compósitos com fibra de vidro são: boa resistência ao impacto, flexibilidade de conformação e manutenção, baixo coeficiente de dilatação térmica e alta resistência à tração (WIEBECK & HARADA, 2005).

3.10.2.2 Fibra de Carbono

Esta classe de fibras é a que apresenta simultaneamente as melhores características de rigidez (módulo de elasticidade), resistência mecânica e baixa densidade, porém possui os menores alongamentos e custos superiores aos da fibra de vidro (WIEBECK & HARADA, 2005).

A designação fibra de carbono engloba geralmente uma gama de elementos filamentosos que tem em sua composição mais de 90 % de carbono. Estas fibras foram os primeiros tipos de reforços empregados na elaboração de compósitos, para elevar a dureza, o módulo de elasticidade e a resistência de materiais utilizados na fabricação de aeronaves e em aplicações industriais (WIEBECK & HARADA, 2005).

Quando comparadas com alguns materiais de engenharia, as fibras de carbono apresentam elevado módulo de resistência. Por esta razão, quando uma

determinada aplicação requer altas propriedades mecânicas em condições críticas e com cargas elevadas, o emprego deste tipo de material predomina.

3.10.3 Aditivos

3.10.3.1 PTFE (politetrafluoretileno)

O PTFE é um polímero que pode ser empregado como um aditivo, visando melhorar as propriedades lubrificantes de materiais poliméricos termoplásticos em casos onde a condutividade elétrica não é desejável. Geralmente, o PTFE é adicionado após a granulação do material e localiza-se na camada superficial, reduzindo o coeficiente de atrito (WIEBECK & HARADA, 2005).

O politetrafluoroetileno pode fornecer um coeficiente de atrito baixo mesmo na ausência completa de qualquer lubrificante. (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996). A Figura 20 apresenta a estrutura da molécula do PTFE.

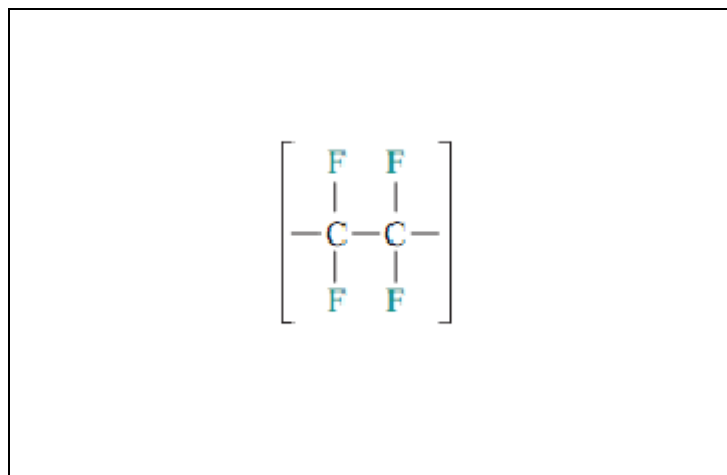


Figura 20 - Estrutura da unidade repetida para o Politetrafluoretileno. Adaptado de Callister, 2008.

Segundo Unal *et al* (2004), o PTFE apesar de possuir baixo coeficiente de atrito, apresenta também baixa resistência ao desgaste e abrasão. Geralmente estas propriedades podem ser melhoradas com a incorporação de grafite (lubrificante sólido) e fibras de vidro, carbono e aramida.

3.10.3.2 Grafite

O elemento grafite é formado por átomos de carbono, apresentando coloração preta ou cinza escuro. É um elemento de estrutura lamelar de placas que deslizam umas sobre as outras. Pode ser utilizado como lubrificante sólido, reduzindo o atrito entre superfícies em contato. Quanto maior o teor de carbono, melhor a lubricidade e resistência à oxidação (WIEBECK & HARADA, 2005).

O grafite é um agente modificador empregado também como aditivo visando melhorar as propriedades lubrificantes dos materiais poliméricos termoplásticos. Ele pode ser acrescentado à massa, ou após a granulação do material. No segundo

caso, ele possui ação prolongada proporcionando uma redução no coeficiente de atrito (WIEBECK & HARADA, 2005).

O grafite melhora a propriedade elétrica do termoplástico, aumentando sua condutividade. Ainda melhora tanto a lubrificação do material em trabalhos a seco, quanto à estabilidade dimensional e também reduz o teor de água absorvido. É muito utilizado em aplicações onde se tem materiais movimentando-se em contato constante, como em rolamentos, roldanas, mancais, engrenagens e buchas (WIEBECK & HARADA, 2005).

3.10.4 Aço SAE 52100 (100 Cr6)

Segundo Chiaverini (1986), o aço é uma liga composta, principalmente com os elementos químicos ferro e carbono com a proporção de carbono variando de aproximadamente 0,008% até 2,11%. Além disso, pode ocorrer a presença de outros elementos químicos residuais, provenientes da sua fabricação.

A norma ISO 863-17 (1999), engloba as características dos aços utilizados na fabricação de rolamentos de esfera e de rolos, a sua microestrutura, dureza e composição química, além das condições do produto (qualidade da superfície, forma, dimensões e tolerâncias).

O aço utilizado na fabricação das esferas foi o aço SAE52100 (100 Cr6), classificado como aço liga com alto teor de carbono, 1% aproximadamente, com teor de cromo de variando entre 1,30 e 1,60%. Este aço é amplamente empregado nas

indústrias, por apresentar excelentes propriedades mecânicas, além de elevada dureza, devido ao alto teor de carbono (CHIAVERINI, 1986).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização dos Compósitos Poliméricos

Os compósitos poliméricos foram caracterizados através de medições de dureza Shore D e densidade e por meio das análises térmicas de Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

4.1.2 Ensaio de dureza Shore D

Para a caracterização da dureza dos compósitos poliméricos, utilizou-se o ensaio de dureza tipo Shore D. Os ensaios de dureza foram realizados de acordo com a norma ASTM D 2240 (2005). Neste ensaio, uma agulha normalizada é pressionada com tensão pré-definida contra a amostra. O tempo de exposição ao penetrador é de 15 segundos. Foi utilizado um Durômetro Digital, da marca Zwick, previamente calibrado, que se encontra no Laboratório de Polímeros da Schaeffler. Foram realizadas dez medições de dureza em cada um dos compósitos termoplásticos e no termofixo (resina fenólica).

As medições de dureza foram realizadas para efeito comparativo entre os compósitos poliméricos termoplásticos e o termofixo (resina fenólica).

A norma ASTM D 2240 (2005) define uma escala para cada classe de medição que varia entre 0 e 100 Shore D. Neste contexto, todos os compósitos

poliméricos analisados apresentaram elevados valores de dureza para esta classe de medição. Recomenda-se que, para valores encontrados abaixo de 20 ou acima de 90 Shore D, uma classe de medição inferior ou superior seja empregada. Porém, para padronizar os valores de dureza, foi utilizada a mesma classe de medição para todos os compósitos.

4.1.3 Densidade

A norma ASTM D792 (2008) descreve os métodos dos ensaios para a determinação da densidade de plásticos sólidos. Esta norma define a densidade relativa, como sendo a razão entre a massa de um determinado volume da porção do material em uma atmosfera gasosa e submersa em água destilada ou desmineralizada. Este método relaciona a massa e o volume da espécie a ser avaliada (gravidade específica ou densidade relativa).

As massas dos corpos de prova dos compósitos foram avaliadas por meio de uma balança analítica modelo AB204, da marca Mettler Toledo, com resolução de décimo de miligrama e os valores foram calculados de acordo com a ISO 1183-1 (2004). Esta balança analítica encontra-se no Laboratório de Polímeros da Schaeffler.

Primeiramente foram obtidos os pesos das amostras no ar e, posteriormente, o peso das amostras imersas em água desmineralizada, conforme ilustrado na Figura 21.

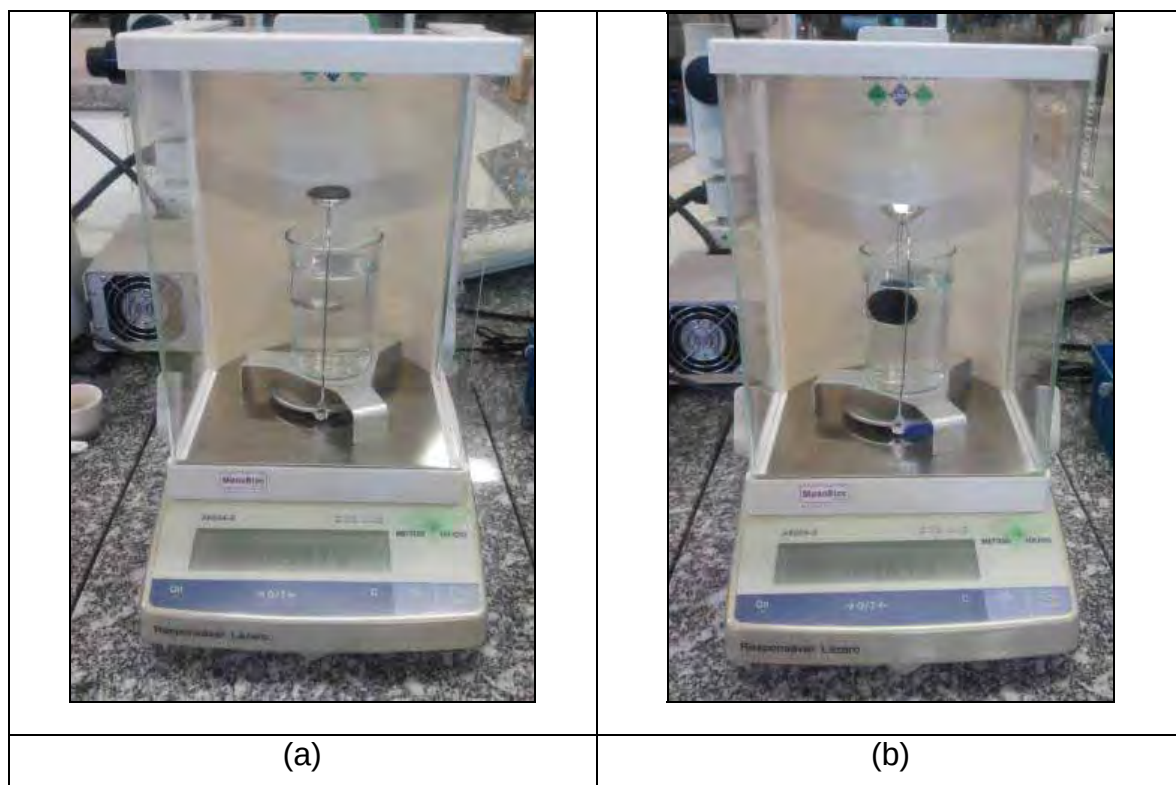


Figura 21 - a) Amostra pesada no ar; b) amostra pesada submersa em água desmineralizada.

Para obtenção dos valores de densidade relativa (g/cm^3), os resultados foram calculados por meio da Equação 7:

$$D = \frac{M_{ar}}{M_{H_2O}} * 1 \quad (7)$$

Onde D corresponde à densidade relativa em g/cm^3 , M_{ar} à massa do corpo de prova no ar em g , M_{H_2O} à massa do corpo de prova imersa em água desmineralizada e “1” corresponde à densidade relativa da água em g/cm^3 .

4.1.4 Análise termogravimétrica (TGA)

Para a realização das análises termogravimétricas (TGA), o equipamento utilizado foi o TGA NETZSCH, modelo 209, com software analisador Proteus. Este equipamento encontra-se no Laboratório de Polímeros da Schaeffler.

O princípio deste ensaio é aquecer a amostra que se encontra em uma termobalança, a qual registra as perdas de massa para cada faixa de aquecimento e as eventuais perdas por outras formas de degradação. A faixa de temperatura variou entre 20°C a 950°C, e a taxa de aquecimento utilizada foi 20°C/min. O ensaio foi realizado sob atmosfera de gás inerte N_2 e O_2 . A quantidade das amostras variou entre 20 mg e 30mg, aproximadamente.

4.1.5 Calorimetria diferencial exploratória (DSC)

Este ensaio consiste em medir a diferença de temperatura entre uma amostra e um material de referência durante a exposição destes a uma atmosfera controlada com variações rigorosamente programadas de temperatura. A amostra é colocada dentro de um cadinho e o seu aquecimento é comparado, simultaneamente, ao de um cadinho vazio.

Inicialmente é realizado um aquecimento até a fusão do material. Com a fusão do material da amostra, o seu histórico térmico prévio é destruído. Posteriormente a amostra é resfriada lentamente, permitindo a recristalização da

amostra e, em seguida a sua solidificação. Após a solidificação, é iniciado um novo ciclo de aquecimento, que permite identificar reações reversíveis e irreversíveis, sendo que este representa melhor as características do material, pois não considera o histórico térmico anterior.

Os ensaios foram realizados em um equipamento DSC NETZSCH, modelo 204, com software analisador Proteus, conforme ASTM D3418 (2008). Este equipamento encontra-se no Laboratório de Polímeros da Schaeffler.

Durante todo o ensaio a amostra é mantida sob uma atmosfera de gás inerte. Para este ensaio, a temperatura da amostra variou de 20°C a 375°C e a taxa dos aquecimentos e do resfriamento foi de 10°C/min, o ensaio foi mantido sob uma atmosfera nitrogênio.

4.2 Caracterização do Material Metálico

A seguir será feita a apresentação dos ensaios utilizados para a caracterização do aço utilizado na fabricação do contra corpo metálico (esfera).

4.2.1 Dureza

Para verificação da dureza do material metálico, utilizou-se o ensaio de dureza Rockwell escala C (HRc). Realizados de acordo com a norma EN ISO 6508-1 (2008). Foi utilizado um Durômetro da marca Wolpert Testor que se encontra no

Laboratório Metalúrgico da Schaeffler. Foram realizadas dez medidas de dureza em apenas uma das esferas.

4.2.2 Análise microestrutural

A microestrutura do aço da esfera foi observada através de análise metalográfica. O corpo metálico (esfera) foi embutido em baquelite, cortado, lixado e polido. Em seguida, a superfície preparada foi analisada com o auxílio de um microscópio óptico da Marca Leitz, modelo Laborlux. Para isso foi feito um ataque químico com Nital e utilizada uma ampliação de 1000 vezes. Este microscópio encontra-se no Laboratório Metalúrgico da Schaeffler.

4.2.3 Composição química

A composição química do aço foi obtida através da técnica de espectrometria de emissão óptica. Esta técnica é utilizada para determinar a composição química das espécies presentes em uma amostra, através do comprimento de onda ou da frequência da radiação emitida por cada elemento. Cada espécie tem uma frequência diferente que varia de acordo com os seus níveis de energia. Para tanto, foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica da marca Thermo Scientific, modelo ARL 3460 que se encontra no Laboratório Metalúrgico da Schaeffler.

4.3 Elaboração das Amostras

O Quadro 1 apresenta as condições de recebimento da matéria-prima empregada na confecção dos corpos de prova e suas dimensões finais, após serem usinadas, respeitando as dimensões do porta-amostra do dispositivo do ensaio de desgaste.

Quadro 1 – Forma de recebimento e dimensões finais dos corpos de prova.

Quadro 1 – Forma de recebimento e dimensões finais dos corpos de prova.			
Corpo de Prova	Recebimento	Processo	Dimensões Finais
<i>Poli (amida-imida) com grafite e PTFE.</i>	Disco com diâmetro de 130 mm e espessura de 15 mm.	Torneamento.	Disco com diâmetro de 30 mm e espessura de 4 mm.
<i>Poli (amida-imida) com fibra de carbono e PTFE.</i>			
<i>Poli (éter éter cetona) com fibra de carbono e PTFE.</i>	Barra com diâmetro de 51 mm.		
<i>Poli (aril éter cetona) com fibra de carbono.</i>			
<i>Resina fenólica com fibra de vidro e carga mineral.</i>	Barra com diâmetro de 30 mm.		

Contra corpo: Aço SAE52100 (100Cr6);

As esferas de aço utilizadas como contra corpo, foram fornecidas com 1” (25,4mm) de diâmetro e dureza superficial de 63 ± 3 HRc. Conforme informado anteriormente, a matéria-prima empregada na confecção das esferas foi o aço SAE52100 (100Cr6).

4.4 Acabamento Superficial

O processo de lixamento foi realizado para padronizar a superfície dos corpos de prova poliméricos. Todo o processo foi realizado sob-refrigeração com água em uma lixadeira metalográfica elétrica rotativa. A velocidade foi mantida constante em 400 rpm e cada amostra foi lixada, por 25 segundos, aproximadamente para cada granulometria. Foram utilizadas lixas com as seguintes granulometrias: # 120, # 240, # 320, # 400, # 500 e #600, respectivamente. As lixas foram trocadas para cada amostra e a cada troca de granulometria, durante o lixamento, as amostras foram rotacionadas em 90°.

4.5 Medição da Rugosidade

Após o acabamento superficial dos corpos de prova, para verificar a padronização das superfícies e as faixas de rugosidade média e a de profundidade encontradas, as amostras foram higienizadas com álcool etílico e avaliadas através de um rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo FORM TALYSURF SERIES i120. O cut off, ou comprimento da amostragem (λ_c) utilizado foi o de 0,8 mm e o trecho de medição unitário foi de 5 mm.

Para a medição da rugosidade média e de profundidade dos contra corpos metálicos (esfera) foi utilizado o mesmo rugosímetro, porém no caso de corpos esféricos, utiliza-se um aparato para a fixação da esfera.

4.6 Ensaio Tribológico

O ensaio tribológico de esfera sobre placa reproduz uma cratera de desgaste por meio de uma geometria imposta. Neste método, uma esfera de raio “ R ” gira contra uma amostra, com ou sem a presença de partículas abrasivas. A cratera de desgaste reproduz a geometria da esfera, com isso, pode-se calcular o volume desgastado através do diâmetro ou da profundidade da cratera (TREZONA & HUTCHINGS, 1999; GEE, *et al* , 2003).

O ensaio de esfera sobre placa, também conhecido como teste de microabrasão ou caloteste, consiste em promover o contato entre um corpo plano (amostra) e um contra corpo (esfera). O movimento de rotação da esfera em relação

à amostra possibilita a utilização de cargas elevadas e consequentemente altas tensões (GANT & GEE; 2011).

Segundo *Gee et al* (2003), o ensaio microabrasivo de esfera sobre placa tem sido amplamente empregado como método para se avaliar a abrasão de materiais de engenharia. Algumas de suas vantagens comparadas com os ensaios convencionais são: versatilidade e facilidade de utilização, baixo custo de elaboração e manutenção dos equipamentos de teste e a possibilidade de se ensaiar pequenos volumes de material e camadas finas de revestimentos.

Para a realização do ensaio tribológico caloteste, um dispositivo foi especialmente desenvolvido para que uma esfera de aço (contra corpo) gire com rotação e carga constante contra uma amostra (placa) confeccionada com a matéria-prima a ser analisada. Este dispositivo pertencente ao Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos. O mecanismo de funcionamento da máquina é demonstrado na Figura 22 e a fotografia do sistema na Figura 23.

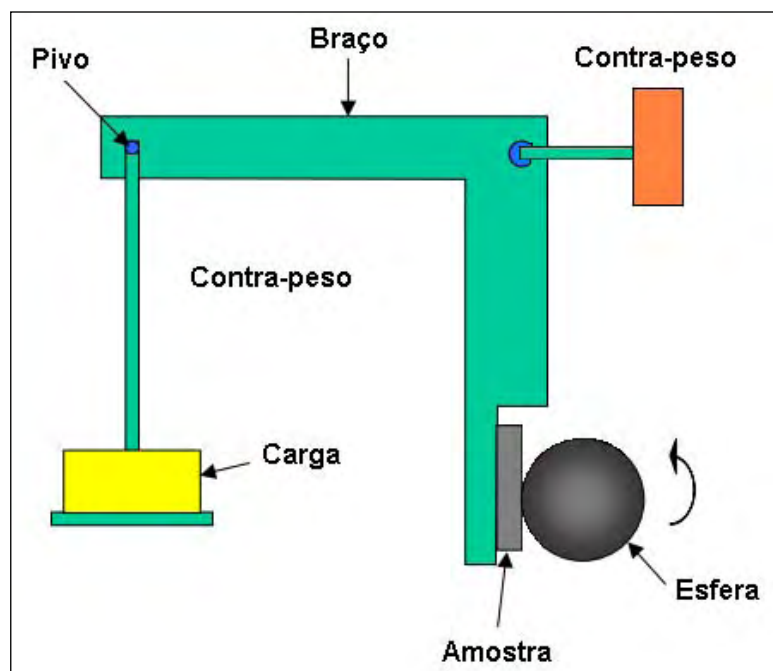


Figura 22– Esquema de funcionamento do ensaio tribológico esfera sobre placa. Adaptado de Gant & Gee, 2011.



Figura 23 – Foto do equipamento utilizado para realização do ensaio tribológico esfera sobre placa.

Os ensaios de desgaste através do método esfera sobre placa foram configurados com a finalidade de se representar de maneira acelerada os danos superficiais ocasionados pelo contato metal-polímero. Neste ensaio uma esfera metálica foi utilizada como contra corpo, deslizando sobre os corpos dos seguintes materiais poliméricos: a) *Poli (amida-imida)* com PTFE e grafite; b) *Poli (amida-imida)* com fibra de carbono e PTFE; c) *Poli (éter éter cetona)* com carbono e PTFE; d) *Poli (aril éter cetona)* com fibra de carbono; e) Resina Fenólica com fibra de vidro e carga mineral.

A velocidade dos ensaios foi mantida constante em 300 rpm, as cargas aplicadas foram de: 6,65 N, 13,49 N e 18,26 N, e o tempos de ensaio foram de 5, 10, 15 e 20 minutos para cada carga, que correspondem, respectivamente, às distâncias de deslizamento de aproximadamente: 125m, 250m, 375m e 500m. Na Figura 25 está ilustrado o mecanismo do ensaio, onde uma esfera de aço gira em pressão e rotação constante contra a amostra que se quer avaliar.



Figura 24 – Esfera (contra corpo) em contato com a amostra do compósito polimérico (corpo de prova).

Para esta pesquisa ensaiou-se o par tribológico sem lubrificante, para avaliar o comportamento ao desgaste dos materiais. Alguns dos polímeros estudados apresentam cargas ou aditivos que os tornam auto lubrificantes. A adição de agentes lubrificantes ocasiona uma redução na interação entre as superfícies, ou seja, no módulo de adesividade entre as superfícies (HUTCHINGS, 1992). O mecanismo de desgaste predominante no teste depende da natureza das partículas na área de contato e pode sofrer influência do tipo de movimento, do tipo e das condições (rugosidade) do material da esfera e do material da amostra.

Todas as amostras, assim como todo o sistema foram higienizados, a cada parada do ensaio com álcool etílico. As esferas foram trocadas a cada bateria de testes (5, 10, 15 e 20 min.), para cada tipo de material e para cada carga aplicada. Ao todo foram realizados 120 ensaios, ou seja, cada ensaio foi repetido duas vezes e foram utilizadas no total, 30 esferas.

Os pares tribológicos testados estão listados no Quadro 2, tendo sido utilizadas esferas de aço SAE52100 (100Cr6) e placas de compósitos. As esferas possuíam diâmetro de 1" (25,4 mm) e foram fornecidas com dureza superficial de 63 ± 3 HRc. Já as placas de compósitos, tinham dimensões variadas para cada amostra, respeitando a configuração do porta amostra. As condições dos ensaios foram determinadas após pré-testes para resultar em um desgaste significativo que permitisse um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos.

Quadro 2– Sequência dos pares ensaiados e siglas utilizadas para identificar cada compósito polimérico.

Corpo de Prova	Contra Corpo
Poli (amida-imida) com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE)	Aço SAE52100
Poli (amida-imida) com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE)	Aço SAE52101
Poli (éter éter cetona) com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE)	Aço SAE52102
Poli (aril éter cetona) com fibra de carbono (PAEK+FC)	Aço SAE52103
Resina Fenólica com fibra de vidro e carga mineral (RF+FV+CM)	Aço SAE52104

Os ensaios tribológicos de esfera sobre placa descritos nesta dissertação foram baseados em estudos realizados por Santos Neto e Mancini (2009). Em um destes os aspectos tribológicos da PPA com fibra de vidro e PTFE foram comparados com os aspectos tribológicos do aço de alto carbono C80M . Constatou-se com este estudo que a PPA reforçada com fibra de vidro e PTFE apresentou valores inferiores de desgaste volumétrico quando comparada ao material metálico.

Outro estudo feito por Santos Neto e Mancini (2009) visou à comparação e a possível substituição de um material metálico (liga de bronze e PTFE) por um material polimérico (PPA com fibra de vidro e PTFE), com ênfase no estudo nos aspectos tribológicos destes materiais. Os resultados obtidos demonstraram que a PPA com fibra de vidro e PTFE, apresentou, assim como no primeiro caso, valores

inferiores de desgaste volumétrico, com estabilização do volume desgastado após 20 minutos.

Desta forma e de forma similar nesta dissertação serão comparados os desempenhos tribológicos através do ensaio de esfera sobre placa, de compósitos poliméricos termoplásticos e um compósito termofixo de modo a fornecer indicativos sobre a eventual substituição pretendida.

4.7 Microscopia Óptica

A microscopia óptica é empregada no estudo de microestruturas. Os elementos básicos utilizadas nesta técnica são: o microscópio óptico, sistemas ópticos e sistemas de iluminação. Os materiais metálicos, a maioria dos poliméricos e cerâmicos (a exceção do vidro), são opacos à luz visível, para estes casos, apenas a superfície é observada e o modo a ser utilizado, é o modo de reflexão. As diversas regiões da microestrutura são identificadas pelos contrastes na imagem produzida, resultando das diferenças na refletividade das regiões. Os metais foram os primeiros materiais a serem analisados através desta técnica, por isso, frequentemente as análises deste tipo são denominadas de metalográficas (CALLISTER, 2008).

Após o ensaio tribológico de esfera sobre placa, para análise do tamanho das calotas e para obtenção das medidas dos parâmetros necessários para os cálculos de volume, foram utilizados os seguintes equipamentos: Microscópio Óptico Binocular marca Zeiss com câmera de vídeo e Câmera fotográfica da marca Sony

Cyber Shot do Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos.

Foram tiradas fotografias de cada calota e o valor do diâmetro das calotas foi obtido através do software Image J, onde foram efetuadas quatro medidas para cada diâmetro e calculada a média dos valores para cada calota.

4.7.1 Volume desgastado

A região desgastada segue a geometria do contra corpo, gerando uma calota de forma esférica e que possui relação geométrica com a esfera que a originou. Assim, pode-se determinar o volume de material removido durante o ensaio através de um cálculo que envolve o diâmetro da calota esférica.

O volume de material desgastado (V_e) em uma amostra plana, representado pela forma geométrica de calota esférica com diâmetro “ b ”, produzida por uma esfera de raio “ R ”, pode ser calculado pela Equação 8.

$$V_e = \frac{\pi * b^4}{64 * R}$$

(8)

Onde V_e corresponde ao volume desgastado em mm^3 , R ao raio da esfera em mm , b o diâmetro da calota em mm e h a altura da calota em mm . O esquema da geometria da calota formada durante o ensaio é representado pela Figura 25.

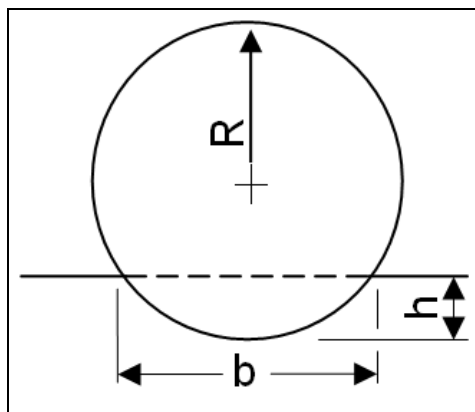


Figura 25 – Esquema da calota formada para avaliação do volume desgastado.

As medidas dos parâmetros necessários para os cálculos de volume foram feitas através de um microscópio óptico.

4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura e Análise de Energia Dispersiva

Após a realização do ensaio tribológico esfera sobre placa e da microscopia óptica, as superfícies dos corpos-de-prova foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Através desta técnica, os principais mecanismos de desgaste encontrados nas superfícies desgastadas dos corpos de prova pelo ensaio esfera sobre foram identificados.

Devido à resolução limitada alcançada com a microscopia óptica, muitas microestruturas poliméricas não podem ser analisadas por esta técnica. Para estes casos e para uma avaliação morfológica mais precisa, a microscopia eletrônica de varredura pode ser empregada (WIEBECK & HARADA, 2005).

A principal aplicação da microscopia eletrônica de varredura (MEV) é a análise morfológica superficial da amostra, este microscópio fornece informações sobre a estrutura topográfica e sobre a composição química superficial. A imagem pode se formar através de dois modos. Em um deles a imagem forma-se pelos elétrons de baixa energia presentes na superfície e a emissão destes elétrons varia de acordo com a topografia da amostra. No outro a imagem forma-se por elétrons de alta energia originados na superfície da amostra, neste modo é possível à identificação e determinação dos elementos químicos presentes na amostra, através da obtenção de imagens com diferentes contrastes e com o auxílio de um microanalisador de raios X. Quando o feixe incide sobre um vale, ou uma cavidade, os elétrons tendem a perder energia e um pequeno número deles atingirá o detector, originando uma imagem escura. Caso contrário, se o feixe de elétrons incidir sobre um pico (protuberância), um maior número de elétrons serão emitidos e atingirão o detector, gerando uma imagem mais clara (WIEBECK & HARADA, 2005).

Neste trabalho, para a observação dos aspectos da área desgastada e dos mecanismos de desgaste atuantes com a execução do ensaio tribológico, as amostras foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura. Foram utilizados dois equipamentos similares, um microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta Inspect S que se encontra no Laboratório de Análises Metalúrgicas da Schaeffler e outro microscópio eletrônico de varredura FEI Inspect S50, que se

encontra no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

As análises foram realizadas empregando-se o mecanismo de elétrons retroespalhados (modo BSED), com tensão de 20 e 25kV e ampliações variando entre 250x, 500x e 1.000x.

Os espectros de análise química elementar também foram obtidos por análise de energia dispersiva (EDS) por meio do detector de raios-X INCA x-sight (Oxford) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura FEI Inspect S50, localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

. Para uma melhor visualização da superfície, devido à natureza não condutora dos corpos de prova dos compósitos poliméricos, foi necessária a metalização de todas as amostras. A metalização foi efetuada no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Compósitos Poliméricos

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para avaliação dos compósitos poliméricos quanto à dureza Shore D e a densidade, e as análises térmicas de DSC e TGA.

5.1.1 Dureza Shore D

Na Tabela 2 são apresentados os valores das durezas Shore D dos compósitos poliméricos, ao todo foram realizadas 10 medições em cada corpo de prova, com a finalidade de se avaliar a dureza dos compósitos em diferentes pontos das amostras.

Tabela 2 - Dureza Shore D dos compósitos poliméricos.

Ensaio	PAEK+ FC	PEEK+FC+ PTFE	RF+FV+ CM	PAI+FC+ PTFE	PAI+G+ PTFE
1	85,0	83,6	92,6	91,0	83,1
2	90,2	88,5	91,7	88,6	84,9
3	90,2	84,7	93,5	90,0	84,8
4	90,6	86,7	90,9	90,0	84,8
5	90,2	85,2	93,6	88,7	83,9
6	85,0	84,4	93,6	88,6	83,6
7	90,6	83,3	92,7	90,0	84,8
8	90,2	87,0	92,2	88,7	84,9
9	90,2	86,1	92,3	87,9	83,2
10	90,6	86,4	91,7	90,0	84,8
Média	89,3	85,6	92,5	89,4	84,3
Desvio padrão	2,3	1,6	0,9	1,0	0,7
CV (%)	2,53	1,91	0,98	1,09	0,89

O compósito termofixo de resina fenólica (RF+FV+CM) apresentou o maior valor de dureza média dentre todos os compósitos, por apresentar uma estrutura mais rígida e pelas ligações cruzadas. Os compósitos de matriz polimérica termoplástica de PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE) e de PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC) demonstraram médias de dureza mais elevadas do que os termoplásticos de PAI com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE) e de PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE).

Os valores observados para os compósitos polímeros aproximam-se dos dados encontrados em catálogos de fabricantes obtidos na literatura (MATWEB, 2012).

5.1.2 Densidade

Na Tabela 3 são apresentadas as médias dos valores das densidades dos compósitos poliméricos. Foram realizadas 3 medições para cada compósito.

Tabela 3 - Densidade dos compósitos poliméricos (g/cm^3).

Compósitos	Peso_{ar}	Peso_{submerso}	Peso_{específico}
PAEK+FC	3,5841	1,0458	1,412
PEEK+FC+PTFE	3,6211	1,1136	1,444
RF+FV+CM	4,4282	1,8472	1,716
PAI+FC+PTFE	3,5863	1,2626	1,543
PAI+G+PTFE	3,3807	1,1263	1,500

Pode-se observar que, dentre os compósitos poliméricos, o compósito termofixo (RF+FV+CM) apresentou a maior densidade, $1,716 \text{ g/cm}^3$. A medida da densidade é afetada pelo tipo e quantidade de carga e fibra presente. A Tabela 4 apresenta uma possível redução da densidade de um produto caso utilizado um dos compósitos termoplásticos estudados.

Tabela 4 - Porcentagem de redução da densidade de um produto, considerando a utilização dos compósito de matriz termoplástica em detrimento ao de matriz termofixa.

Compósitos	Redução da densidade - Termofixo X Termoplástico
PAEK+FC	17,72%
PEEK+FC+PTFE	15,85%
PAI+FC+PTFE	10,08%
PAI+G+PTFE	12,59%

Ou seja, a utilização de um dos compósitos de matriz polimérica termoplástica pode gerar um ganho na eficiência de um sistema, através da redução do peso específico do produto final, de no mínimo 10,1% e no máximo 17,7%,

5.1.3 Termogravimetria (TGA)

Nas Figuras 26, 28, 30, 32 e 34 são apresentadas as curvas termogravimétricas dos compósitos de resina fenólica com fibra de vidro e carga mineral (RF+FV+CM), PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC), PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE), PAI com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE) e PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE), respectivamente. As Figuras 27, 29, 31, 33 e 35 demonstram as curvas termogravimétricas derivadas (DTG) para uma melhor visualização da temperatura em que a taxa de variação de massa atinge o valor máximo para os compósitos descritos anteriormente.

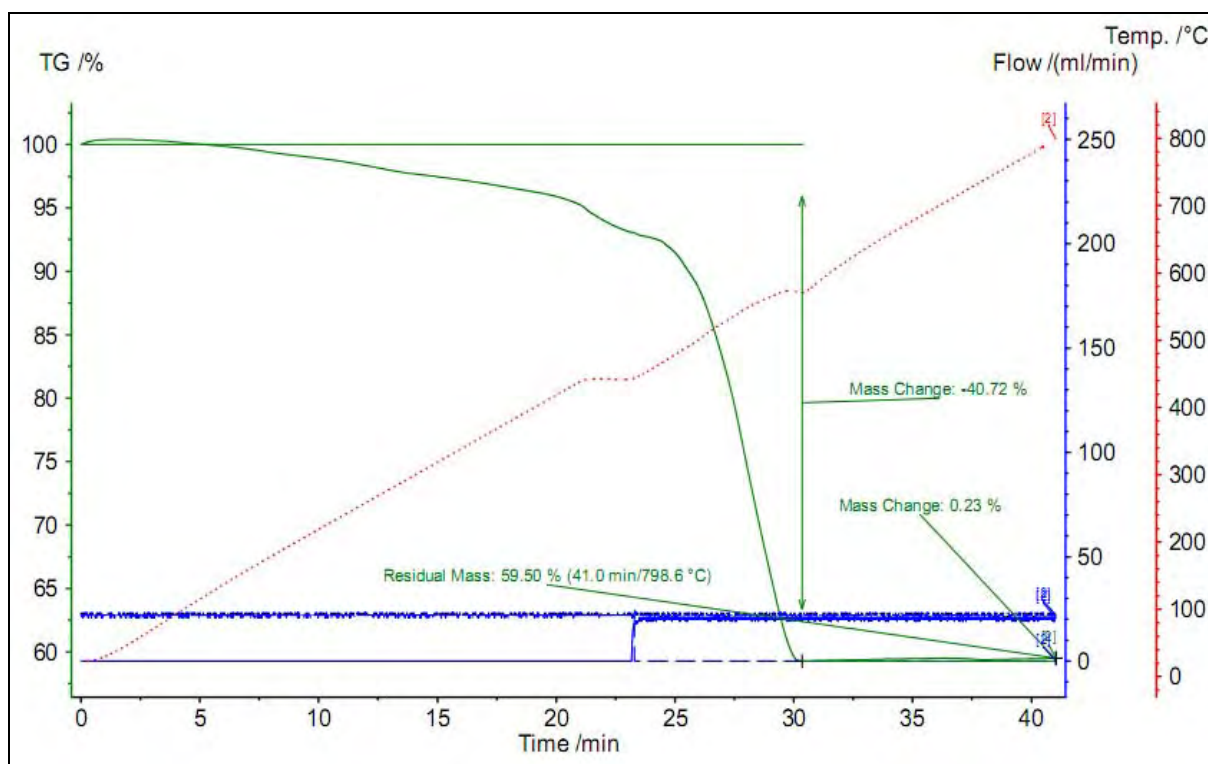


Figura 26 - Curva termogravimétrica do compósito termofixo com fibra de vidro e carga mineral (RF+FV+CM)

Através da curva termogravimétrica do compósito termofixo verifica-se apenas uma etapa de decomposição térmica. Esta etapa com aproximadamente 40,72% de perda de massa, corresponde, provavelmente a resina fenólica. A massa residual corresponde ao teor de material que não volatilizou (inorgânico) e representa, provavelmente a fibra de vidro e a carga mineral (não identificada), com redução de aproximadamente 59,50%. Há também uma pequena perda de 0,23% (não significativa).

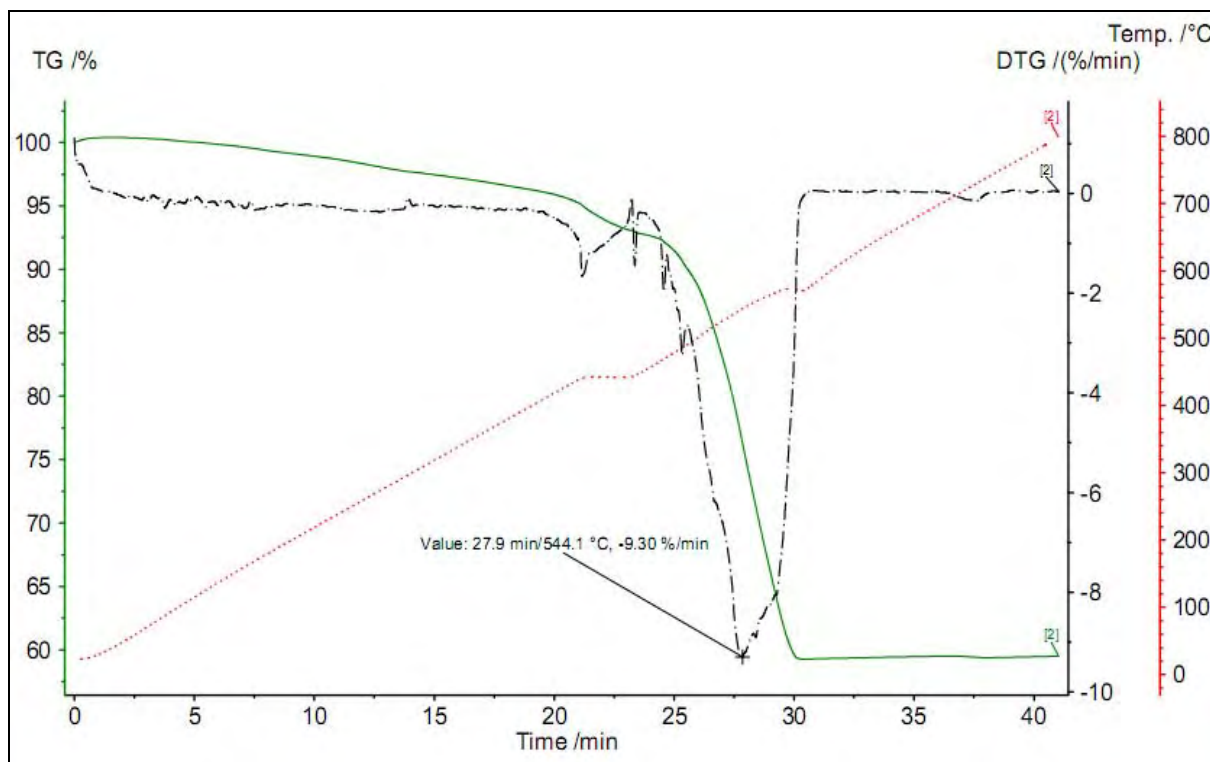


Figura 27 - Curva termogravimétrica derivada do compósito termofixo com fibra de vidro e carga mineral (RF+FV+CM)

Na curva termogravimétrica derivada do compósito termofixo verifica-se que o pico de temperatura da principal etapa de decomposição térmica foi observado a 544,1°C, com aproximadamente 27 minutos de reação.

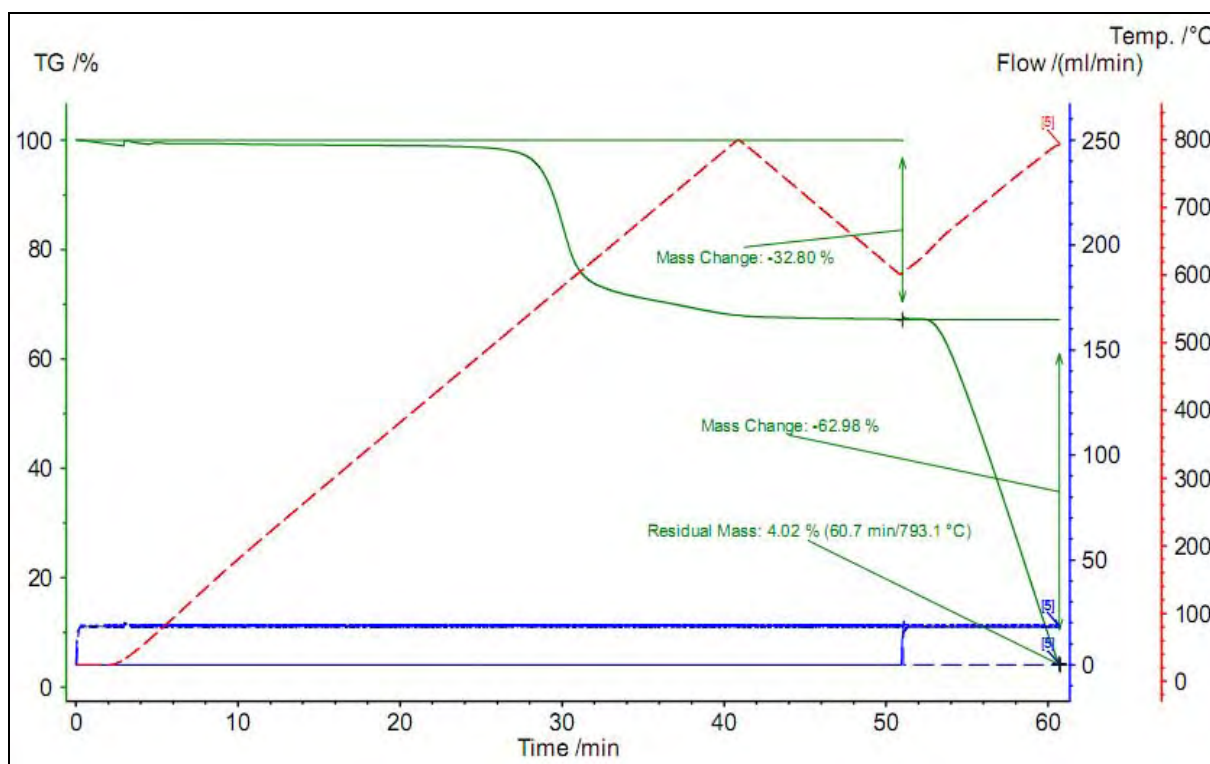


Figura 28 - Curva termogravimétrica do compósito de PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC)

Por meio da curva termogravimétrica do compósito de PAEK verificam-se duas etapas de decomposição térmica. A primeira etapa com aproximadamente 32,80% de perda de massa, corresponde, provavelmente a matriz polimérica de PAEK. Antes desta etapa, observa-se uma pequena perda de massa gradativa, caracterizando a presença de água ou umidade. A segunda etapa se refere à fibra de carbono, com 62,98% de redução da massa. Pode-se observar a presença de 4,02% de massa residual (não identificada).

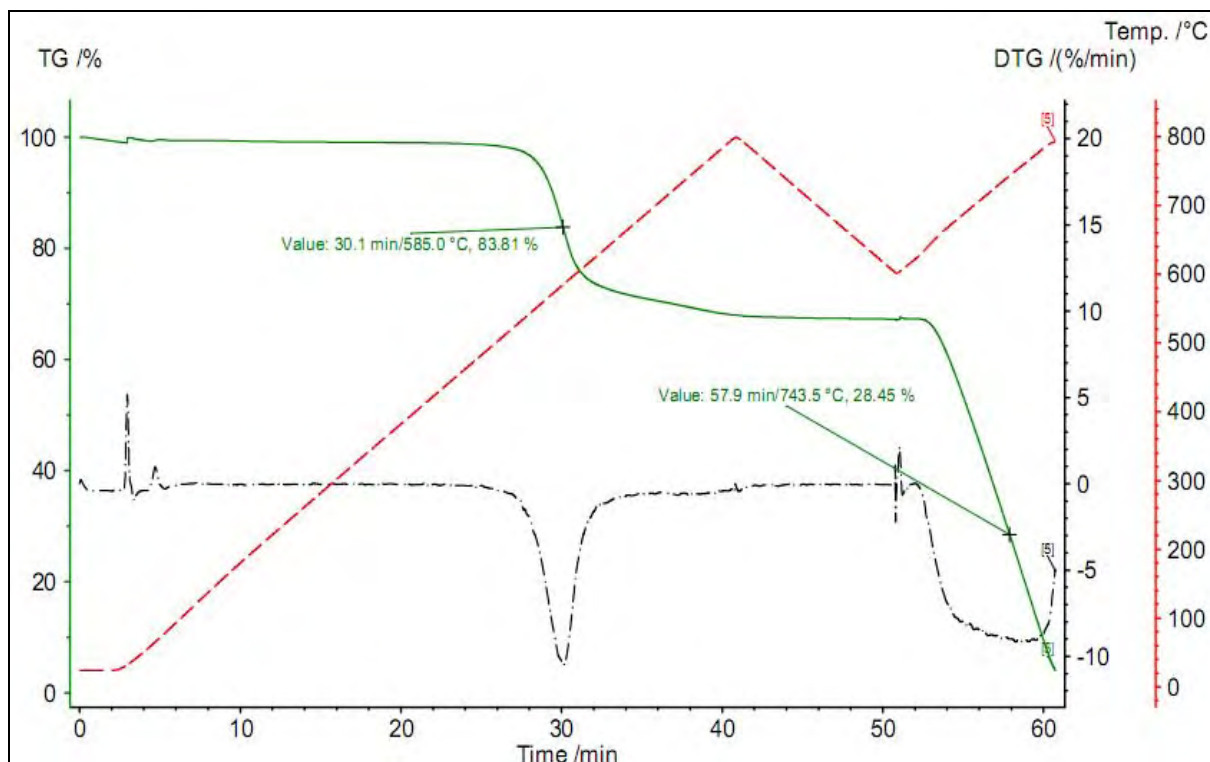


Figura 29 - Curva termogravimétrica derivada do compósito de PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC)

Na curva termogravimétrica derivada do compósito termofixo foram encontrados dois picos de temperatura. Um deles ocorreu a 585° C com 30 minutos de ensaio e corresponde a etapa de decomposição térmica do material polimérico. O outro pico se encontra a 743,5 ° C e ocorreu aproximadamente com 60 minutos de reação, podendo caracterizar o elemento químico carbono.

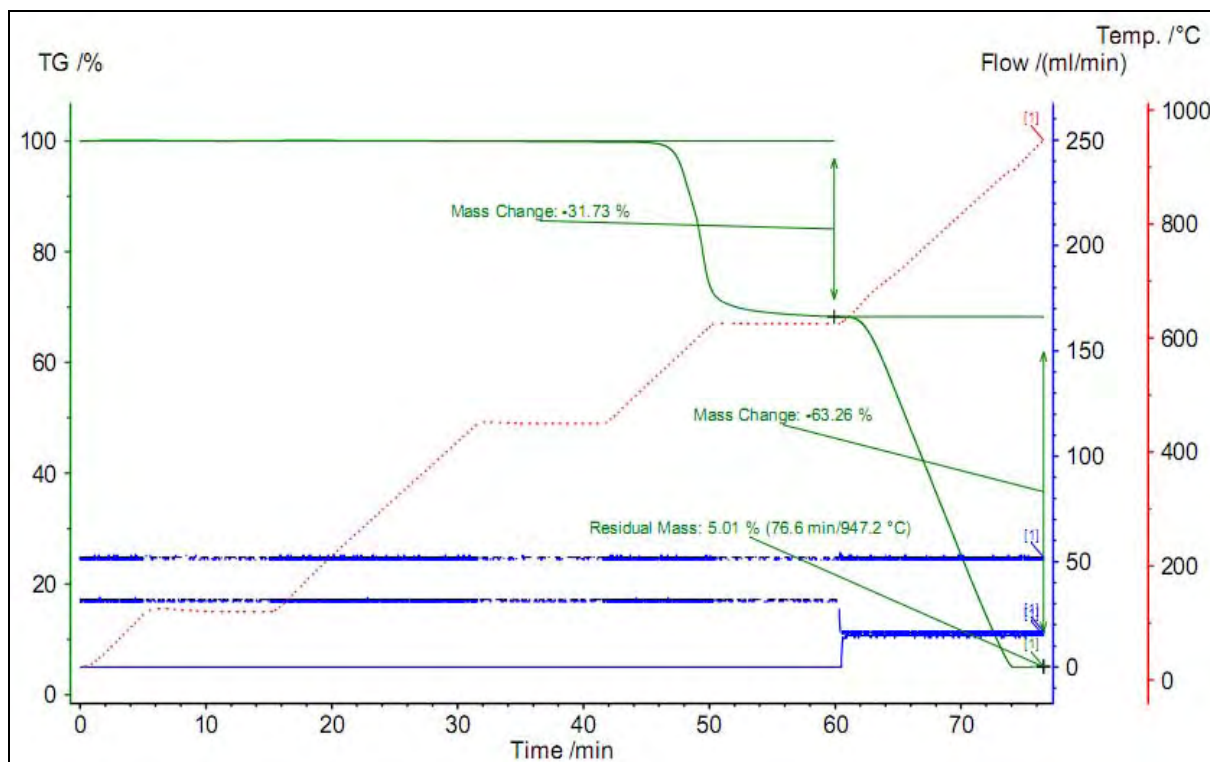


Figura 30 - Curva termogravimétrica do compósito de PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE)

Através da curva termogravimétrica do compósito de PEEK verificam-se duas etapas de decomposição térmica. A primeira etapa com aproximadamente 31,73% de perda de massa, corresponde, provavelmente a matriz polimérica do PEEK e do PTFE. A segunda etapa refere-se, provavelmente a decomposição do carbono, com 63,26% de redução da massa. Pode-se observar a presença de 5,01% de massa residual (não identificada).

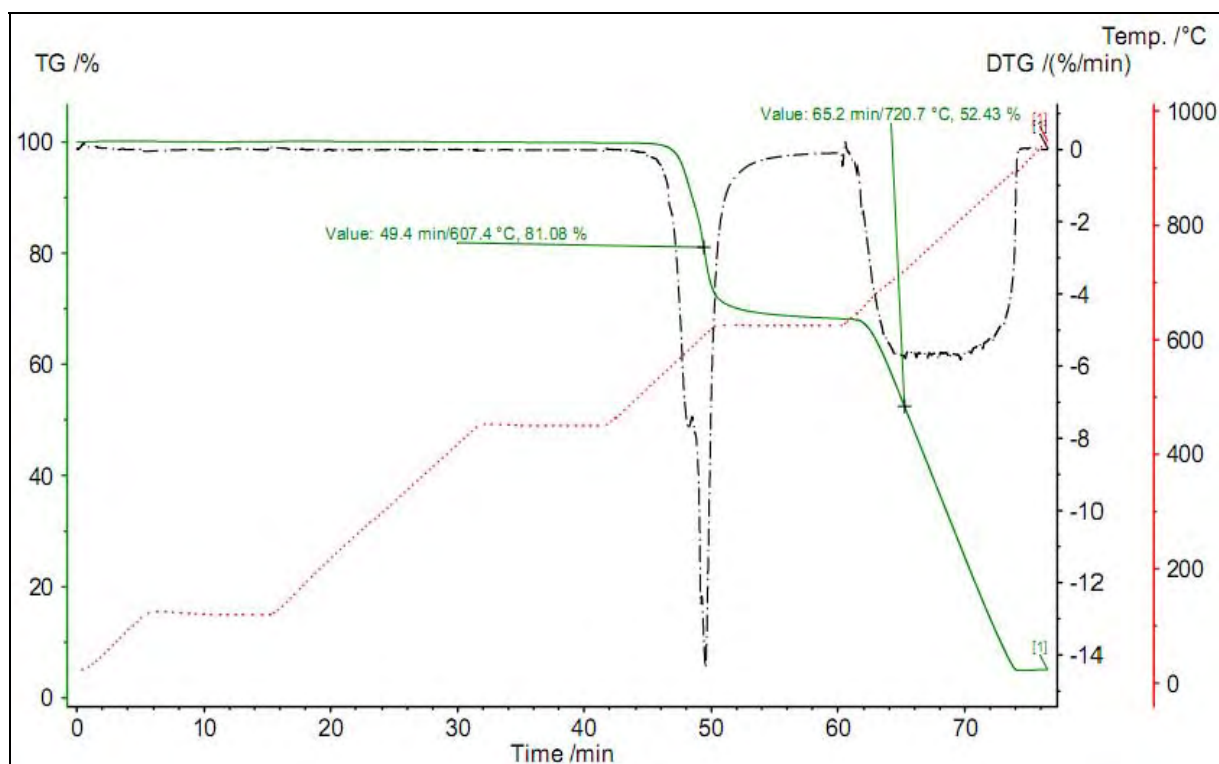


Figura 31 - Curva termogravimétrica diferencial do compósito de PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE)

Na curva termogravimétrica derivada do compósito de PEEK foram encontrados dois picos de temperatura. Um deles ocorreu a 607,4° C a 49 minutos de ensaio e corresponde a etapa de decomposição térmica dos materiais poliméricos. O outro pico se encontra a 720,7 ° C e ocorreu aproximadamente com 65,2 minutos de reação, caracterizando o elemento químico carbono.

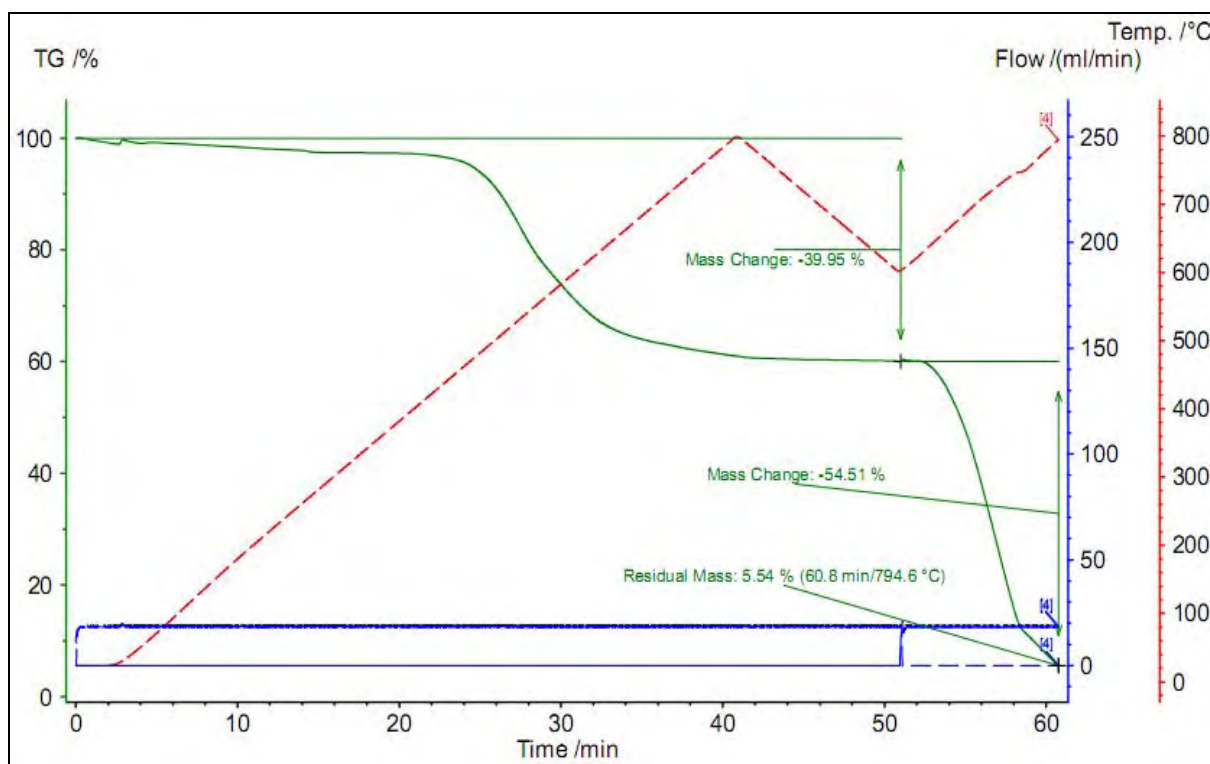


Figura 32 - Curva termogravimétrica do compósito de PAI com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE)

Através da curva termogravimétrica do compósito de PAI com grafite e PTFE verificam-se duas etapas de decomposição térmica. A primeira etapa com aproximadamente 39,95% de perda de massa, corresponde, provavelmente a decomposição dos materiais poliméricos. Antes desta etapa, observa-se uma pequena perda de massa gradativa que se inicia desde a temperatura ambiente até aproximadamente 100 °C, caracterizando a presença de água ou umidade. A segunda etapa refere-se ao grafite, com 54,51% de redução da massa. Pode-se observar a presença de 5,54% de massa residual (não identificada).

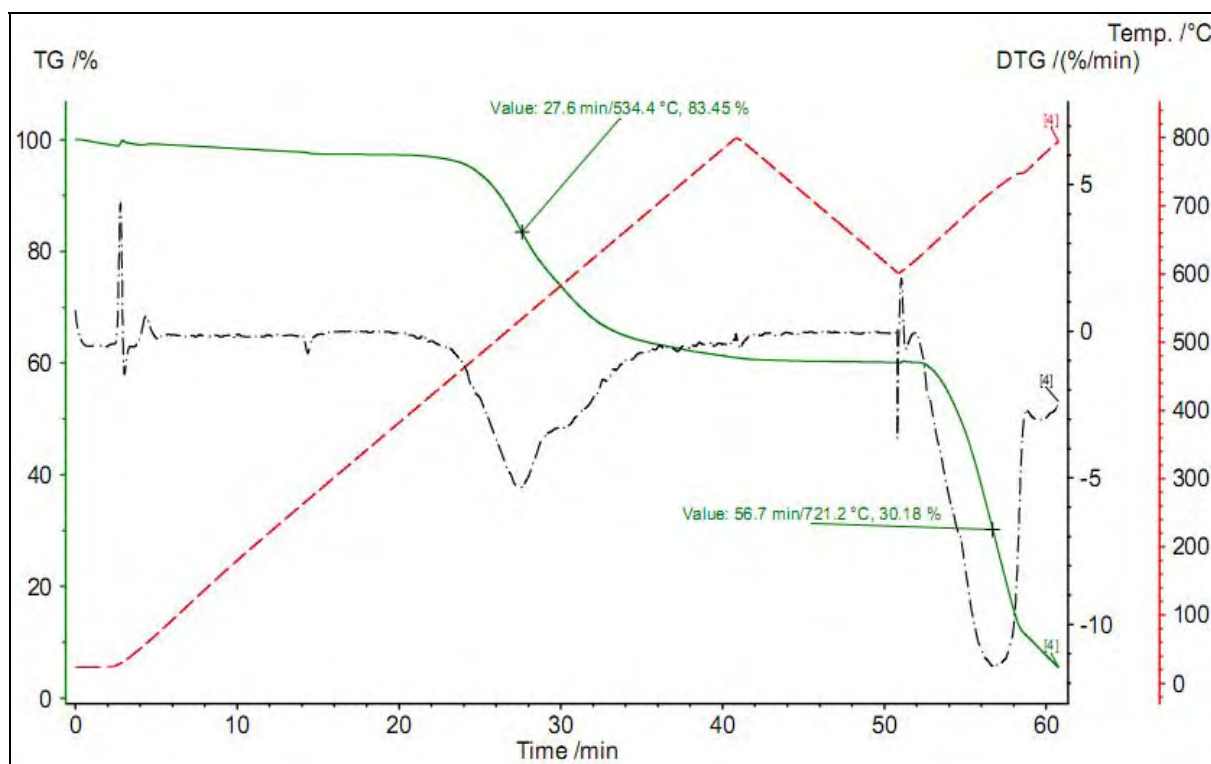


Figura 33 - Curva termogravimétrica derivada do compósito de PAI com grafite e PTFE (PAI+G+PTFE)

Na curva termogravimétrica derivada do compósito termofixo foram encontrados dois picos de temperatura. Um deles ocorreu a 534,4° C em 27,6 minutos de ensaio e corresponde a etapa de decomposição térmica dos materiais poliméricos. O outro pico se encontra a 721,2° C e ocorreu aproximadamente com 56 minutos de reação, caracterizando o elemento químico grafite.

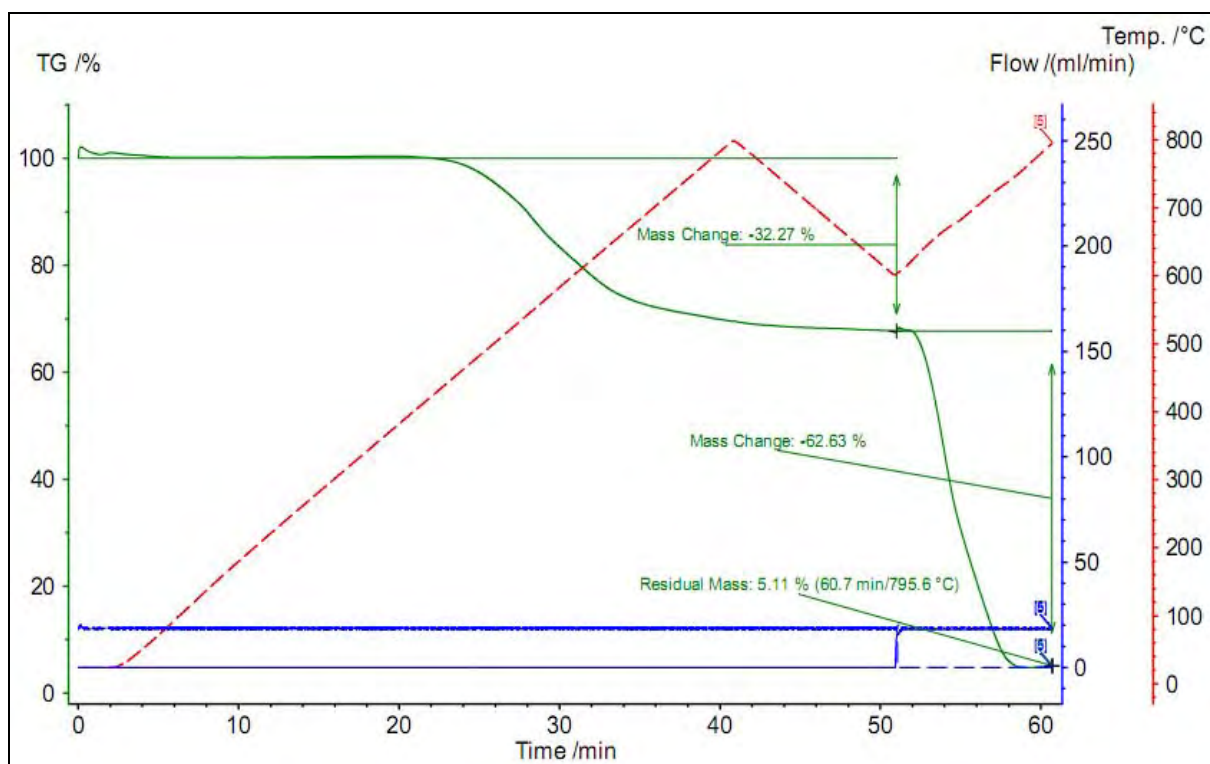


Figura 34 - Curva termogravimétrica do compósito de PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE)

Através da curva termogravimétrica do compósito de PAI com carbono e PTFE verificam-se duas etapas de decomposição térmica. A primeira etapa com aproximadamente 32,27% de perda de massa, corresponde, provavelmente aos elementos poliméricos. A segunda etapa refere-se à fibra de carbono, com 62,63% de redução da massa. Pode-se observar a presença de 5,11% de massa residual (não identificada).

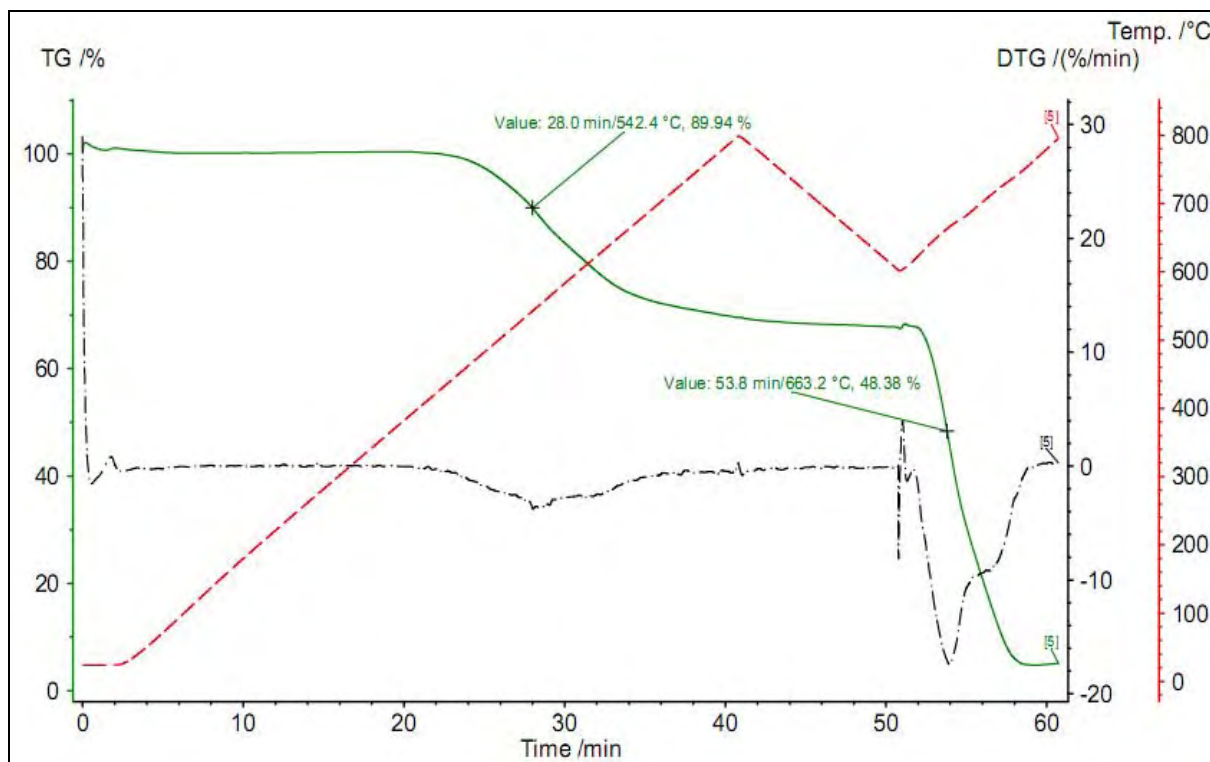


Figura 35 - Curva termogravimétrica diferencial do compósito de PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE)

Na curva termogravimétrica derivada do compósito termofixo foram encontrados dois picos de temperatura. Um deles ocorreu a 542,4° C a 28 minutos de ensaio e corresponde a etapa de decomposição térmica dos materiais poliméricos. O outro pico se encontra a 663,2 ° C e ocorreu aproximadamente com 53,8 minutos de reação, caracterizando o elemento químico carbono.

5.1.4 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

As Figuras 36 e 38 apresentam as curvas de DSC do compósito PAEK com fibra de carbono e do compósito PEEK com fibra de carbono e PTFE, respectivamente. Os principais resultados para cada compósito aparecem discriminados nas Tabelas 6 (PAEK+FC) e 7 (PEEK+FC+PTFE). Não são apresentadas as curvas de DSC dos outros compósitos envolvidos na pesquisa, pois o compósito de matriz termofixa e os compósitos que contém matriz de Poliamida-imida não fundiram durante o ensaio.

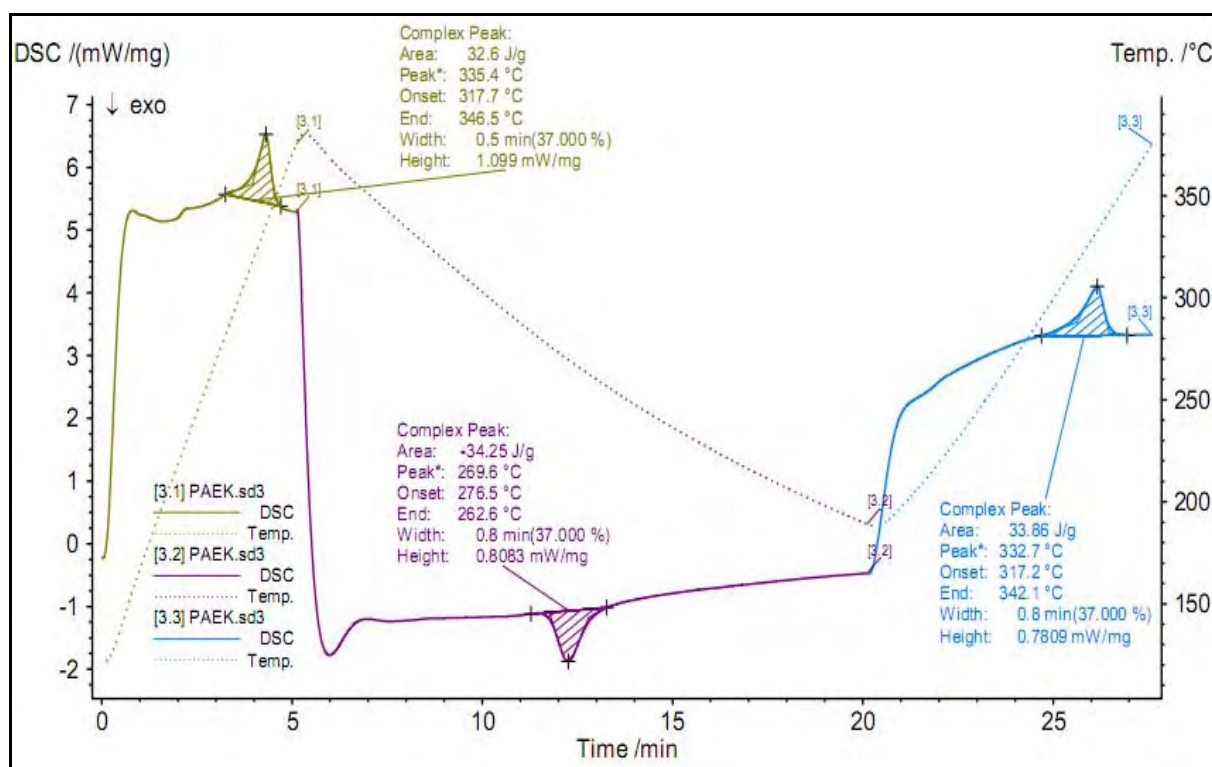


Figura 36 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PAEK+FC.

Tabela 5 - Temperaturas e entalpias de fusão e cristalização para o compósito polimérico PAEK+FC.

	1º Aquecimento	Resfriamento	2º Aquecimento
	Tm (°C)	Tc (°C)	Tm (°C)
Início	317,7	276,5	317,2
Pico	335,4	269,6	332,7
Final	346,5	262,6	342,1
	ΔH_f (J/g)	ΔH_c (J/g)	ΔH_f (J/g)
	32,6	34,25	33,86

Conforme observado na Tabela 5, a temperatura de fusão cristalina deste compósito se encontra acima de 330 °C, representando que este polímero trabalha bem em temperaturas elevadas, comparado a materiais poliméricos convencionais. A ocorrência da temperatura de cristalização indica que este é um compósito polimérico semicristalino. Através da Figura 37 pode-se observar a presença de um pico identificando a temperatura de transição vítrea, que antecede o pico de fusão.

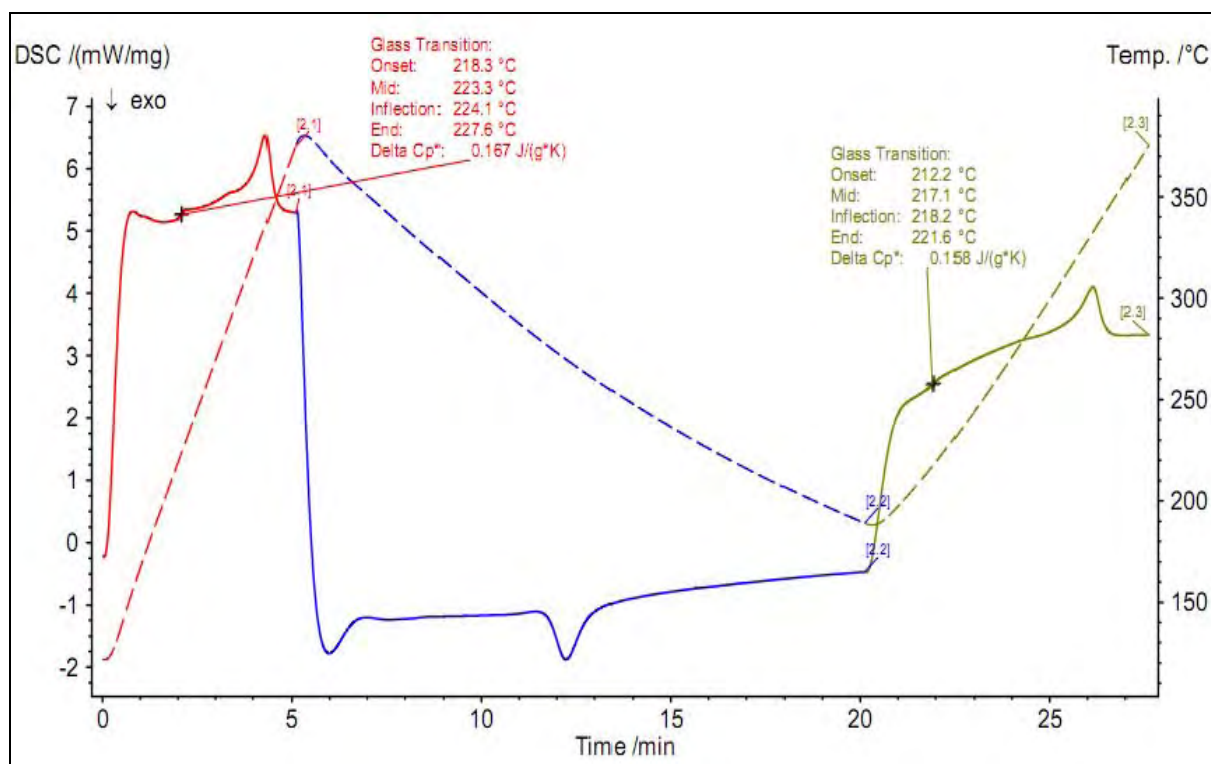


Figura 37 – Temperatura de transição vítrea do compósito de PAEK.

A temperatura de transição vítrea do compósito de PAEK com fibra de carbono ocorreu à aproximadamente de 217 °C, conforme identificado na Figura 37.

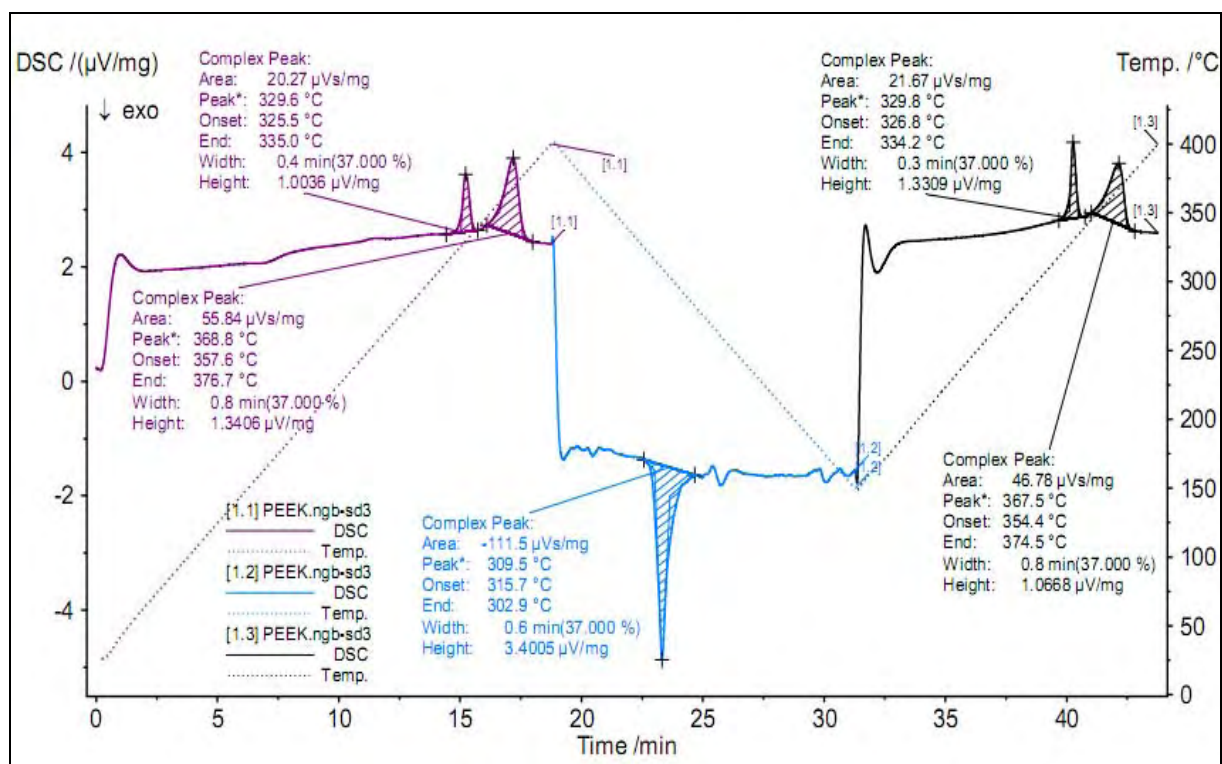


Figura 38 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PEEK+FC+PTFE

Tabela 6 - Temperaturas e entalpias de fusão e cristalização para o compósito polimérico PEEK+FC+PTFE.

	1º Aquecimento		Resfriamento	2º Aquecimento	
	Tm ($^{\circ}\text{C}$)		Tc ($^{\circ}\text{C}$)	Tm($^{\circ}\text{C}$)	
Início	325,5	357,6	315,7	326,8	354,4
Pico	329,6	368,8	309,5	329,8	367,5
Fim	335,0	376,7	302,9	334,2	374,5
	ΔHf ($\mu\text{Vs/mg}$)		ΔHc ($\mu\text{Vs/mg}$)	ΔHf ($\mu\text{Vs/mg}$)	
	20,27	55,84	111,5	21,67	46,78

Conforme observado na Tabela 6, a curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PEEK+FC+PTFE apresentou dois picos, provavelmente pela presença dos materiais poliméricos PEEK e PTFE. Ambos apresentaram temperatura de fusão acima de 320 °C, indicando que este compósito possui resistência às altas temperaturas, assim como o compósito de PAEK. A presença da temperatura de cristalização indica que este é um compósito polimérico de estrutura semicristalina. Na Figura 39 foi possível identificar outro pico de cristalização.

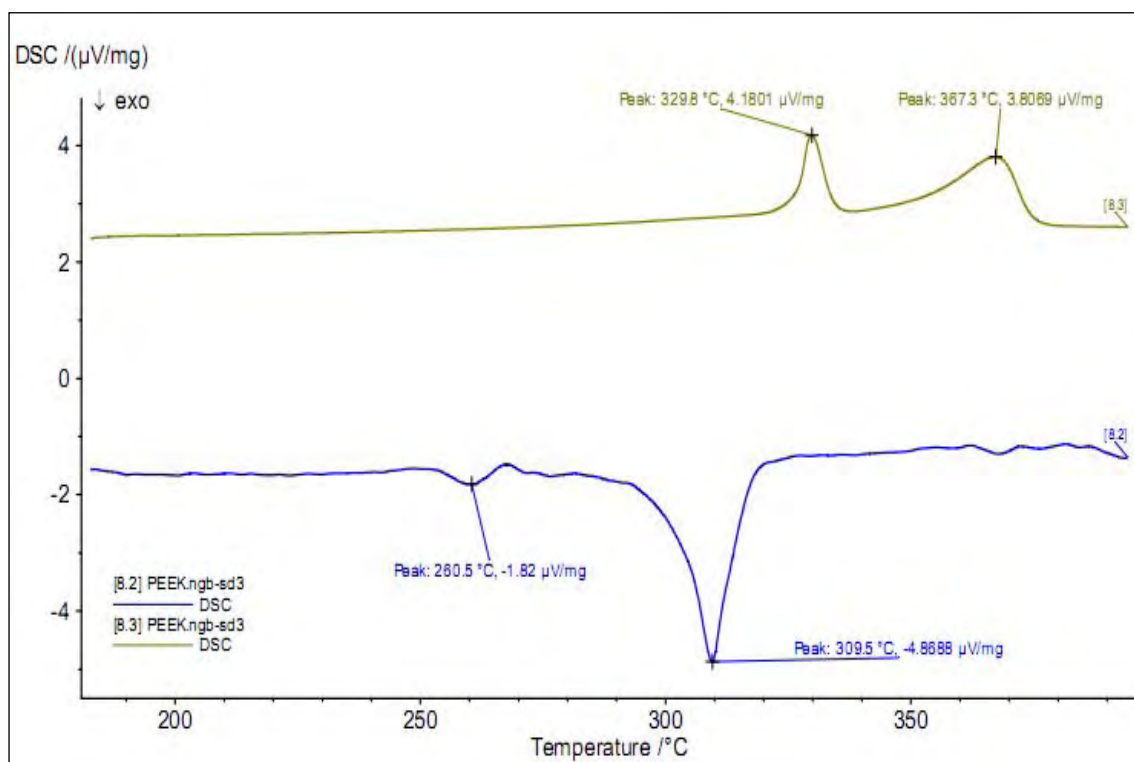


Figura 39 - Curva de calorimetria exploratória diferencial do compósito PEEK+FC+PTFE

Através da curva de calorimetria exploratória diferencial indicada na Figura 39, pode-se observar a presença de dois picos de cristalização. Caracterizando a presença de dois materiais poliméricos distintos.

5.2 Análise do Material Metálico

Para se avaliar a condição do contra corpo metálico, uma esfera similar às empregadas nos ensaios de desgaste foi selecionada e analisada quanto à dureza HRC, a sua microestrutura e composição química.

5.2.1 Dureza HRC

Na Tabela 7 são apresentados os resultados de dureza HRC na superfície e no núcleo do corpo metálico.

Tabela 7 - Dureza HRC do material metálico.

Valores de dureza HRC	Superfície	Núcleo
Mínima	63,5	62,5
Máxima	64,2	63,2
Número de medições	10	10
Dureza especificada	63 ± 3	63 ± 3

Conforme Tabela 7, observa-se que os valores encontrados encontram-se dentro da faixa de dureza especificada pelo fornecedor de 63 ± 3 , tanto no núcleo quanto na superfície.

5.2.2 Análise metalográfica

Pode-se observar através da Figura 40 a microestrutura do aço de uma das esferas utilizadas no ensaio de esfera sobre placa.

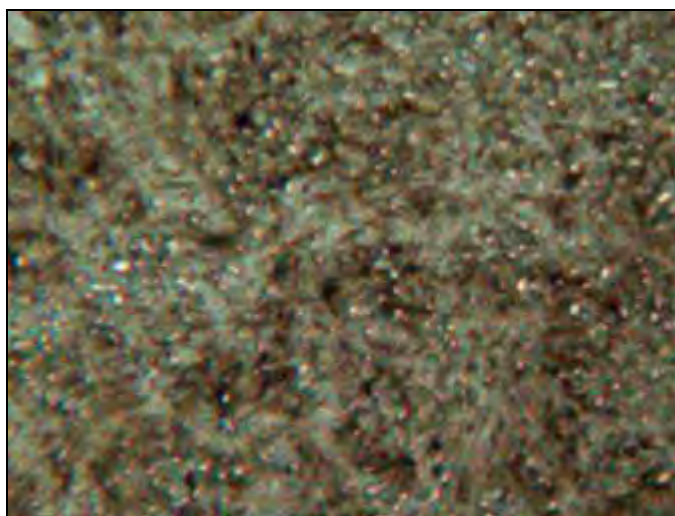


Figura 40- Microestrutura do aço.

Conforme Figura 40, a microestrutura apresenta martensita revenida com carbonetos esferoidizados. Caracterizando a estrutura de uma esfera fabricada com aço para rolamento que passou pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

5.2.3 Composição química

A Tabela 8 apresenta a composição química dos elementos do contra corpo metálico (esfera).

Tabela 8 - Composição química do contra corpo metálico (esfera)

Elemento	Composição [% (m/m)]	Especificação
C	1,08	0,93 a 1,05
Si	0,27	0,15 a 0,35
Mn	0,32	0,25 a 0,45
P	0,014	máx. 0,025
S	0,009	máx. 0,015
Cr	1,48	1,35 a 1,60
Ni	0,05	-
Cu	0,116	máx. 0,30
Ti	0,003	-
Mo	0,010	máx. 0,10
Al	0,0027	máx. 0,05
V	0,002	-

Os valores da composição química especificados são encontrados na norma ISO 683-17 (1999), que define as classes dos aços empregados na fabricação de rolamentos. Conforme esta norma, o aço que apresenta composição semelhante aos valores de composição química encontrados, é o aço 100 Cr6 ou SAE 52100. A composição do elemento ferro encontrada é de aproximadamente 96,64%.

5.3 Rugosidade

5.3.1 Rugosidade do corpos de prova (amostras)

Os valores da rugosidade média, Ra e da rugosidade de profundidade, Rz, da superfície dos corpos de prova dos compósitos poliméricos são apresentados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente. As medições de rugosidade foram feitas com a finalidade de se avaliar a condição superficial dos corpos de prova dos compósitos poliméricos antes da realização dos ensaios tribológicos.

Tabela 9 - Valores da rugosidade média, Ra (μm), dos corpos de prova dos compósitos poliméricos medidos antes dos ensaios tribológicos.

Ensaio	PAEK+ FC	PEEK+FC+ PTFE	RF+FV+ CM	PAI+FC+ PTFE	PAI+G+ PTFE
1	0,2329	0,3135	1,2398	0,2791	0,1852
2	0,2955	0,2847	1,2215	0,2479	0,1857
3	0,2737	0,3364	0,9487	0,2664	0,2462
4	0,2436	0,3103	0,9828	0,2044	0,2559
5	0,2742	0,3335	1,2267	0,2818	0,2579
6	0,2356	0,3166	1,2214	0,2188	0,1979
7	0,2789	0,3579	1,2365	0,2443	0,2596
Média	0,2621	0,3218	1,1539	0,2490	0,2269
Desvio padrão	0,0244	0,0233	0,1291	0,0295	0,0354
CV (%)	9,32	7,24	11,19	11,84	15,61

Apesar de todos os corpos de prova terem passado pelo mesmo processo de acabamento superficial (lixamento), pode-se observar que houve uma flutuação nos valores da rugosidade média. Esta flutuação pode ser explicada tanto pela

composição da matriz polimérica, quanto pela presença das fibras e das cargas que compõe os compósitos poliméricos. O compósito termofixo (RF+FV+CM) foi o que apresentou os maiores valores de rugosidade média, provavelmente por apresentar uma estrutura mais rígida e pela presença da fibra de vidro e de carga mineral que podem elevar os valores de rugosidade, devido à diferença de dureza entre as fibras, a carga mineral e a matriz. Seguido do compósito termofixo, os valores da rugosidade média decresceram na seguinte ordem: compósito de PEEK+FC+PTFE, PAEK+FC, PAI+FC+PTFE e PAI+G+PTFE.

O grau de dispersão dos valores ficou entre 9,32% e 15,61%. A faixa de rugosidade analisada apresentou valores entre 0,1852 e 1,2398 μm , ou seja, a faixa encontrada foi de aproximadamente $0,7 \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Tabela 10 - Valores da rugosidade de profundidade, R_z (μm), dos corpos de prova dos compósitos poliméricos medidos antes dos ensaios tribológicos.

Ensaio	PAEK+ FC	PEEK+FC+ PTFE	RF+FV+ CM	PAI+FC+ PTFE	PAI+G+ PTFE
1	1,8666	2,0129	12,8029	2,5665	1,9326
2	2,2540	2,4525	11,5596	2,2125	1,9783
3	1,8754	2,4945	11,5414	2,5858	2,2122
4	1,8978	2,3267	12,6557	2,2919	2,6420
5	1,8715	2,5347	11,6647	2,6775	2,2537
6	2,1618	2,1811	12,5449	2,4756	1,9345
7	1,8892	2,4997	11,7894	2,2114	2,1419
Média	1,9738	2,3574	12,0798	2,4316	2,1565
Desvio padrão	0,1625	0,1959	0,5609	0,1917	0,2515
CV (%)	8,23	8,31	4,64	7,88	11,66

Assim como os valores de rugosidade média (R_a), a rugosidade de profundidade (R_z), apresentou flutuação de seus valores. O compósito termofixo (RF+FV+CM) foi o que apresentou maiores valores de rugosidade de profundidade,

ou seja, a maior diferença de profundidade entre os picos e os vales. Isto pode ser explicado, assim como para a rugosidade média, pela sua estrutura e composição. Para os compósitos termoplásticos, houve uma diferença na ordem decrescente dos valores de rugosidade de profundidade, em relação à rugosidade média. O compósito termoplástico que apresentou maior média de rugosidade de profundidade foi o PAI+FC+PTFE, seguido do PEEK+FC+PTFE, PAI+G+PTFE e PAEK+FC.

O grau de dispersão dos valores ficou entre 4,64% e 11,66%. Os valores de rugosidade de profundidade encontrados ficaram entre 1,8666 e 12,8029 μm , ou seja, a faixa encontrada ficou entre $7,4 \pm 5,6 \mu\text{m}$, aproximadamente.

Apesar de todos os corpos de prova terem passado pelo mesmo procedimento de lixamento, houve uma diferença entre os valores de rugosidade média e de profundidade. Isto pode ser explicado, pelo processo de lixamento que deixou micro irregularidades na superfície dos corpos de prova, já que o processo de fabricação e de acabamento superficial influencia diretamente a rugosidade das superfícies (FREITAS, 2006).

5.3.2 Rugosidade dos contra corpos (esferas)

Os valores da rugosidade média R_a (μm) e da rugosidade de profundidade R_z (μm) da superfície dos corpos de prova dos compósitos poliméricos são apresentados na Tabela 11. As medições de rugosidade foram feitas com a finalidade de se avaliar a condição superficial dos contra corpos metálicos (esferas)

antes da realização dos ensaios tribológicos. Ao todo foram realizadas 2 medições para cada corpo de prova, totalizando 10 medições.

Tabela 11 - Valores da rugosidade média Ra (μm) e da rugosidade de profundidade Rz (μm).dos contra corpos metálicos medidos antes dos ensaios tribológicos.

Contra corpos metálicos medidos antes dos ensaios biológicos			
Ensaio	Contra corpos	Ra (µm)	Rz (µm)
1	1	0,0400	0,3320
2		0,0435	0,2774
3	2	0,0525	0,3770
4		0,0531	0,4912
5	3	0,0414	0,3072
6		0,0422	0,3140
7	4	0,0562	0,3255
8		0,0561	0,3603
9	5	0,0487	0,2920
10		0,0468	0,2517
Média		0,04805	0,30457
Desvio padrão		0,00617	0,116759

Os valores de rugosidade média e de profundidade apresentaram valores correspondentes ao processo de lapidação. No geral todas as superfícies apresentaram valores de rugosidade média baixa, na faixa de $0,05 \pm 0,01 \mu\text{m}$, aproximadamente. Os valores de rugosidade de profundidade apresentaram variação na ordem de $0,375 \pm 0,125 \mu\text{m}$, aproximadamente.

Segundo Hollander e Lancaster (1973), durante um contato metal-polímero, a topografia do material metálico é o fator predominante na determinação da magnitude da taxa de desgaste para os polímeros e compósitos poliméricos durante diversas condições de deslizamento.

5.4 Microscopia Óptica e Cálculo do Volume Desgastado

Pode-se observar com as fotos das micrografias os ensaios das menores crateras e das maiores crateras para cada bateria de ensaios. As menores crateras foram obtidas nos ensaios realizados com menor carga durante o menor espaço de tempo e as maiores crateras com a maior carga durante o maior espaço de tempo, conforme observado nas Tabelas 12, 13, 14, 15 e 16. Os volumes de material desgastado também são apresentados nas tabelas. Com isso, pode-se observar que o volume de material desgastado aumentou proporcionalmente com o aumento da carga e da duração dos ensaios (distância de deslizamento).

As figuras 41, 42, 43, 44 e 45, correspondem as menores e maiores crateras obtidas após realização do ensaio tribológico para cada tipo de compósito polimérico.

Tabela 12 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico termofixo (RF+FV+CM).

Ensaio		Carga [N]	Tempo [min]	Diâmetro Calota [mm]	Volume Desgastado [mm ³]
1	a	6,65	5	1,165	7,12E-03
	b	6,65	10	2,245	9,82E-02
	c	6,65	15	2,530	1,58E-01
	d	6,65	20	3,175	3,93E-01
2	a	13,49	5	1,793	3,99E-02
	b	13,49	10	2,708	2,08E-01
	c	13,49	15	3,000	3,13E-01
	d	13,49	20	3,308	4,63E-01
3	a	18,26	5	2,075	7,17E-02
	b	18,26	10	2,805	2,39E-01
	c	18,26	15	3,130	3,71E-01
	d	18,26	20	3,373	5,00E-01

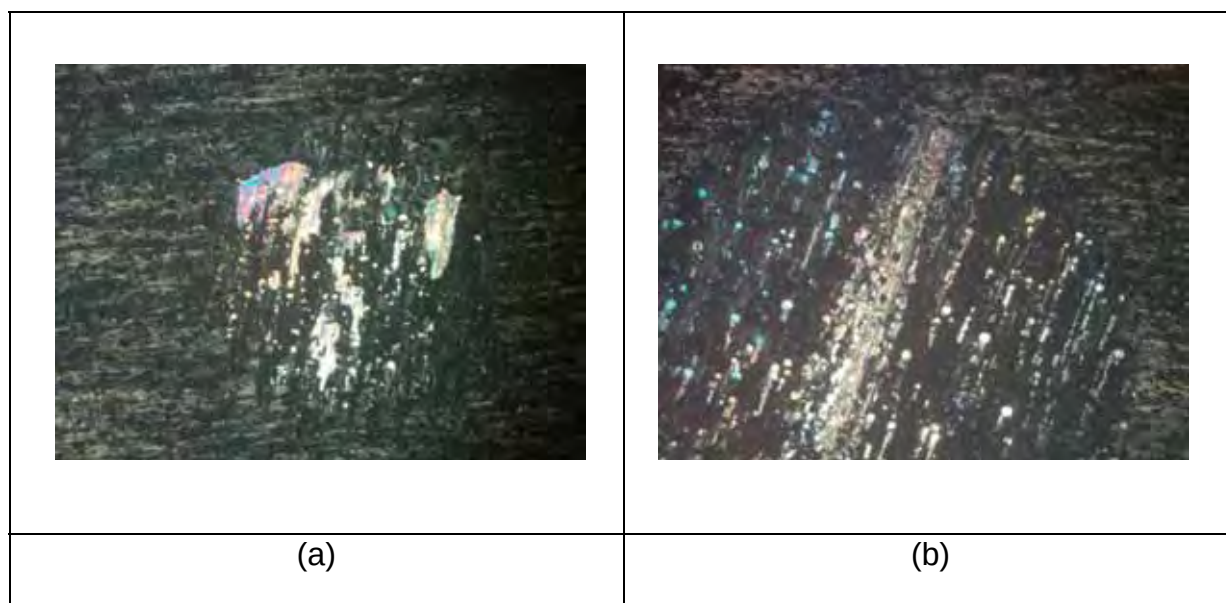
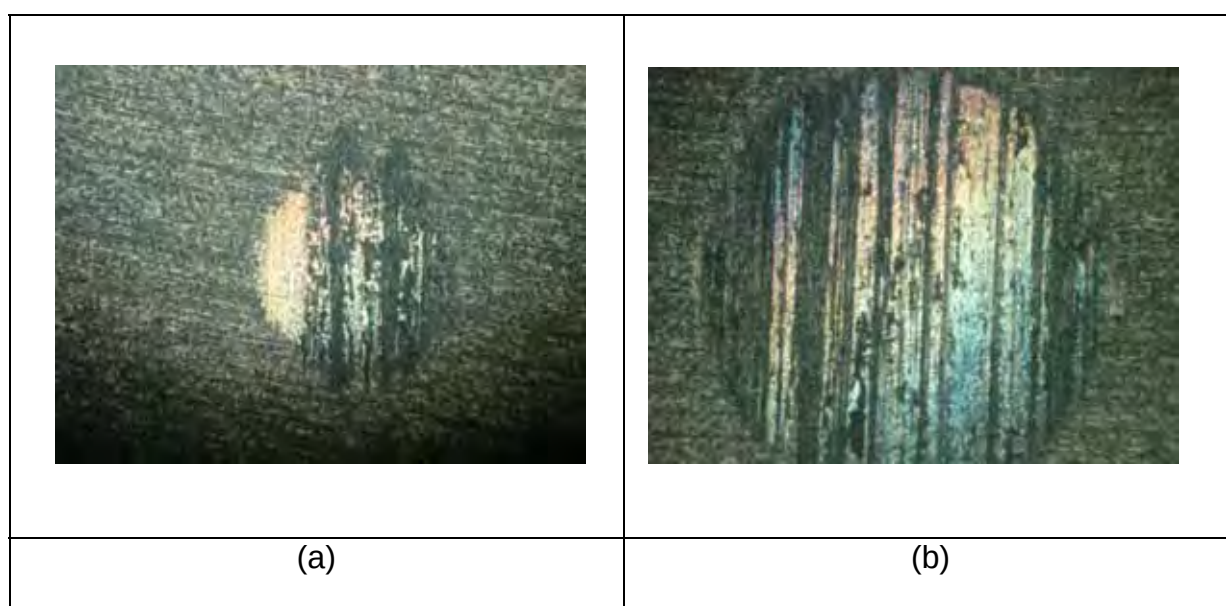


Figura 41 – (a) Microscopia óptica da superfície desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N gramas.

Através da Tabela 12 pode-se observar que o desgaste do compósito termofixo variou proporcional com a carga aplicada e com a duração do ensaio (distância de deslizamento).

Tabela 13 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito PAEK+FC.

Ensaio		Carga [N]	Tempo [min]	Diâmetro Calota [mm]	Volume Desgastado [mm ³]
1	a	6,65	5	0,840	1,92E-03
	b	6,65	10	0,840	1,92E-03
	c	6,65	15	0,910	2,65E-03
	d	6,65	20	0,920	2,77E-03
2	a	13,49	5	1,140	6,53E-03
	b	13,49	10	1,520	2,06E-02
	c	13,49	15	1,820	4,24E-02
	d	13,49	20	1,830	4,33E-02
3	a	18,26	5	1,460	1,76E-02
	b	18,26	10	1,790	3,97E-02
	c	18,26	15	1,870	4,73E-02
	d	18,26	20	1,890	4,93E-02

**Figura 42** – (a) MEV da superfície desgastada do PAEK+FC com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

Harsha e Tewari (2003), investigaram o desgaste abrasivo a dois e a três corpos de compósitos de PAEK sob diferentes cargas e distâncias de deslizamento. Eles concluíram que o volume de material desgastado aumentou proporcionalmente com o aumento da carga aplicada e da distância de deslizamento quando há

desgaste abrasivo a dois corpos. Esta tendência também foi observada nos resultados obtidos nesta dissertação.

Tabela 14 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico PEEK+FC+PTFE.

Ensaio		Carga [N]	Tempo [min]	Diâmetro Calota [mm]	Volume Desgastado [mm ³]
1	a	6,65	5	0,730	1,10E-03
	b	6,65	10	0,750	1,22E-03
	c	6,65	15	0,770	1,36E-03
	d	6,65	20	0,810	1,66E-03
2	a	13,49	5	0,850	2,02E-03
	b	13,49	10	0,870	2,21E-03
	c	13,49	15	0,940	3,02E-03
	d	13,49	20	1,030	4,35E-03
3	a	18,26	5	0,960	3,28E-03
	b	18,26	10	1,020	4,18E-03
	c	18,26	15	1,070	5,07E-03
	d	18,26	20	1,150	6,76E-03

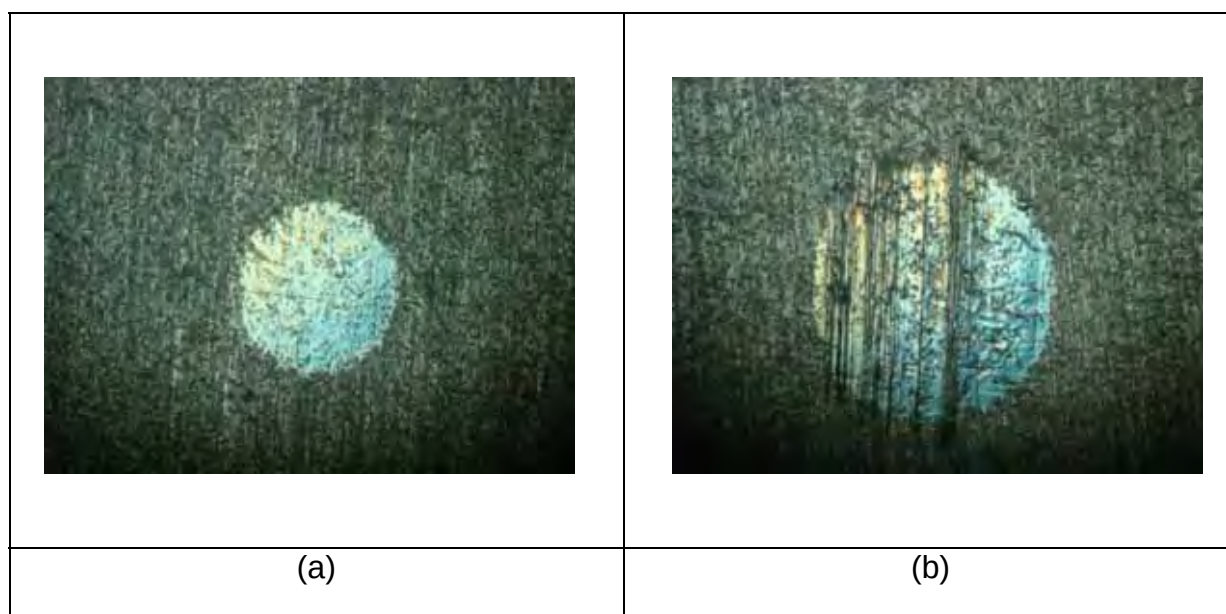


Figura 43 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

Através da Tabela 14 pode-se observar que tanto a carga aplicada, quanto a distância de deslizamento (duração dos ensaios) exercem certa influência no volume de material desgastado. Davim e Cardoso (2006) analisaram através de técnicas estatísticas a influência do fator p-v, da temperatura e da distância durante o movimento de deslizamento de um compósito de PEEK com 30% de carbono e concluíram que o coeficiente de atrito variou de acordo com a distância percorrida. A perda de peso do compósito se acentuou com o aumento da temperatura e distância de deslizamento, conforme os dados obtidos nesta dissertação.

Zhang *et al* (2004) estudou o desgaste de compósitos de PEEK e sua performance mecânica e concluiu que houve uma pequena influência das suas propriedades mecânicas na taxa de desgaste.

Tabela 15 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico PAI+G+PTFE.

Ensaio		Carga [N]	Tempo [min]	Diâmetro Calota [mm]	Volume Desgastado [mm ³]
1	a	6,65	5	0,920	2,77E-03
	b	6,65	10	0,950	3,15E-03
	c	6,65	15	0,970	3,42E-03
	d	6,65	20	0,980	3,56E-03
2	a	13,49	5	0,950	3,15E-03
	b	13,49	10	0,970	3,42E-03
	c	13,49	15	1,020	4,18E-03
	d	13,49	20	1,230	8,85E-03
3	a	18,26	5	0,950	3,15E-03
	b	18,26	10	1,000	3,87E-03
	c	18,26	15	1,040	4,52E-03
	d	18,26	20	1,080	5,26E-03

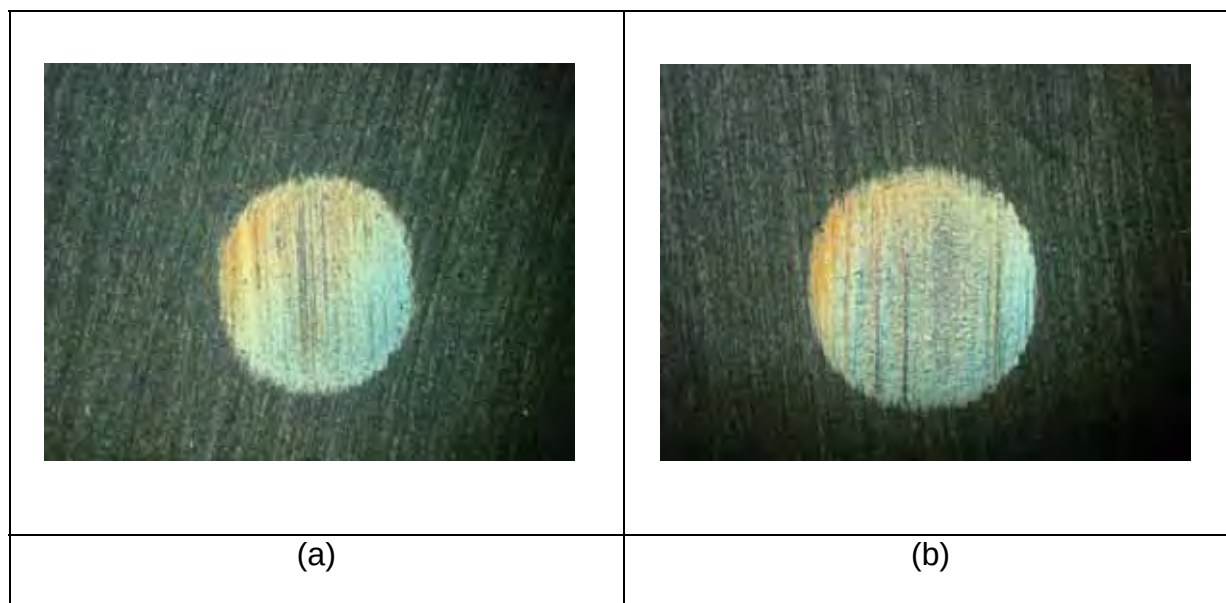


Figura 44 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PAI+G+PTFE com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

Clarke e Allen (1991), estudaram o comportamento tribológico de cinco materiais poliméricos, incluindo um compósito de PAI com grafite, em contato com aço sob lubrificação com água. Eles observaram que no geral, o aumento da carga aplicada ocasionou maiores taxas de desgaste, exceto para o UHMWPE. Eles também concluíram que a taxa de desgaste aumentou proporcionalmente com o aumento da rugosidade do contra corpo.

Jain e Bahadur (1988), também notaram que com um aumento da carga aplicada e da rugosidade do contra corpo, houve um aumento do desgaste no contato sob deslizamento de um aço com uma PAI com grafite e PTFE.

Tabela 16 - Volume de material desgastado após o ensaio tribológico do compósito polimérico PAI+FC+PTFE.

Ensaio		Carga [N]	Tempo [min]	Diâmetro Calota [mm]	Volume Desgastado [mm ³]
1	a	6,65	5	0,700	9,28E-04
	b	6,65	10	0,750	1,22E-03
	c	6,65	15	0,780	1,43E-03
	d	6,65	20	0,900	2,54E-03
2	a	13,49	5	0,820	1,75E-03
	b	13,49	10	0,820	1,75E-03
	c	13,49	15	0,940	3,02E-03
	d	13,49	20	1,030	4,35E-03
3	a	18,26	5	0,850	2,02E-03
	b	18,26	10	0,910	2,65E-03
	c	18,26	15	1,030	4,35E-03
	d	18,26	20	1,050	4,70E-03

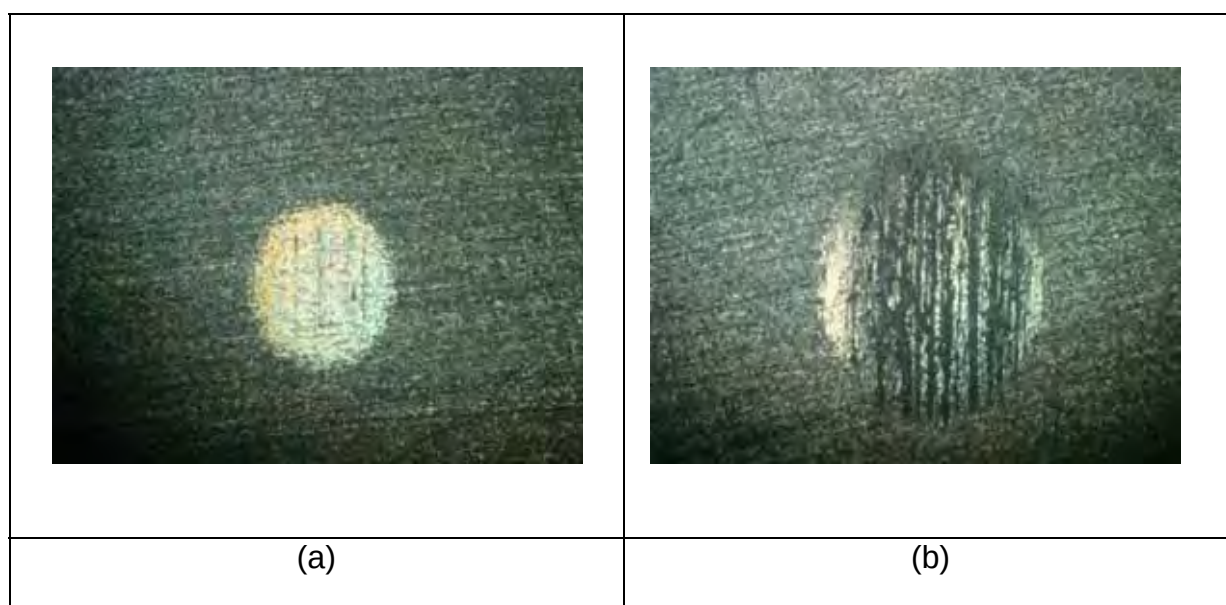


Figura 45 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

Assim com os outros compósitos estudados, a PAI com fibra de carbono e PTFE também apresentou aumento do volume desgastado com o aumento da carga aplicada e da distância de deslizamento (duração dos ensaios).

Pode-se observar, através das micrografias das crateras, que todas apresentaram riscos abrasivos paralelos, no sentido de atuação da esfera. Estes riscos abrasivos ficaram mais acentuados para os ensaios com maiores cargas. As partes mais escuras podem caracterizar o mecanismo de abrasão ou a ação de óxidos provenientes do material metálico.

5.5 Desempenho Tribológico dos Compósitos Poliméricos

As Figuras 46, 47 e 48, apresentam os resultados do desgaste volumétrico obtidos após os ensaios tribológicos de esfera sobre placa realizados durante os tempos de 5, 10, 15 e 20 minutos, com as respectivas cargas: 6,65 N, 13,49 N e 18,26 N.

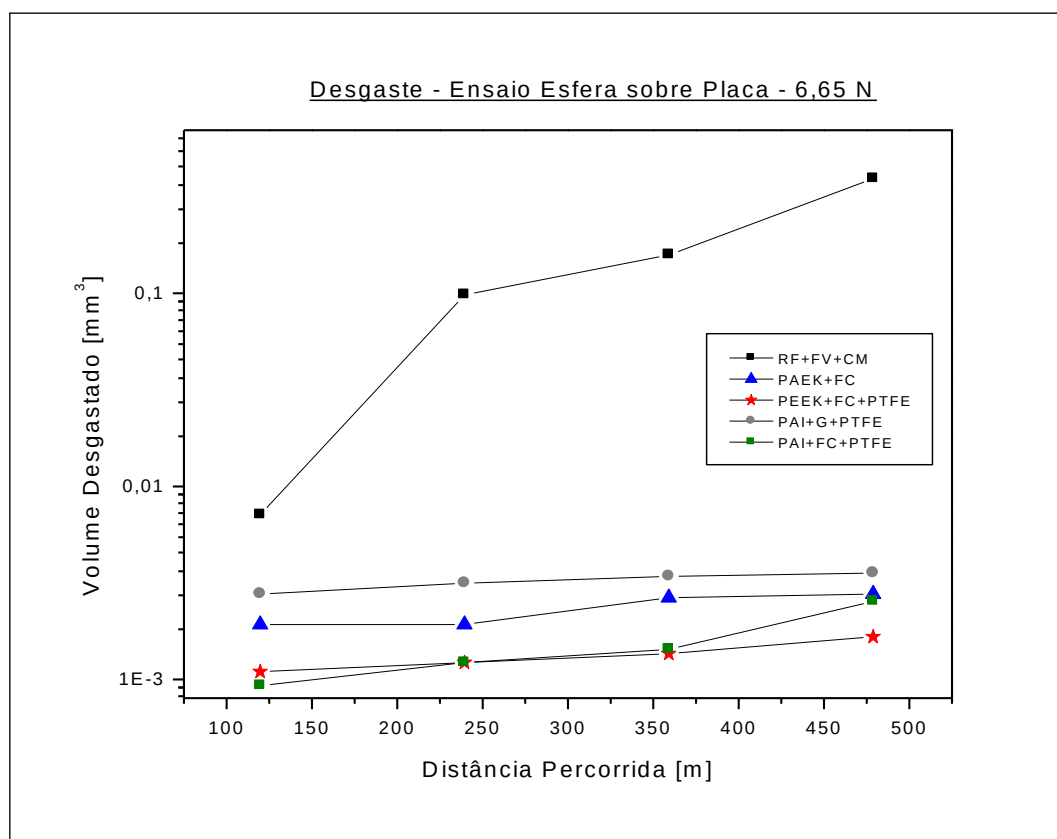


Figura 46- Gráfico do desgaste volumétrico em função da distância percorrida, com 6,65 N de carga aplicada.

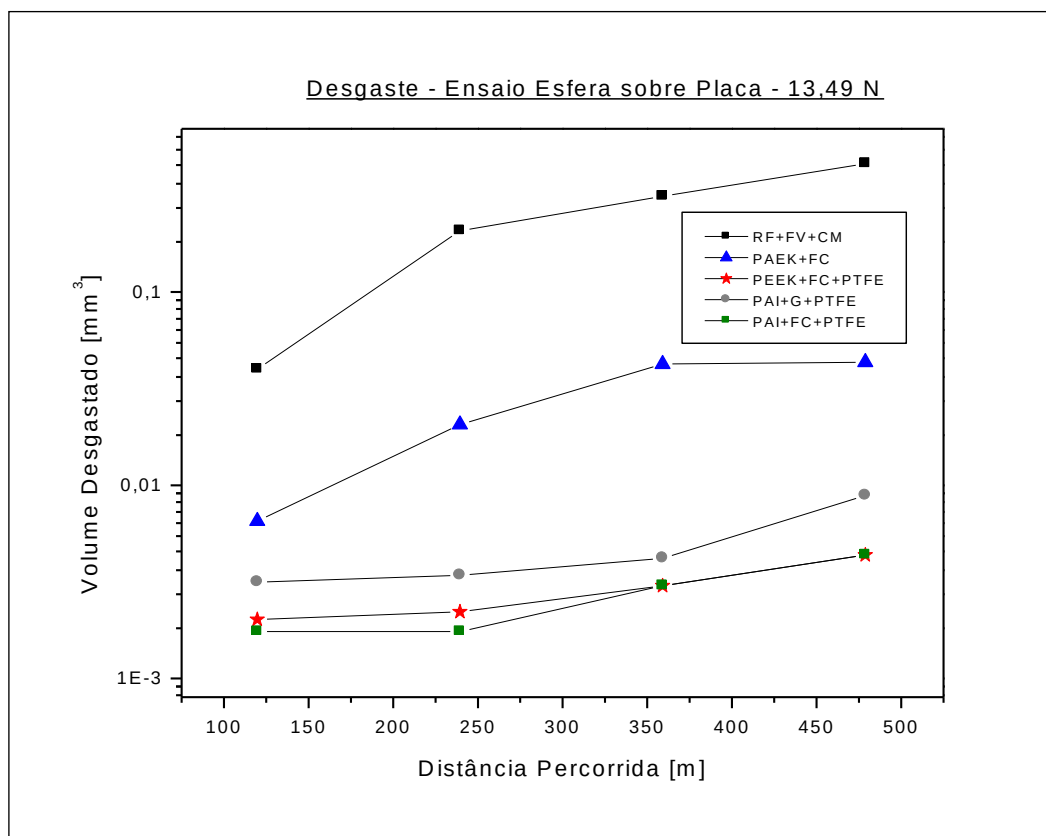


Figura 47- Gráfico do desgaste volumétrico em função da distância percorrida, com 13,49 N de carga aplicada.

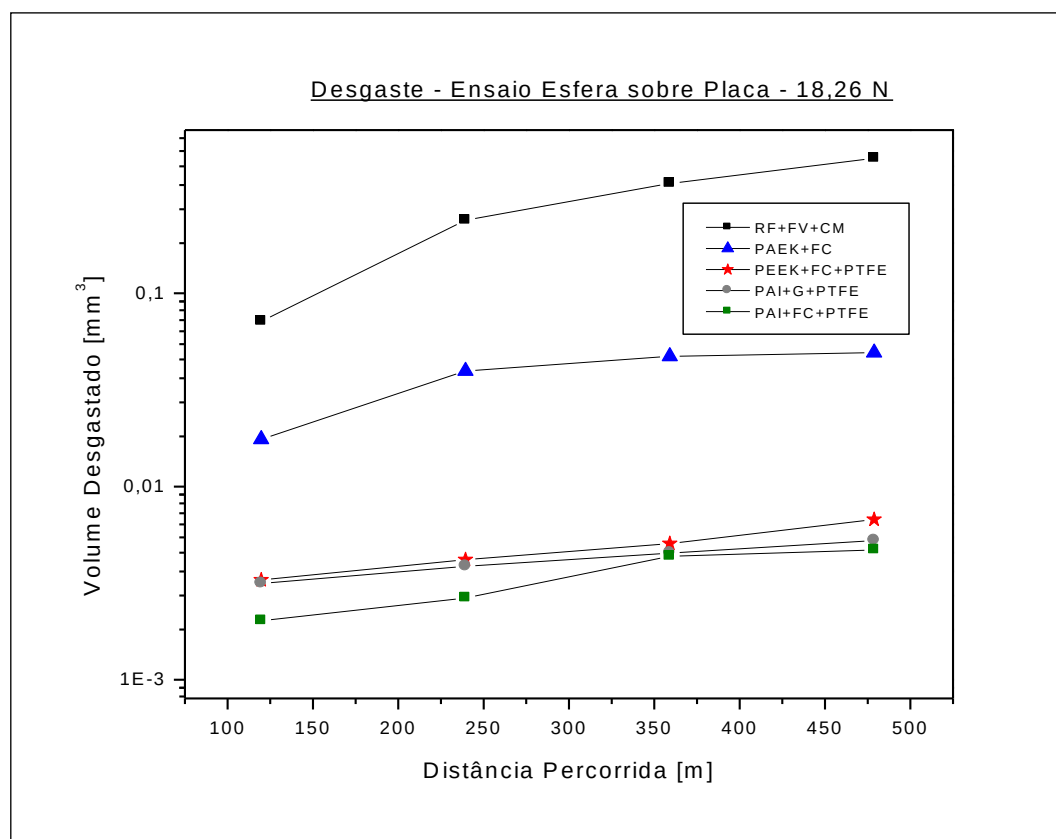


Figura 48- Gráfico do desgaste volumétrico em função da distância percorrida, com 18,26 N de carga aplicada.

Observa-se nos gráficos das Figuras 46, 47 e 48, que o corpo de prova do compósito polimérico termofixo (RF+FV+CM) apresentou os maiores valores de volume desgastado em todas as condições de ensaio. Este resultado pode ser compreendido pela estrutura deste material proveniente das ligações cruzadas, pela elevada energia superficial em comparação a um termoplástico e pela composição deste material (carga mineral e fibra de vidro), já que a fibra de vidro também representa um material frágil, podendo atuar como um agente abrasivo acentuando o desgaste.

O compósito PAEK com fibra de carbono (PAEK+FC) apresentou baixos valores de desgaste para a carga de 6,65 N, porém para as cargas de 13,49 N e 18,26 N o volume de material desgastado foi elevado em comparação com os outros compósitos termoplásticos.

Os compósitos termoplásticos de PEEK com fibra de carbono e PTFE (PEEK+FC+PTFE), PAI com fibra de carbono e PTFE (PAI+FC+PTFE) e a PAI com fibra de grafite e PTFE (PAI+G+PTFE), mantiveram boa resistência ao desgaste em todos os casos. O PTFE é um material polimérico de estrutura cristalina, que, quando incorporado na matriz polimérica, funciona como lubrificante e reduzindo a interação entre as superfícies.

No geral, todos os compósitos termoplásticos apresentaram valores de volume desgastado inferiores ao compósito termofixo.

5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS)

As crateras selecionadas para serem caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura foram as obtidas nos ensaios de 5 e 20 minutos, com as cargas de 6,65 N e 18,26 N, respectivamente. Foram gerados espectros destas mesmas crateras e os elementos presentes foram identificados com a finalidade de se observar a adesão de materiais procedentes do contra corpo metálico.

5.6.1 Compósito termofixo

A Figura 49 representa as fotomicrografias em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com uma ampliação de 250 x, das regiões desgastadas (crateras) do compósito termofixo (RF+FV+CM), provenientes dos ensaios de esfera sobre placa, realizados com as cargas de 6,65 e 18,26 N, durante 5 e 20 minutos, respectivamente.

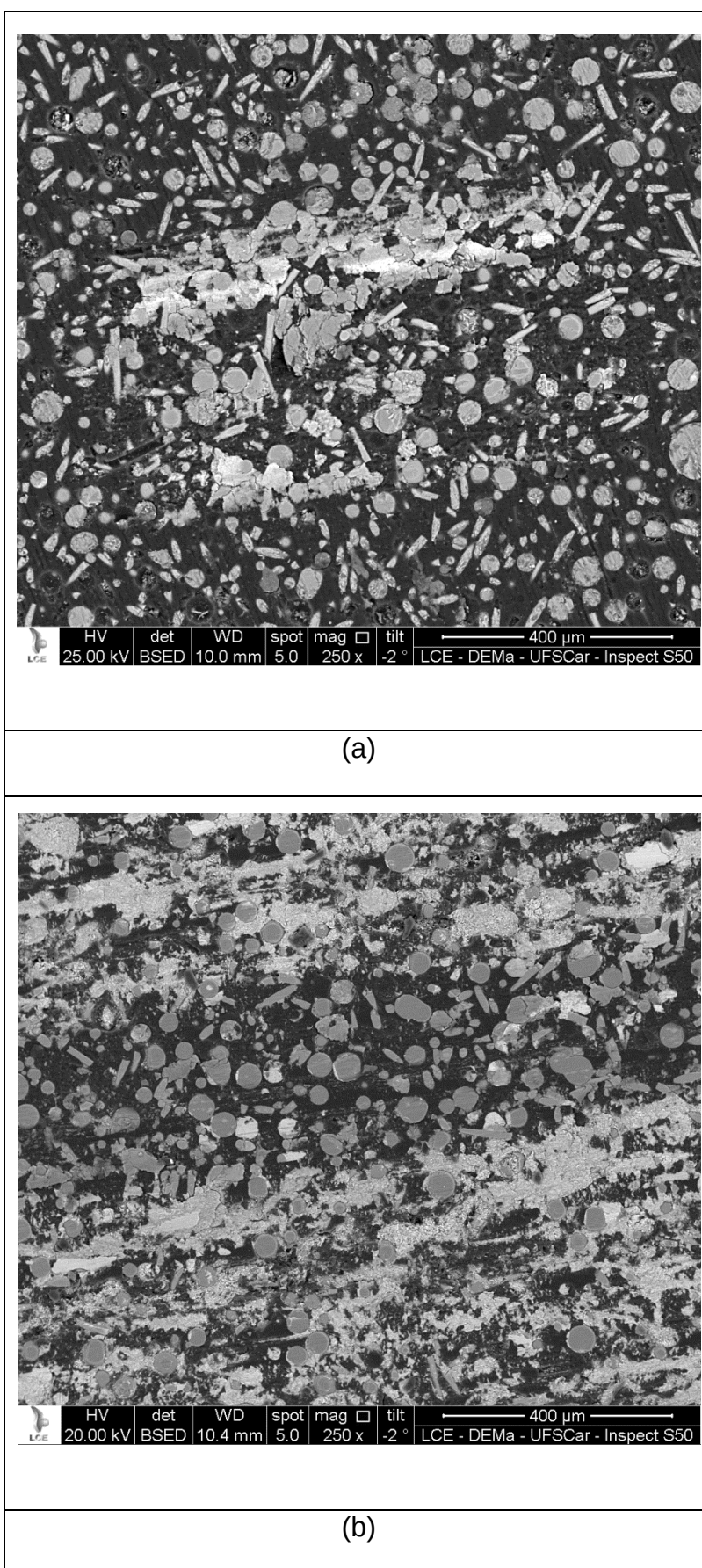


Figura 49 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com ampliação de 250 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

Pode-se observar através das Figuras 49 (a) e (b), a presença de riscos que aparecem no mesmo sentido e com maior intensidade na Figura 49 (b), onde as condições do ensaio foram mais severas. Estes riscos são provocados pelo mecanismo de abrasão a três corpos que se originam por meio das partículas rugosas (asperezas) presentes no contra corpo metálico. As asperezas, por sua vez, podem gerar partículas de desgaste (debrís) e ocasionar desgasta abrasivo a três corpos.

A Figura 50 (a) representa uma área da superfície desgastada, com ampliação de 1000 x, após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 6,65 N e com duração de 5 minutos e a Figura 50 (b) representa o espectro desta área, contendo os elementos químicos presentes. Pode-se observar que este compósito apresenta composição e estrutura heterogênea, devido à presença de cargas mineral e fibra de vidro, distribuídas de forma desorientada na matriz fenólica, dependendo da adesão destes constituintes na matriz, eles podem ser arrancados ou esmagados e acentuar o mecanismo de desgaste.

A Figura 51 (a) ilustra uma ampliação de 1000 x da área da superfície desgastada após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 18,26 N e com duração de 20 minutos e a Figura 51 (b) demonstra o espectro desta área, contendo os elementos químicos nela presentes.

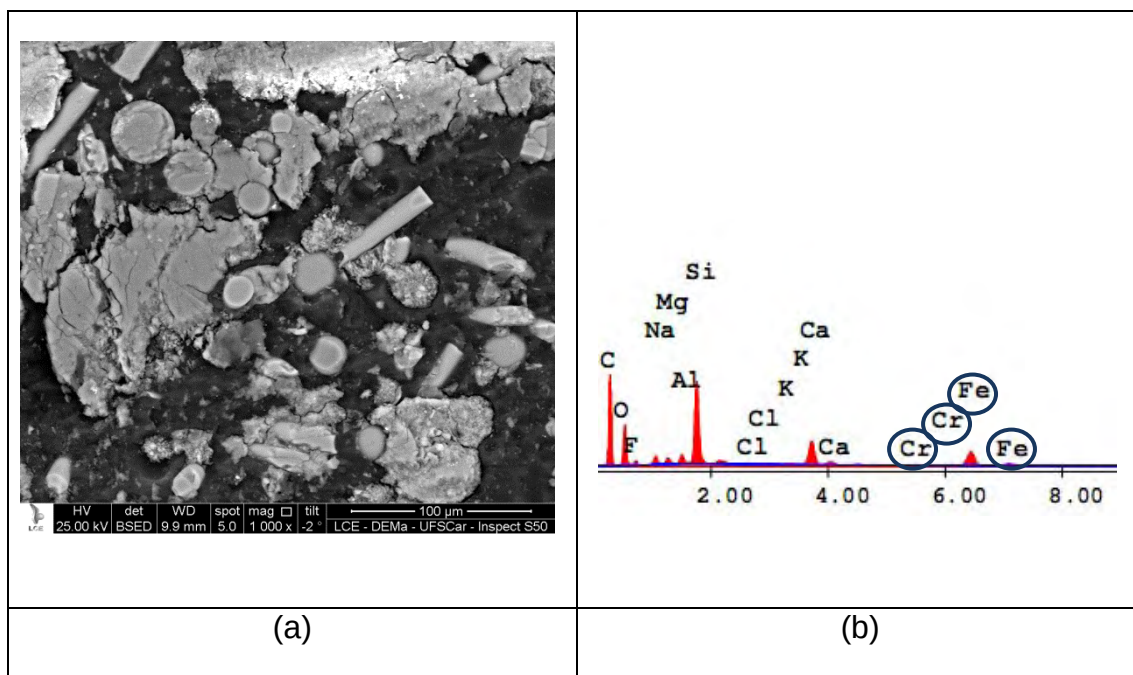


Figura 50 – Área desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

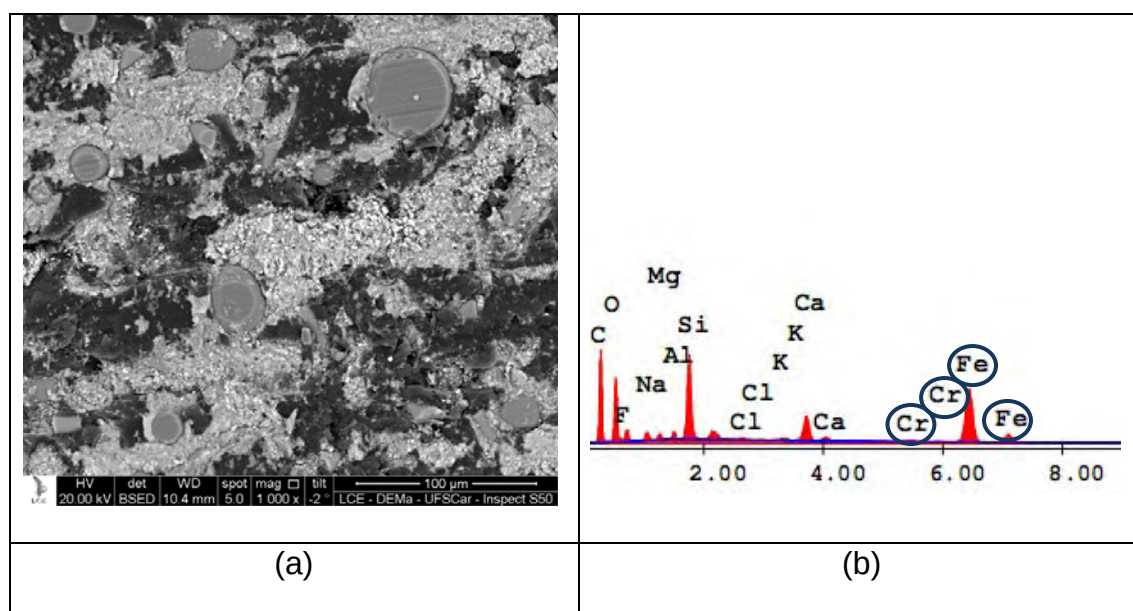


Figura 51 – Área desgastada do compósito termofixo (RF+FV+CM) com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

A crosta branca que aparece nas fotomicrografias e que segue a orientação dos riscos de abrasão pode ser identificada como sendo a fibra de vidro, que foi esmagada durante o ensaio, representando um material mais frágil e quebradiço. Pode-se observar a presença de microtrincas e o arrancamento de material.

O compósito polimérico termofixo, apresentou os maiores volumes desgastados para todas as condições ensaiadas, isto pode ser explicado pela dureza e rigidez elevada da matriz polimérica, pela presença de ligações cruzadas e pela presença da carga mineral e da fibra de vidro que podem acentuar o processo de desgaste. As partículas da carga e da fibra podem se soltar da matriz e atuar como um agente abrasivo (desgaste abrasivo a três corpos).

Através dos espectros de raios x obtidos por EDS pode-se observar a presença de elementos químicos ferro e cromo oriundos da superfície do contra corpo metálico, pelo mecanismo de abrasão e transferidos para a superfície da amostra do compósito polimérico. A presença dos elementos ferro e cromo acentuou-se no ensaio de maior duração e com maior carga.

5.6.2 Compósito PAEK

A Figura 52 demonstra as fotomicrografias em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com uma ampliação de 250 x, das regiões desgastadas (crateras) do compósito PAEK+FC, provenientes dos ensaios de esfera sobre placa, realizados com as cargas de 6,65 e 18,26 N, durante 5 e 20 minutos, respectivamente.

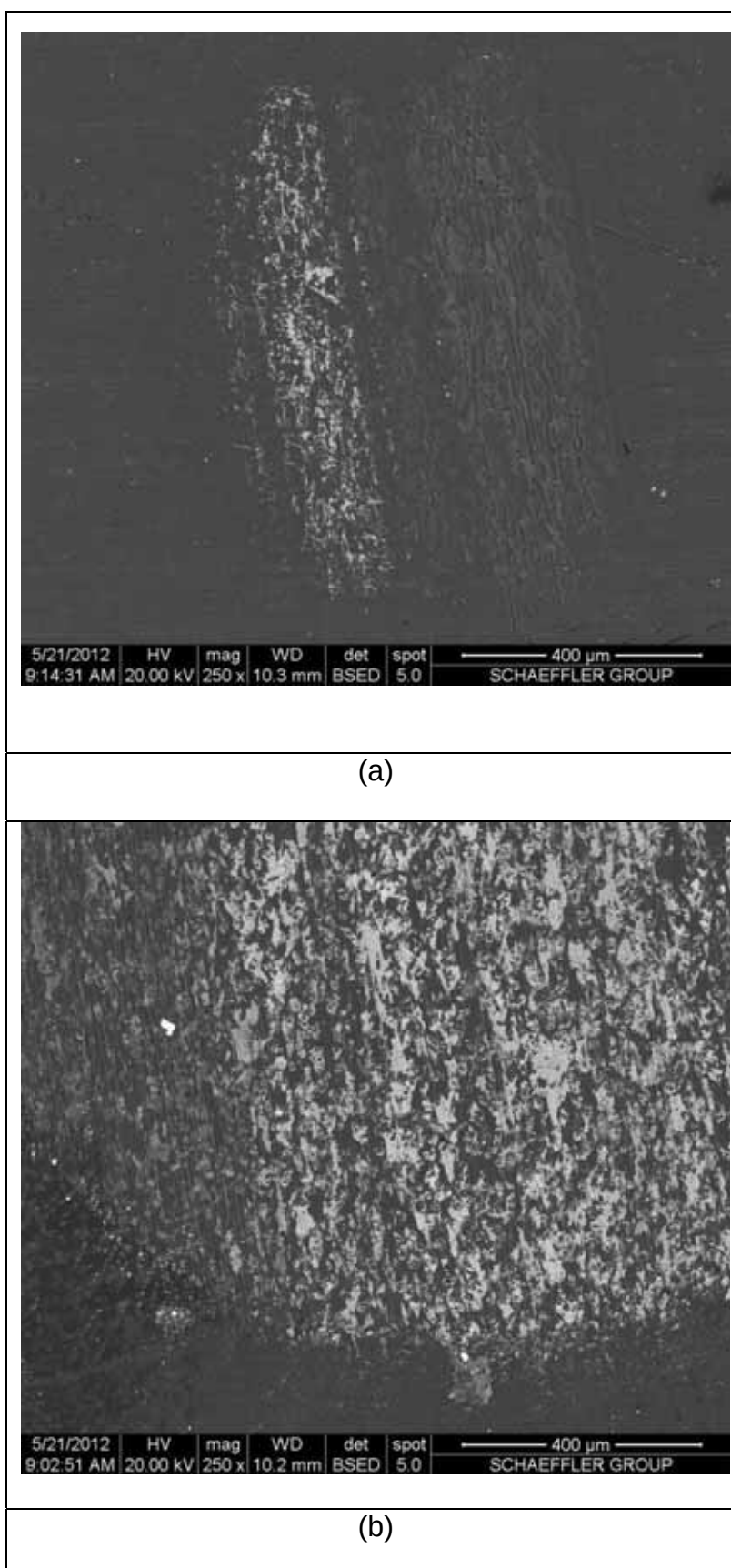


Figura 52 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PAEK+FC com ampliação de 200 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

Através das Figuras 52 (a) e (b), pode-se observar a presença de riscos abrasivos que aparecem no mesmo sentido e com maior intensidade na Figura 52 (b), onde as condições do ensaio foram mais severas. Estes riscos são originados pelas asperezas encontradas no contra corpo metálico. As asperezas geram partículas de desgaste (debrís) e induzem o mecanismo de abrasão a três corpos.

A Figura 53 (a) representa uma área da superfície desgastada, com ampliação de 1000 x, após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 6,65 N e com duração de 5 minutos e a Figura 53 (b) representa o espectro desta área, contendo os elementos químicos presentes. Pode-se observar que este compósito apresenta estrutura mais homogênea em relação ao compósito termofixo. As fibras de carbono se encontram alocadas na matriz polimérica de forma aleatória.

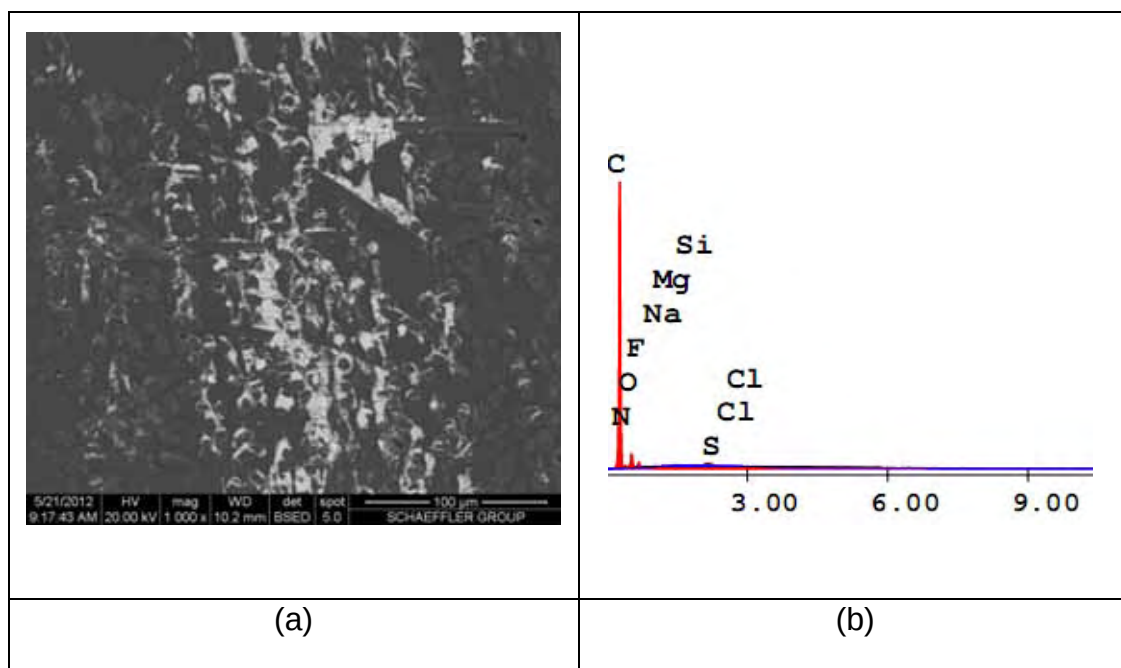


Figura 53 – Área desgastada do compósito PAEK com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

A Figura 54 (a) apresenta uma área da superfície desgastada, com ampliação de 1000 x, após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 18,26 N e com duração de 20 minutos e a Figura 54 (b) representa o espectro desta área, contendo os elementos químicos nela presentes.

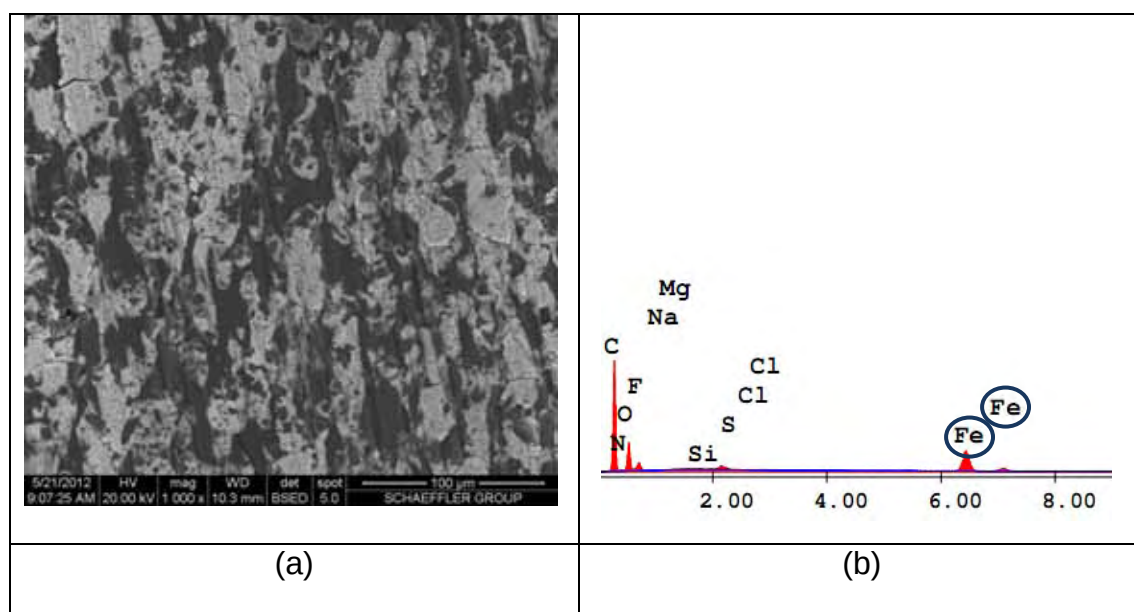


Figura 54 – Área desgastada do compósito PAEK+FC com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

Nota-se na Figura 54 (a), que algumas fibras de carbono foram arrancadas, pois é possível identificar somente o seu alojamento. HARSHA & TEWARI (2003) investigaram a incorporação dos sólidos lubrificantes PTFE e grafite e de fibras de vidro e carbono em uma matriz de PAEK. Eles observaram que o compósito de PAEK com fibra de carbono apresentou menor resistência ao desgaste comparado com o compósito de PAEK com fibra de vidro. A presença de fibras de carbono pode ocasionar o mecanismo de abrasão a três corpos, acentuando o desgaste abrasivo deste compósito, causando fraturas e/ou remoção de material (GERINGER, 2011). A Figura 55 demonstra um aumento da mesma amostra da Figura 54 (a), onde é

possível evidenciar uma crosta branca com características de um material mais frágil e quebradiço e a presença de microtrincas, microfissuras e arrancamento de material, evidenciando os mecanismos de desgaste por abrasão e por fadiga superficial.

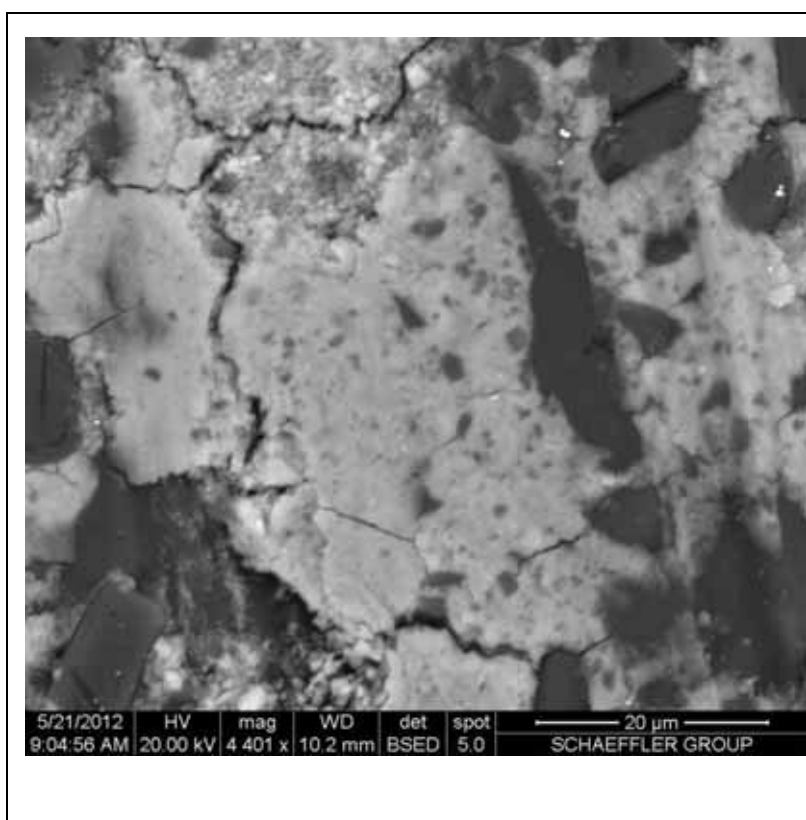


Figura 55 – MEV da área desgastada do compósito PAEK+FC com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 4401 x.

Comparando-se todas as condições ensaiadas, o compósito de PAEK+FC apresentou os maiores valores de volume desgastado dentre os compósitos termoplásticos, mas apresentou uma redução no volume desgastado, em comparação com o compósito termofixo.

Através do espectro de raios x obtido por EDS, nota-se a presença dos elementos químicos ferro e silício somente no ensaio de maior duração e com a maior carga. Conforme descrito anteriormente, os elementos ferro e silício presentes na superfície do contra corpo metálico, podem ser removidos e transferidos para a superfície da amostra devido ao mecanismo de adesão que ocorre durante o ensaio de desgaste. Neste caso, não foi detectada a presença do elemento cromo.

5.6.3 Compósito PEEK

A Figura 56 representa as fotomicrografias em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com uma ampliação de 250 x, das regiões desgastadas (crateras) do compósito PEEK+FC+PTFE, provenientes dos ensaios de esfera sobre placa, realizados com as cargas de 6,65 e 18,26 N, durante 5 e 20 minutos, respectivamente.

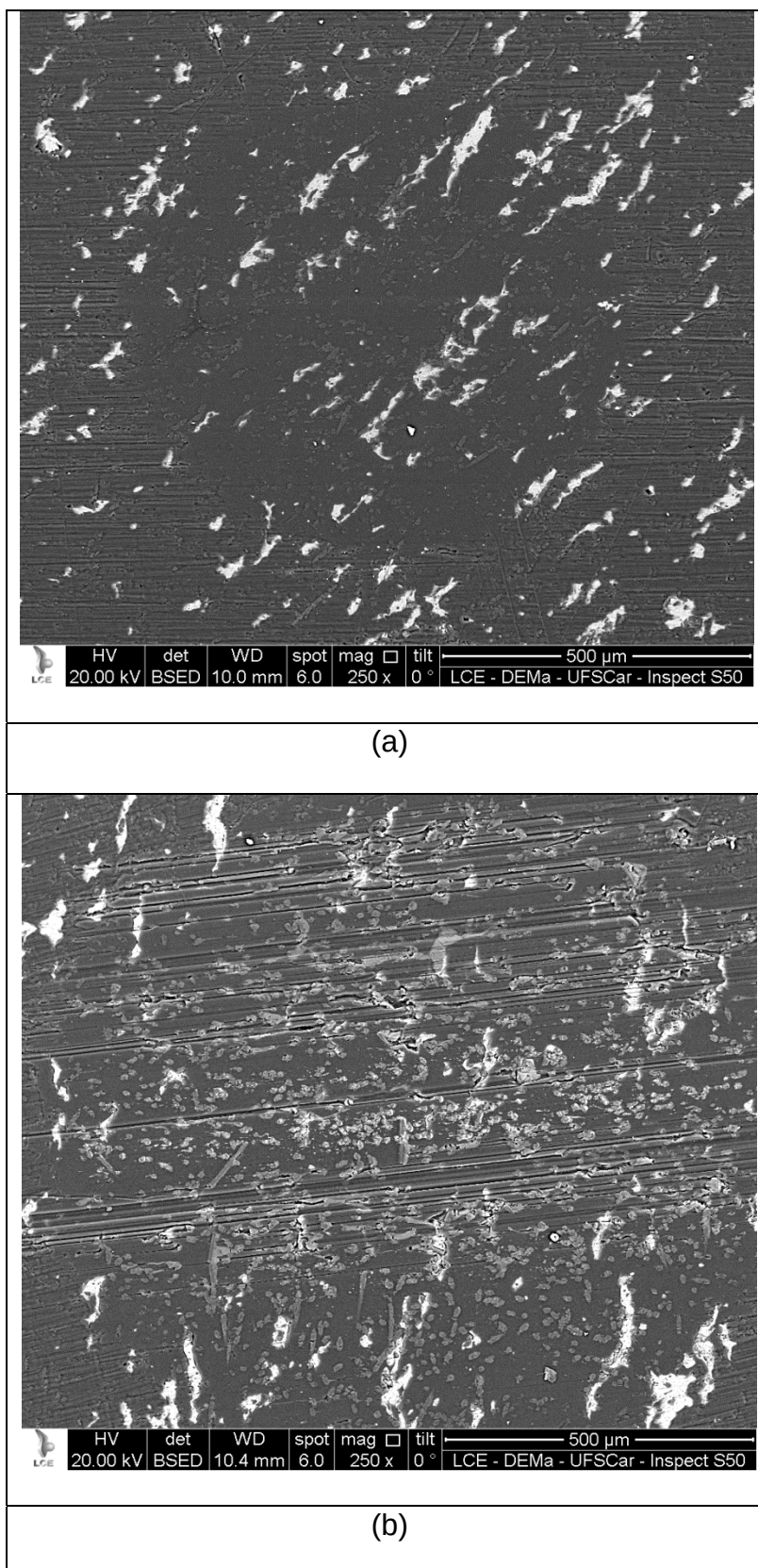


Figura 56 – (a) MEV da superfície desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com ampliação de 200 x: (a) com 5 minutos e carga de 6,65 N; (b) com 20 minutos e carga de 18,26 N.

A Figura 56 (a), não apresentou desgaste significativo, as estrias de acabamento da superfície lixada foram apenas amenizadas. Já a Figura 56 (b), apresenta riscos abrasivos com orientação paralela provocados pelo mecanismo de abrasão, conforme descrito nos capítulos 5.6.1 e 5.6.2.

A Figura 57 (a) representa uma área da superfície desgastada, com ampliação de 1000 x, após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 6,65 N e com duração de 5 minutos e a Figura 57 (b) representa o espectro desta área, contendo os elementos químicos presentes.

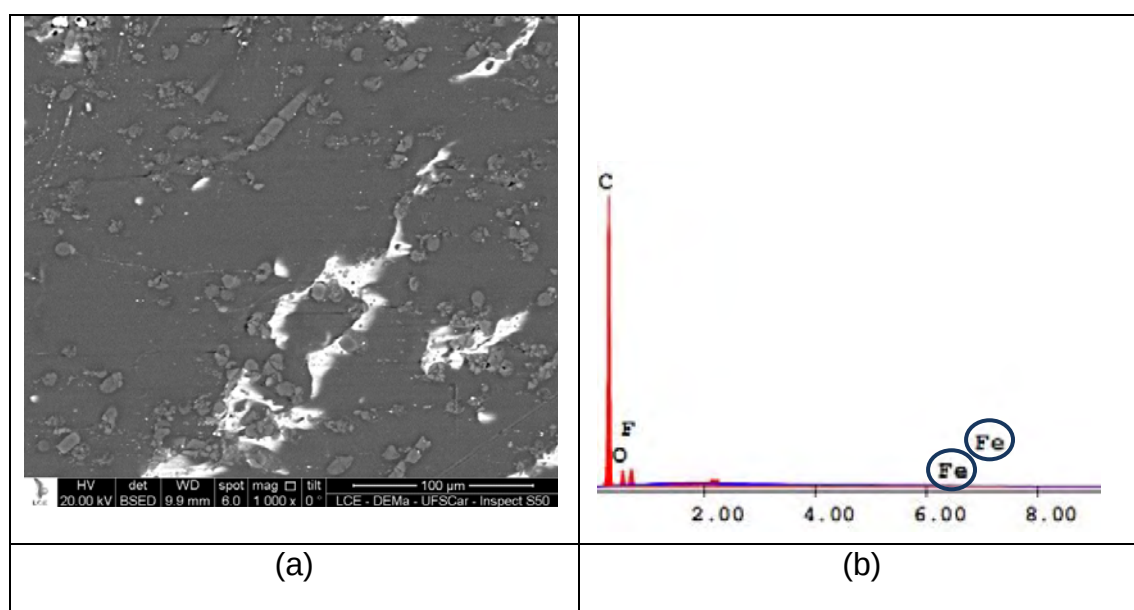


Figura 57 – Área desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

A Figura 58 (a) demonstra uma ampliação de 1000 x da área da superfície desgastada após o ensaio de esfera sobre placa com carga de 18,26 N e com duração de 20 minutos e a Figura 58 (b) demonstra o espectro desta área, contendo os elementos químicos nela presentes.

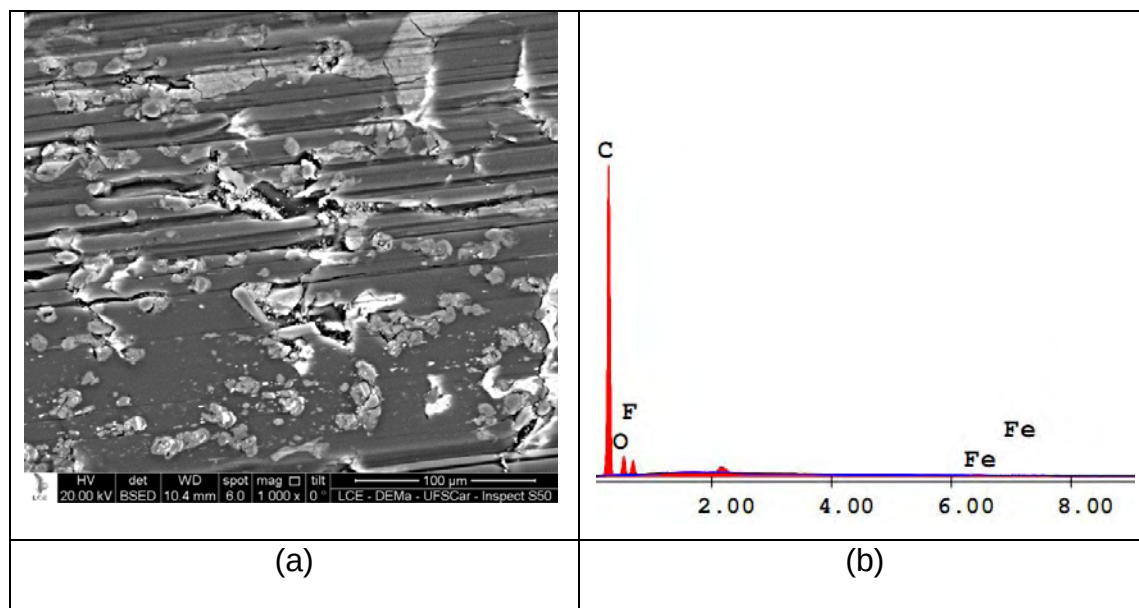


Figura 58 – Área desgastada do compósito PEEK+FC+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

Pode-se observar com a fotomicrografia da Figura 57 (a), que não houve desgaste expressivo para a carga de 6,65 N com 5 minutos de ensaio, já na Figura 58 (a), pode-se observar a presença de riscos abrasivos bem acentuados, microtrincas e o arrancamento de material.

Friedrich *et. al* (1995) estudou o desempenho tribológico de compósitos de PEEK em contato com o aço. Ele analisou a influência da incorporação do PTFE como lubrificante sólido e de fibras de vidro e carbono em uma matriz de PEEK. Para este compósito a adição de fibras de carbono melhorou a resistência ao desgaste em comparação com as de vidro. Ele observou que o PTFE interferiu no desgaste através da formação e transferência de filme polimérico.

Qiao (2007) também estudou o comportamento tribológico do PEEK em contato com aço e observou que a incorporação de 10% de PTFE na sua estrutura resultou, simultaneamente, em um decréscimo dos coeficientes de atrito e desgaste.

Através dos espectros de raios x obtidos por EDS, nota-se a presença do elemento químico ferro, procedente da superfície do contra corpo metálico, nos dois ensaios, conforme descritos nos capítulos anteriores.

O compósito de PEEK+FC+PTFE apresentou, após o compósito de PAEK+FC, os valores de volume de desgaste mais elevados dentre os termoplásticos, porém para o ensaio com a menor carga, ele apresentou boa resistência ao desgaste, sem marcas de abrasão.

5.6.4 Compósito PAI com grafite e PTFE

As Figuras 59 e 60 representam as fotomicrografias em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com uma ampliação de 1000 x, das regiões desgastadas (crateras) do compósito PAI+G+PTFE, provenientes dos ensaios de esfera sobre placa, realizados com as cargas de 6,65 N e 18,26 N, durante 5 e 20 minutos, respectivamente. Além disso, demonstram também a espectrometria por dispersão de energia das superfícies desgastadas.

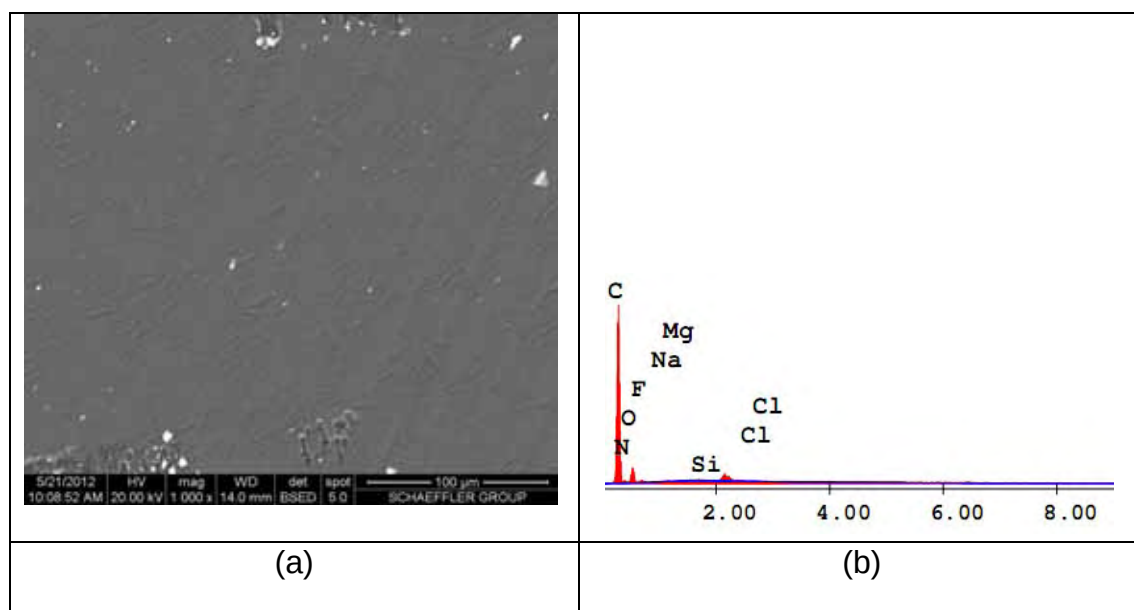


Figura 59 – Área desgastada do compósito PAI+G+PTFE com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

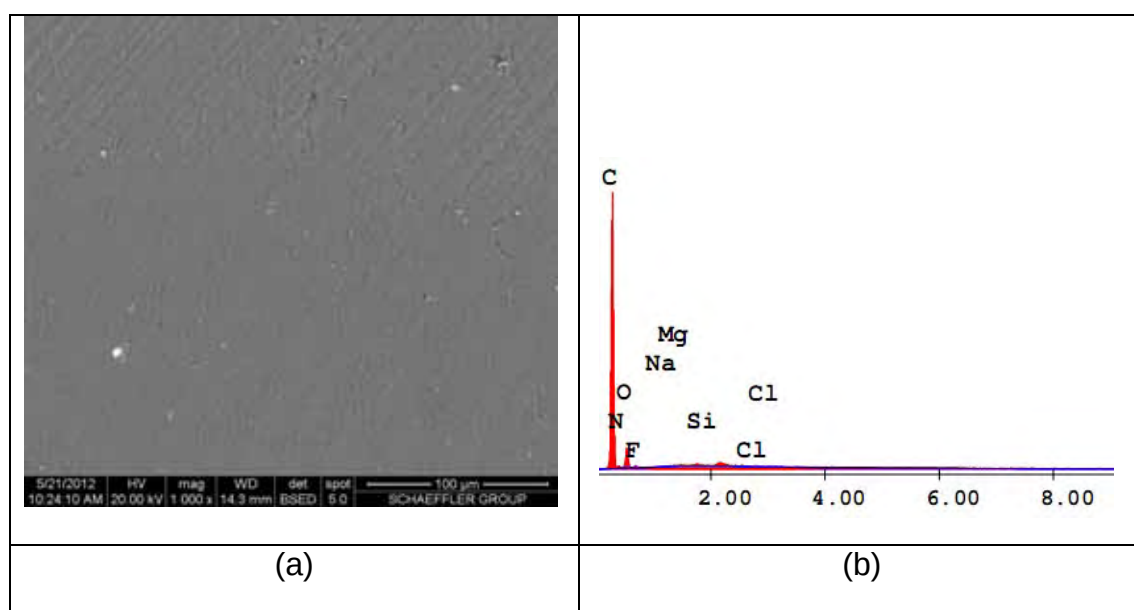


Figura 60 – Área desgastada do compósito PAI+G+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

A Figura 59 (a) demonstra a superfície do ensaio de desgaste com a menor carga durante 5 minutos. Não houve desgaste significativo, pode-se observar na

fotomicrografia as estrias procedentes das lixas utilizadas na padronização do acabamento superficial das amostras.

Nota-se através da Figura 60 (a) que a superfície do compósito que sofreu ensaio de desgaste com a maior carga durante 20 minutos, não apresenta sinais de desgaste significativo, ou seja, somente as estrias de acabamento foram amenizadas. Pode-se observar que este compósito apresenta estrutura homogênea e excelente propriedade de resistência ao desgaste.

Através dos espectros de raios x obtidos por EDS, nota-se que neste caso não foram identificadas partículas dos elementos provenientes do contra corpo metálico.

Pode-se observar que o compósito de PAI+G+PTFE não apresentou sinais de desgaste abrasivo após os ensaios tribológicos, de acordo com os valores de volume desgasta obtidos, este compósito apresentou excelente resistência ao desgaste, ficando atrás somente do compósito PAI+FC+PTFE. Com os espectros de raios-X, foi possível observar que não houve transferência de material metálico para o corpo de prova, possivelmente a estrutura deste compósito e a presença do elemento grafite que age como lubrificante, amenizaram o processo de desgaste e a possível formação de partículas abrasivas que pudessem arrancar material do contra corpo ou do corpo de prova.

Clarke e Allen (1991), notaram que o compósito de PAI com grafite, sob deslizamento em contato com aço e lubrificação com água, além de apresentar baixas taxas de desgaste, não contribuiu para o aumento da rugosidade do contra corpo. O PAI com grafite apresentou tendência em polir a face do contra corpo assegurando o contato entre os óxidos do metal e o filme polimérico, garantindo uma

superfície ótima para a adesão deste filme e consequentemente redução da taxa de desgaste.

JAIN e BAHADUR 1988 compararam o desempenho tribológico de uma PAI com um compósito de PAI com grafite e PTFE em contato com o aço. A presença destes elementos colaborou para minimizar o atrito entre as superfícies e reduzir a taxa de desgaste.

5.6.5 Compósito PAI com fibra de carbono e PTFE

A Figura 61 representa a fotomicrografia em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com uma ampliação de 250 x, da região desgastada (cratera) do compósito PAI+FC+PTFE, proveniente do ensaio de esfera sobre placa, realizado com a carga de 18,26 N, durante 20 minutos.

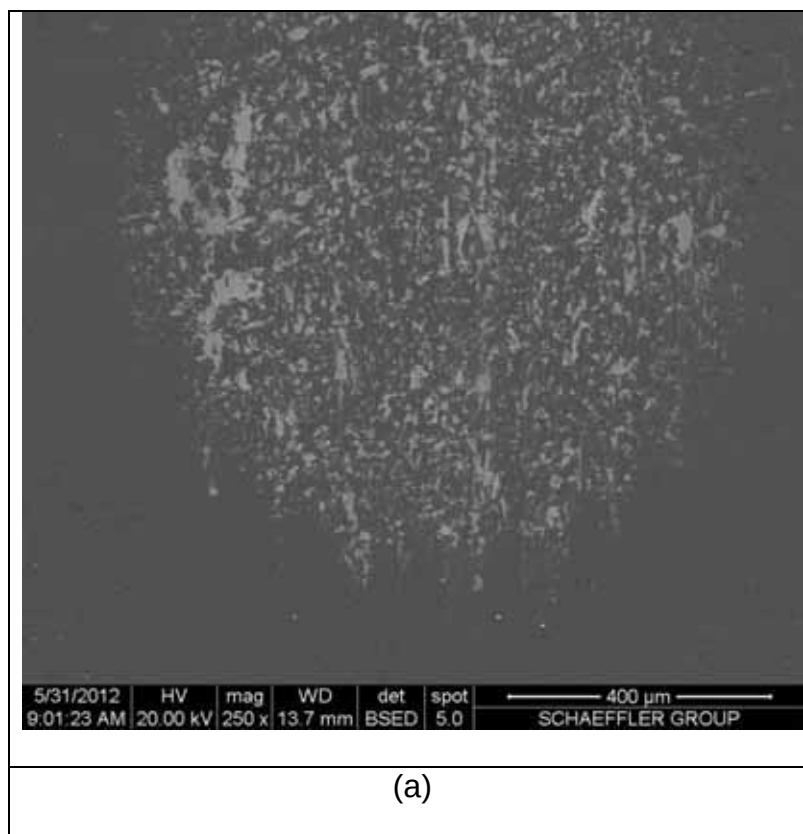


Figura 61 – Área desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 250 x: (a) MEV; (b) EDS.

Pode-se observar através da Figura 61, a presença de traços de abrasão provocados pela ação de dois corpos e que se originam por meio de partículas rugosas (asperezas) provenientes do contra corpo metálico. As asperezas, por sua vez, geram as partículas de desgaste abrasivo (deres). Para o compósito PAI+FC+PTFE, este mecanismo foi observado somente para o ensaio com a carga mais elevada e com duração de 20 minutos.

A Figura 62 (a) representa uma área da superfície desgastada, com ampliação de 1000 x, após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 6,65 N e com duração de 5 minutos e a Figura 62 (b) representa o espectro desta área, contendo os elementos químicos presentes.

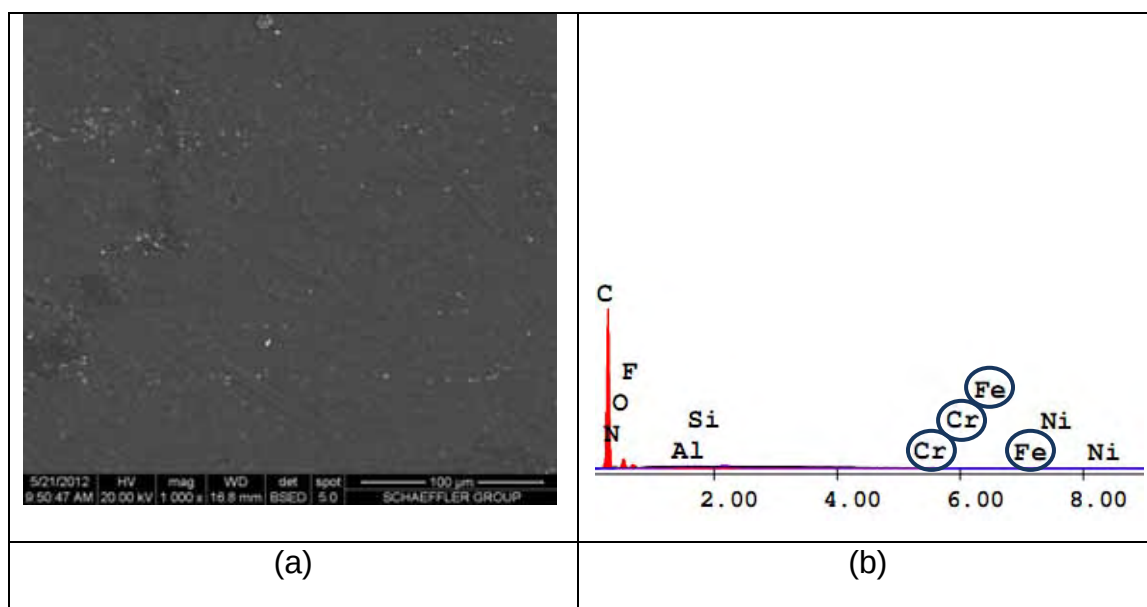


Figura 62 – Área desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com 5 minutos e carga de 6,65 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

A Figura 63 (a) representa uma área da superfície desgastada, com ampliação de 1000 x, após o ensaio de esfera sobre placa realizado com carga de 18,26 N e com duração de 20 minutos e a Figura 63 (b) representa o espectro desta área, contendo os elementos químicos presentes.

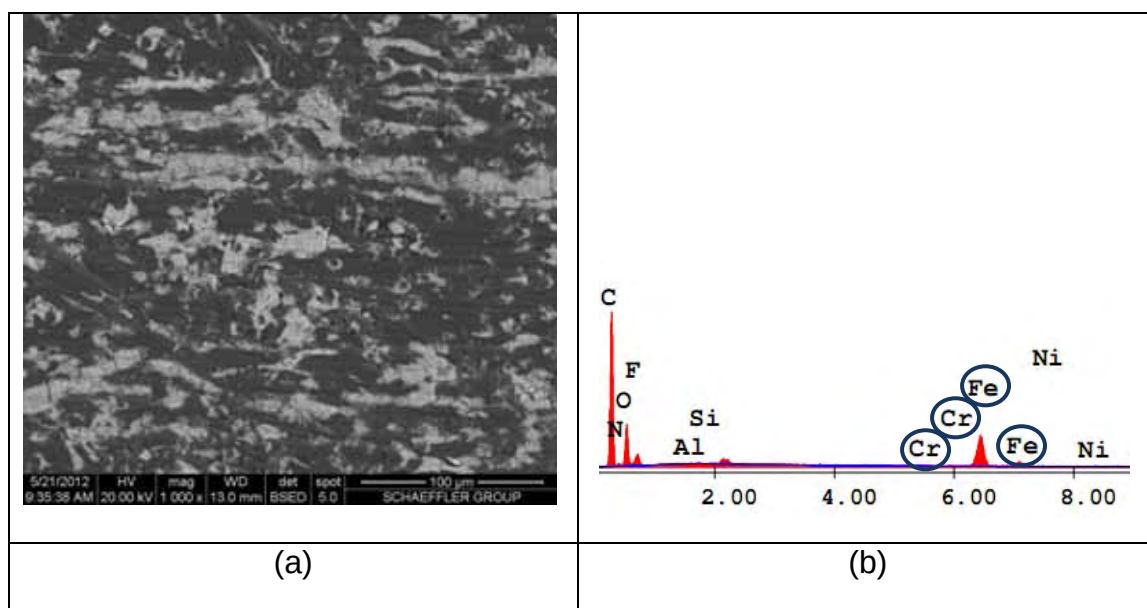


Figura 63 – Área desgastada do compósito PAI+FC+PTFE com 20 minutos e carga de 18,26 N com ampliação de 1000 x: (a) MEV; (b) EDS.

Na Figura 63, pode-se observar uma crosta branca, que também apareceu nas fotomicrografias dos compósitos anteriores e pode ser identificada como sendo o PTFE. Pode-se observar a presença de microtrincas e o arrancamento de material, além de riscos paralelos, provenientes dos mecanismos de desgaste abrasivo e por fadiga.

Através dos espectros de raios x obtidos por EDS, nota-se a presença dos elementos químicos ferro e cromo, oriundos, provavelmente da superfície do contra corpo metálico, pelo mecanismo de desgaste adesivo e transferidos para a superfície da amostra do compósito polimérico. A presença dos elementos ferro e cromo acentuaram-se no ensaio de maior duração e com maior carga.

De acordo com os valores de volume desgastado, a PAI com fibra de carbono e PTFE, apresentou valores inferiores dentre todos os materiais testados (melhor desempenho tribológico). Porém pode-se observar pela fotomicrografia da cratera formada no ensaio de maior carga, que a superfície da cratera formada neste compósito apresentou sinais de desgaste mais acentuados do que o compósito de PAI com fibra de grafite e PTFE, que a demonstrou uma estrutura mais homogênea, mesmo após os ensaios de desgaste. Este fato pode ser explicado pela presença do grafite, que serviu de agente protetivo do desgaste, em quanto que a fibra de carbono melhora as propriedades mecânicas do material.

Através dos espectros de raios x, pode-se observar, para o compósito de PAI com fibra de carbono e PTFE, que houve presença de material metálico proveniente da esfera para as duas condições analisadas. Já o compósito de PAI com grafite e PTFE não apresentou resquícios de material metálico.

6 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de desgaste de esfera sobre placa demonstram que os compósitos de matriz polimérica termoplástica apresentaram desempenho tribológico quanto ao desgaste superior ao de matriz termofixa.

Os cálculos do volume de material desgastado indicam que para todos os compósitos houve um aumento do volume removido com o aumento da carga aplicada e da distância de deslizamento (duração dos ensaios).

Os compósitos de matriz termoplástica apresentaram redução do volume desgastado de 60% a 99% em relação ao compósito de matriz termofixa.

A avaliação das crateras desgastadas como resultado do ensaio de esfera sobre placa evidenciou os mecanismos de desgaste abrasivo e por fadiga superficial.

Foram encontrados resquícios de material metálico nas crateras formadas durante os ensaios tribológicos.

No geral os ensaios de dureza Shore D apresentam resultados similares para todos os compósitos estudados e não houve correlação desta propriedade com o desempenho tribológico.

De acordo com as medições de densidade obtidas, a utilização de um compósito de matriz termofixa em substituição ao compósito de matriz termofixa ocasionaria uma redução de aproximadamente 10,1% a 17,7% no peso do produto final.

Os valores de rugosidade mostram que apesar de todos os compósitos passarem pelo mesmo tipo de acabamento superficial, os resultados apresentarem

uma flutuação e para o tipo de processo realizado, os compósitos de matriz termoplástica obtiveram melhor acabamento superficial.

Os resultados dos estudos comparativos obtidos nesta Dissertação demonstram que os compósitos de matriz termoplástica apresentaram melhor comportamento frente ao desgaste quando empregado o ensaio de esfera sobre placa em comparação com o de matriz termofixa. Com isso a substituição sugerida mostrou-se viável.

O emprego de um dos compósitos de matriz termoplástica estudados ocasionaria um melhor desempenho tribológico, redução da densidade e melhor acabamento superficial sem alteração significativa da dureza Shore D, além do que compósitos de matriz termoplástica apresentam vantagens como processabilidade e reciclabilidade.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. C. **Wear of commercially available plastic materials**. Tribology International, vol. 15, nº 5, pg. 255-263, 1982.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness / ASTM D 2240**. West Conshohocken, 2005.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement / ASTM D792**. Conshohocken, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry / ASTM D 3418**. Conshohocken, 2008.

ASM Handbook Volume 18: **Friction, Lubrification, and Wear Technology**. 1992.

AvaSpire® AV-621 CF30 Polyaryletherketone. Technical data. **Solvay Specialty Polymers**, São Paulo, 2010.

BEKHET, N. E. **Tribological behaviour of drawn polypropylene**. Wear, vol. 236, pg. 55–61, 1999.

BRISCOE, B. **Wear of polymers – an essay on fundamental - aspects** Tribology International, vol. 14, nº 4, pg. 231-243, 1981.

BUSHAN, B.; GRUPTA, B. R. **Handbook of Tribology – Materials Coatings and Surface Treatments**. Ed. Krieger Publishing Company Malabar, Florida, 1997.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Ed. LTC., Rio de Janeiro – RJ, 2008.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. Ed. ArtLiber, São Paulo – SP, 2004.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. Ed. McGraw-Hill, São Paulo – SP, 1986.

CLARKE, C. G.; ALLEN, C. **The water lubricated, sliding wear behaviour of polymeric materials against steel**. Tribology International, vol. 24, nº2, pg. 109-118, 1991.

CZICHOS, H. **Influence of adhesive and abrasive mechanisms on the tribological behavior of thermoplastics polymers**. Wear, vol. 88, pg. 27- 43, 1983.

DAVIM, J. P.; CARDOSO, R. **Tribological behaviour of the composite PEEK-CF30 at dry sliding against steel using statistical techniques**. Materials and Design, vol. 27, pg. 338–342, 2006.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem / DIN 4760**. Berlin, 1982.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Verschleiss Begriffe, Systemanalyse von Verschleissvorgängen, Gliederung des Verschleissgebietes / DIN 50320**. Berlin, 1979.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. 2º Ed, São Carlos: EDUFScar, 2007.

FREITAS, E. S. R. **Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FRIEDRICH, K.; LU, Z.; HAGER, A. M. **Recent advances in polymer composites' tribology**. Wear, vol. 190, pg. 139 – 144, 1995.

FRIEDRICH, K.; ZHANG, Z.; SCHLARB, A. **Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites**. Composites Science and Technology, vol. 65, pg. 2329 – 2343, 2005.

FRIEDRICH, K.; KNÖR, N.; ALMAJID, A. A. **Processing–structure–property relationships of thermoplastic nanocomposites used in friction and wear applications.** Mechanics of Composite Materials, vol. 48, nº. 2, pg. 179-192, 2012.

GAHR, K. H. Z. **Microstructure and Wear of Materials.** Ed. Elsevier, Amsterdam, 1987.

GANT, A. J.; GEE, M. G. **A review of micro-scale abrasion.** Jornal of Physics D: Applied Physics, vol. 44, 2011.

GEE, M. G., et al. **Progress towards standardization of ball cratering .**Wear, vol. 255, pg. 1–13, 2003.

GERINGER, J.; TATKIEWICZ, W.; ROUCHOUSE, G. **Wear behavior of PAEK, poly(aryl-ether-ketone), under physiological conditions, outlooks for performing these materials in the field of hip prosthesis.** Wear, vol. 271, pg. 2793– 2803, 2011.

HARSHA, A.P.; TEWARI, U. S. **Two-body and three-body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites.** Polymer Testing, vol. 22, pg. 403-418, 2003.

HEMAIS, C. A. **Polímeros e a indústria automobilística.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, pg. 107-114, 2003.

HONG, U. S., et al. **Wear mechanism of multi phase friction materials with different phenolic resin matrices.** Wear, vol. 266, pg. 739–744, 2009.

HOLLANDER, A. E.; LANCASTER, J. K. **An application of topographical analysis to the wear of polymers.** Wear, vol. 25, pg. 155-170, 1973.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** Ed. Edward Arnold, London, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Metallic Materials: Rockwell Hardness Test. Part 1: Test Method (Scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) / ISO 6508-1.** Estados Unidos, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Heat-Treated Steels, Alloy Steels and Free-Cutting Steels. Part 17: Ball and Roller Bearing Steels / ISO 683-17.** Estados Unidos, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Plastics - Methods for Determining the Density of Non-Cellular Plastics. Part 1: Immersion Method, Liquid Pyknometer Method and Titration Method / ISO 1183-1.** Estados Unidos, 2004.

JAIN, V. K.; BAHADUR, S. **Tribological behavior of unfilled and filled poly (amide-imide) copolymer.** Wear, vol. 123, pg. 143 - 154, 1988.

LANCASTER, J. K. **Abrasive wear of polymers.** Wear, vol. 14, PG. 223–239, 1969.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Mapping rail wear regimes and transitions.** Wear, vol. 257, pg. 721-729, 2004.

LHYMN, C.; TEMPELMEYER, K. E.; DAVIS, P. K. **The abrasive wear of short fibre composites.** Composites, vol. 16, nº 2, pg. 127-136, 1985.

LIMA da SILVA, R.C. **“Mecanismos de Desgaste de Poliuretano em Ensaios de Microabrasão.”** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

MATERIAL PROPERTY DATA. Disponível em: <http://www.matweb.com>. Acessado em 31/05/2012.

MEDINA, H. V. **O Automóvel que os Consumidores não Conhecem: Inovações em Materiais e Processos na Produção de Motores.** Rio de Janeiro, 2002.

MEDEIROS, J. T. N. **“Fadiga de Contato de Discos Metálicos não Conformes Submetidos a Ensaio a Seco de Rolamento Cíclico.”** Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, 2002.

MENEZES, P. L.; *et al.* **Friction and transfer layer formation in polymer–steel tribo-system: role of surface texture and roughness parameters.** Wear, vol. 271, pg. 2213–2221, 2011.

MYSHKIN, N.K.; PETROKOVETS, M.I.; KOVALEV, A.V. **Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer.** Tribology International, vol. 38, PG. 910–921, 2005.

PERSSON, B. N. J. **Sliding Friction: Physical Principles and Applications.** Series: Nanoscience and technology. Ed. Springer, Stuttgart, 2000.

QUNFENG, C. *et al.* **Morphological and Spatial Effects on Toughness and Impact Damage Resistance of PAEK-toughened BMI and Graphite Fiber Composite Laminates.** Chinese Journal of Aeronautics, vol. 22, pg. 87-96, 2009.

QIAO, H. B. *et al.* **A study on friction and wear characteristics of nanometer Al₂O₃/PEEK composites under the dry sliding condition.** Tribology International , vol. 40, nº 1, pg. 105–110, 2007.

RAMALHO, A.; MIRANDA, J.C. **The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems .**Wear, vol. 260, pg. 361-367, 2006.

REINICKE, R., HAUPERT, F., FRIEDRICH, K. **On the tribological behavior of selected, injection moulded thermoplastic composites.** *Composites*, vol. 29, A Part A, pg. 763-771, 1998.

RODRIGUES, A. A. **“Investigação das Características Tribológicas e Ambientais de Termoplásticos de Engenharia Especiais para Uso em Materiais de Atrito.”** Tese de Doutorado. USP. São Paulo, 2007.

ROTTLER, J.; ROBBINS, M. O. **Macroscopic friction laws and shear yielding of glassy solids.** Computer Physics Communications, v.169, p.177-182, 2005.

SANTOS NETO, A. O.; MANCINI, S. D. **“Comparação de Aspectos Tribológicos da Poli(ftalamida) Reforçada com Fibra de Vidro frente Aço Alto Carbono.”** In: 18º SAE Internacional. São Paulo–SP, 2009.

SANTOS NETO, A. O.; MANCINI, S. D. **“Caracterização de Aspectos Tribológicos da Poliftalamida – PPA, Utilizando o Método de Esfera sobre Placa.”** In 10º Congresso Brasileiro de Polímeros – CBPol. Foz do Iguaçu – PR, 2009.

SILVA, C. H. **“Degradação de UHMWPE e de POM Devido à Ação Tribológica contra Aço Inoxidável e Alumina.”** Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, 2003.

SILVA, J. C. S. **“Avaliação Tribológica dos Polímeros NBR, PTFE E PTFE Grafitado em Contato com o Aço AISI 52100.”** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Estados Unidos, 2005.

STOETERAU, R.L. **Tribologia** (EMC 5315). UFSC, 2004.

TORLON 4275® polyamide-imide. Technical data. **Solvay Specialty Polymers**. São Paulo, 2012.

TORLON 4645® polyamide-imide. Technical data. **Solvay Specialty Polymers**. São Paulo, 2012.

Trezona, R. I.; Hutchings, I. M. **Three-body abrasive wear testing of soft materials**. *Wear*, vol. 233–235, pg. 209–221, 1999.

UNAL, H.; SEN, U.; MIMAROGLU, A.; KADIOGLU, U.; EKIZ, H. **Sliding friction and wear behavior of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions**. *Materials and Design*, vol. 25, pg. 239-245, 2004.

UNAL, H.; SEN, U.; MIMAROGLU, A. **Abrasive wear behaviour of polymeric materials**. *Materials and Design*, vol. 26, pg. 705-710, 2005.

VICTREX® PEEK™ . Datasheet. **High performance polymers**. Reino Unido, 2009.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia – Tecnologia e Aplicações**. Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005.

WILLIAM, J. A. **The behaviour of sliding contacts between non-conformal rough surfaces protected by 'smart' films**. *Tribology Letters*, vol. 17, nº 4, pg. 765-778, 2004.

YOUSIF, B.F.; EL-TAYEB, N.S.M. **Wear characteristics of thermoset composite under high stress three-body abrasive.** Tribology International, vol.43, n°12, pg. 2365–2371, 2010.

ZHANG, Z.; BREIDT, C.; CHANG, K.; FRIEDRICH, K. **Wear of PEEK composites related to their mechanical performances.** Tribology International, vol. 37, pg. 271-277, 2004.