

Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”.
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

Antônio de Oliveira Santos Neto

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE PPA/FIBRA DE VIDRO
PARA APLICAÇÃO EM BOMBAS DE ÓLEO DE MOTORES DE MOTOCLETAS**

SOROCABA

2010

Antídio de Oliveira Santos Neto

**TÍTULO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE PPA/FIBRA DE
VIDRO PARA APLICAÇÃO EM BOMBAS DE ÓLEO DE MOTORES DE
MOTOCLETAS**

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

SOROCABA

2010

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ANTÍDIO DE OLIVEIRA SANTOS NETO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS DE BAURU.**

Aos 30 dias do mês de novembro do ano de 2010, às 14:00 horas, no(a) Auditório da UNESP - Campus Experimental de Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI do(a) Campus Experimental de Sorocaba, Profa. Dra. SANDRA ANDREA CRUZ do(a) Centro de Engenharia / Universidade Federal do ABC, Profa. Dra. MARIA ODILA HILARIO CIOFFI do(a) Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ANTÍDIO DE OLIVEIRA SANTOS NETO, intitulado "CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS PARA APLICAÇÃO EM BOMBAS DE ÓLEOS DE MOTORES DE MOTOCICLETAS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI



Profa. Dra. SANDRA ANDREA CRUZ



Profa. Dra. MARIA ODILA HILARIO CIOFFI

NOVO TÍTULO:

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE PPA/FIBRA DE VIDRO PARA APLICAÇÃO EM BOMBAS DE ÓLEO DE MOTORES DE MOTOCICLETAS



SANDRO DONNINI MANCINI

ORIENTADOR

Dedico este trabalho a meu filho Daniel Henrique Farias de Oliveira Santos e minha esposa
Marli de Fátima Farias Santos.

AGRADECIMENTOS

A Du Pont pelas amostras de compósitos.

Ao Grupo Schaeffler pelo apoio.

Ao Prof^o. Dr. Sandro Donnini Mancini pela orientação e dedicação.

À Prof^a. Dra. Maria Odila Hilário Cioffi pela análise de DMA.

Ao Prof. Dr. Luiz Edmundo Castelleti pelo conhecimento transmitido no que tange a tribologia.

Ao Msc. Fábio Renato Sirbone pelo profissionalismo e auxílio.

Aos colaboradores Eduardo Murbach, Victor Germano e Flávia Silva de Souza pelo apoio técnico. A Gilvan Silva pela análise MEV.

Ao amigo Odair da Silva Campos pelo companheirismo e incentivo.

Aos meus pais Carlos Eduardo e Maria Cláudia pelo exemplo, amor e dedicação.

À minha esposa Marli e ao meu filho Daniel pela eterna compreensão, cooperação, fé, apoio e por seu louco e infinito amor.

À DEUS pela dádiva da vida e a Jesus Cristo por sua misericórdia.

SANTOS NETO, A.O. **Avaliação do desempenho de compósitos de ppa/fibra de vidro para aplicação em bombas de óleo de motores de motocicletas.** 2010. 151f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) – UNESP, Sorocaba, 2010.

RESUMO

Termoplástico de muitas qualidades, em especial a manutenção das propriedades mecânicas sob temperaturas medianas, a poliftalamida - PPA, é uma das muitas alternativas para a substituição de materiais metálicos em aplicações que envolvam desgaste, resistência térmica, estabilidade dimensional e química, exigência de baixo peso e custo, além de flexibilidade de *design*. Neste trabalho foram analisadas, visando à substituição de materiais metálicos tradicionais usualmente empregados em bombas de óleo de motocicletas, diversas propriedades de compósitos tendo como matriz a poliftalamida: um deles com a fibra de vidro como reforço e outro com a fibra e com politetrafluoretileno - PTFE. O estudo foi dividido em duas grandes partes, sendo uma a caracterização do comportamento tribológico do compósito em três diferentes testes, objetivando determinar as taxas de desgaste sobre pressão e velocidades controladas, e outra, a caracterização de propriedades gerais após submeter cada compósito a envelhecimento em óleo e temperatura. Com relação à segunda parte, análises de DSC e TG foram realizadas antes e após o envelhecimento, enquanto propriedades mecânicas como tração, impacto e dureza foram medidas para avaliar a manutenção das mesmas após envelhecimento. A técnica de análise dinâmico-mecânica foi utilizada para obter valores dos módulos elástico, de dissipação viscosa e complexo. Os resultados dos ensaios de desgaste demonstraram o bom comportamento do compósito frente aos materiais metálicos com redução na taxa de desgaste, sobretudo frente ao alumínio. Os ensaios de tração, impacto, densidade, DSC e TG demonstraram a manutenção das propriedades mecânicas e térmicas, mesmo após envelhecimento em óleo. Foi comprovado a possibilidade de emprego dos *grades* deste material na aplicação bomba de óleo e validado *design* com ganho de desempenho em baixas rotações de até 7%.

Palavras-chave: poliftalamida; bomba de óleo; compósitos; atrito e desgaste; substituição de metais.

SANTOS NETO, A.O. **Evaluation of the performance of PPA/Fiber glass composites for oil pump motorcycles engines application.** 2010. 151p. Dissertation (Mastering Degree on Material Science and Techonology) – UNESP, Sorocaba, 2010.

ABSTRACT

Thermoplastic of many qualities, in special the maintenance of the mechanical properties under medium temperatures, the polyphthalamide - PPA, is one of the many alternatives for the substitution of metallic materials in applications that involve wear, thermal resistance, dimensional and chemical stability, requirement of low weight and cost, beyond flexibility of design. In this work diverse properties of this material had been analyzed aiming at to the substitution of usually used traditional metallic materials in oil pumps of motorcycles. The study it was divided in two great areas, being the one characterization of the tribological behavior of composite in three different tests objectifying the controlled wear rate on pressure and speeds, and another the characterization of general properties after the material to be submitted the aging in oil and temperature. Analysis of DSC and TG had been carried through before and after the aging. Mechanical properties as tension, impact and hardness had been carried through to after evaluate the maintenance of same the aging. The technique of analyzes dynamic-mechanics was used to get values of the modulus: storage, loss and complex. The results of the wear assays demonstrated the good behavior of the composite front to the metallic materials with reduction in the wear rates, above all versus aluminum. The tension, impact, density, DSC and TG tests demonstrated the maintenance of the mechanical and thermal properties, even after aging in oil. It was proven the possibility of job of the grades of this material in the application oil pump and validated design with profits in low rotations of up to 7 percentile points.

Key-words: poly(phthalamide); oil pump; composites; friction and wear; metals substitution

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de motocicletas nacionais (ABRACICLO, 2010). Ano de 2010 computado somente dados até setembro.....	17
Figura 2 – Evolução da produção estimativa de motocicletas (2 e 3 rodas) – Escala Mundial.....	17
Figura 3 - Variação da porcentagem de atrito nos principais componentes de motores a combustão interna. Adaptado de INA-SCHAEFFLER KG, 2004.....	21
Figura 4 – Esquema de lubrificação em motocicletas (150cc). Manual de Serviços Honda CG 150 Titan, 2004.....	23
Figura 5 – Detalhe dos rotores das bombas de engrenagens internas (a) bomba de engrenagens; (b) bomba de gerotores. Adaptado de LINSINGEN, 2001.....	24
Figura 6 – Detalhamento interno da carcaça de uma bomba de óleo de engrenagens tipo gerotor.....	25
Figura 7 – Bomba de óleo para motocicletas – esquema.....	26
Figura 8 – Compostos químicos utilizados na obtenção da poliftalamida. Adaptado de Du Pont Engineering Polymers – Zytel HTN High Performance Resin.....	27
Figura 9 – Estrutura química das três possibilidades de conformação da poliftalamida. (GLASSCOCK <i>et al</i> , 2008).....	
Figura 10 – Parâmetros tempo-temperatura para redução dos índices de umidade em poliftalamida. Adaptado de Solvay, 2003.....	
Figura 11 – Mapa de propriedades de materiais. Adaptado de ASHBY, 1993.....	
Figura 12 – Influencia da carga aplicada no coeficiente de atrito. Adaptado de REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998, pg. 768. PA46 (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE); PPA (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE); PEI (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE); e PPS (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE).....	39
Figura 13 – Influencia da temperatura no coeficiente de atrito. Adaptado de ASM Handbook, 1992.....	40
Figura 14 – Influencia da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito. Adaptado de FEYZULLAHOGLU & SAFFAK, 2008.....	41
Figura 15 – Zonas de ocorrência de mecanismos de atrito e desgaste. Adaptado de RODRIGUES, 2007.....	42
Figura 16 – Fotomicrografias evidenciando diferentes tipos de desgaste. ASM Handbook, 1992.....	44
Figura 17 – Tipos reações de degradação comuns em polímeros (Adaptado de DE PAOLI, 2008).....	45
Figura 18 – Fluxograma das atividades a serem realizadas, no qual FMEA é análise de modo de efeito e falha, MEV é microscopia eletrônica de varredura, FTIR é espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier, DSC é calorimetria exploratória diferencial, TGA é análise termogravimétrica, DMA é análise dinâmico-mecânica, FEA é análise de elementos finitos.....	53
Figura 19 – Determinação das áreas máxima e mínima conforme Equação 1.....	55
Figura 20 – Posicionamento do sensor de rotação.....	57
Figura 21 – Posicionamento dos sensores de pressão e vazão.....	57
Figura 22 – Câmara climática para ensaios de envelhecimento, contendo em seu interior os recipientes de vidro com as amostras.....	63
Figura 23 – Máquina de Impacto Pendular.....	69
Figura 24 – Máquina universal de ensaios MTS: a) conjunto; b) detalhe da fixação.....	70

Figura 25 – Desenho de produção do pino para ensaio conforme ASTM G99-05.....	72
Figura 26 – Perfis de desgaste passíveis de serem obtidos em ensaio pino disco, no qual a (desgaste somente no pino), b (desgaste somente na amostra) e c (desgaste em ambos)...	72
Figura 27 – Desenho esquemático da parte útil do pino conforme a norma ASTM G099-05.....	74
Figura 28 – Desenho esquemático do desgaste na pista conforme a norma ASTM G099-05.....	74
Figura 29 – Esquema do ensaio Placa sobre esfera (caloteste).....	77
Figura 30 – Detalhe da esfera atuando na placa durante o ensaio.....	78
Figura 31 – Detalhe do esgastamento (escuro), travando nos furos (carcaça) e no corpo cilíndrico (eixo) todos os graus de liberdade.....	83
Figura 32 – Detalhe da área (escuro) de aplicação de pressão.....	84
Figura 33 – Detalhe dos materiais empregados para validação do novo produto.....	84
Figura 34 – Desempenho de uma bomba de óleo original nova.....	89
Figura 35 – Desempenho de uma bomba de óleo original com 80000 km de uso.....	90
Figura 36 – Curva comparativa de vazão entre uma bomba teórica sem perdas, uma nova e uma com 80000 km de uso.....	91
Figura 37 – Curva de perdas por rotação de uma bomba nova e outra com 80000 km de uso.....	92
Figura 38 – Espectros de transmitância padrão para óleo virgem recomendado.....	93
Figura 39 – Espectros de transmitância das amostras. Virgem (vinho); Amostra 1 (vermelho); Amostra 3 (azul); Amostra 4 (preto) e Amostra 5 (verde).....	94
Figura 40 – Espectros de transmitância da amostra divergente e o padrão. Virgem (preto); Amostra 2 (azul).....	95
Figura 41 – Análise visual das condições de desgaste – comparativo. Escala 1:1.....	97
Figura 42 – Curva de termogravimetria do P35 virgem (azul), envelhecido em óleo (roxo) e envelhecido não imerso em óleo (verde).....	104
Figura 43 – Curva de termogravimetria do PF30 virgem (azul), envelhecido em óleo (roxo) e envelhecido não imerso em óleo (verde).....	105
Figura 44 – Curvas de DSC para P35, virgem (rosa e verde), envelhecida em óleo (vermelho e azul) e envelhecida não imerso em óleo (marrom e preto), bem como temperaturas e parâmetros obtidos.....	106
Figura 45 – Curvas de DSC para PF30, virgem (vermelho e azul), envelhecida em óleo (marrom e preto) e envelhecida não imerso em óleo (rosa e verde), bem como temperaturas e parâmetros obtidos.....	107
Figura 46 – Espectro FTIR da amostra de PF30.....	109
Figura 47 – Espectro FTIR da amostra de PF30 comparativo (acima) com espectro de poliftalamida pura (abaixo).....	110
Figura 48 – Espectro FTIR de um padrão de politetrafluoretileno – PTFE.....	110
Figura 49 – Desgaste nos discos. Ensaio Pino sobre Disco, não lubrificado, no qual os pares pino/disco (PD) são: 1) 100Cr6-P35; 2) 100Cr6-PF30; 3) 100Cr6-Alumínio; 4) P35-PPA; 5) P35-P35; 6) P35-PF30; 7) PF30-PPA; 8) PF30-P35 e 9) PF30-PF30.....	116
Figura 50 – Aspectos visuais dos discos. Ensaio Pino sobre Disco, não lubrificado, no qual os pares pino/disco (PD) são: a) 100Cr6-P35; b) 100Cr6-PF30; c) 100Cr6-Alumínio; d) P35-P35; e) P35-PF30; f) PF30-P35 e g) PF30-PF30.....	117
Figura 51 – Aspectos de perfilometria tridimensional. Ensaio <i>reciprocating</i> lubrificado.	118

a)100Cr6-PF30; b) 100Cr6-Alumínio; c) P35-P35; d) P35-PF30; e) PF30-P35 e f) PF30-PF30.....	
Figura 52 – Desgaste nos discos. Ensaio <i>reciprocating</i> , lubrificado, no qual os pares pino/disco (RC) são: 1) aço sinterizado-alumínio; 2) P35-P35; 3) P35-PF30; 4) PF30-P35 e 5) PF30-PF30.....	118
Figura 53 – Desgaste na placa. Ensaio Esfera sobre Placa, lubrificado e não lubrificado, no qual os materiais da placa são: EP1 e EP4:PPA; EP2 e EP5:P35; EP3 e EP6:PF30.....	119
Figura 54 – Desgaste na placa. Ensaio Esfera sobre Placa, não lubrificado, no qual os materiais da placa são: EP1:PPA; EP2:P35; EP3:PF30.....	120
Figura 55 – Desgaste na placa. Ensaio Esfera sobre Placa, lubrificado, no qual os materiais da placa são: EP4:PPA; EP5:P35; EP6:PF30.....	120
Figura 56 – Curva de DMA para P35 em três frequências	123
Figura 57 – Curva de DMA para PF30 em três frequências	123
Figura 58 – Fotomicrografia (MEV) do ensaio esfera sobre placa, 100Cr6 – PF30.....	125
Figura 59 – Fotomicrografia (MEV) com ampliação de 1.000 vezes do aspecto de fratura do ensaio de impacto de corpo de prova feito com o compósito PF30	126
Figura 60 – Fotomicrografia (MEV) com ampliação de 1.000 vezes do aspecto de fratura do ensaio de tração de corpo de prova feito com o compósito PF30	126
Figura 61 – Espectro EDS do ensaio de impacto, PF30, região A (fibra de reforço) da Figura 59, região (A).....	127
Figura 62 – Espectro EDS do ensaio de impacto, PF30, região B (matriz) da Figura 59 região (B).....	127
Figura 63 – Análise FEA da carcaça: Tensão de Von Mises (MPa).....	128
Figura 64 – Análise FEA da carcaça: deslocamento com deformação ampliada em 10% para visualização das áreas afetadas (mm).....	129
Figura 65 – Curva Tensão deformação fornecida pela Du Pont para P35 (Du Pont, 2003).....	130
Figura 66 – Análise FEA do eixo integrado ao rotor interno: Tensão de Von Mises (MPa).....	131
Figura 67 – Análise FEA do eixo integrado com rotor: deslocamento com deformação ampliada em 20% para visualização das áreas afetadas (mm).....	131
Figura 68 – Curva Tensão deformação fornecida pela Du Pont para PF30 (Du Pont, 2003).....	132
Figura 69 – Vista de topo do conjunto proposto montado.....	133
Figura 70 – Rotor externo e rotor interno integrado ao eixo no design proposto, conforme projetado para a eventual peça em compósito, porém fabricadas em aço 100Cr6.....	134
Figura 71 – Desempenho da bomba de óleo proposta em função da (a) quantidade de óleo bombeada por minuto e velocidade de bombeamento e (b) da temperatura do óleo e pressão atingida.....	134
Figura 72 – Curva comparativa de vazão entre uma bomba teórica sem perdas, uma nova, uma com 80000 km de uso e a proposta.....	135
Figura 73 – Curva de perdas por rotação de uma bomba nova, outra com 80000 km de uso e a proposta.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores limites de poluentes para motocicletas novas (CONAMA, 2003).....	18
Tabela 2 – Comparação de propriedades entre tipos de poliftalamida e poliamidas. (Adaptado de GLASSCOCK <i>et al</i> , 2008).....	28
Tabela 3 – Índices de mérito propostos por ASHBY, com destaque para os utilizados na Figura 11. Adaptado de FERRANTE, 2002.....	35
Tabela 4 – Determinação do NPR através da Severidade (Sever), Ocorrência (Ocorr) e Detecção (Detec). (Adaptado de AIAG,2001).....	50
Tabela 5 – Campo para atualização do processo e ações recomendadas. (Adaptado de AIAG,2001).....	50
Tabela 6 – Sensores utilizados para monitoramento de desempenho do produto atual.....	56
Tabela 7 – Caracterização dos materiais atuais. Ensaio determinados por componentes.	60
Tabela 8 – Materiais ensaiados no ensaio Esfera sobre placa.....	73
Tabela 9 – Materiais ensaiados no ensaio <i>reciprocating</i>	75
Tabela 10 – Materiais ensaiados no ensaio Esfera sob Placa.....	79
Tabela 11 – FMEA – Funções, modos de falha, efeitos, causa da falha potencial e formas de controle atual.....	87
Tabela 12 – FMEA – causa da falha potencial, formas de controle atual, as ações recomendadas e o resultado das ações e NPR comparativo.....	88
Tabela 13 – Bandas de FTIR para o óleo recomendado pelo fabricante.....	94
Tabela 14 – Bandas de FTIR para o óleo divergente (10W30).....	95
Tabela 15 – Análise quantitativa e qualitativa de impurezas de óleo lubrificantes em fim de vida de motocicletas 150cc.....	96
Tabela 16 – Análise química dos componentes do produto atual.....	99
Tabela 17 – Análise das durezas dos componentes do produto atual.....	100
Tabela 18 – Ângulo de contato nos materiais metálicos e compósitos ensaiados.....	101
Tabela 19 – Valores de energia superficial polar, dispersiva e total nos materiais ensaiados.....	102
Tabela 20 – Densidades das amostras de resina virgem e envelhecida em óleo. Resultados em g/cm ³	103
Tabela 21 – Temperaturas e entalpias de fusão – Tm/ΔHf e cristalização – Tc / ΔHc das amostras virgem e envelhecidas em óleo e a seco.....	107
Tabela 22 – Bandas de FTIR que permitem identificação da PPA.....	109
Tabela 23 – Dureza Shore D das amostras de resina virgem e envelhecida em óleo. Resultados Shore D.....	112
Tabela 24 – Valores de energia para ensaio de impacto Charpy e dimensões dos materiais ensaiados.....	113
Tabela 25 – Especificações dos corpos de prova e resultados dos ensaios de tração dos compósitos virgens e envelhecidos.....	114
Tabela 26 – Valores de módulo de armazenamento a 150°C e 100 Hz e de Tg.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 16MnCr5 – Aço liga especial para cementação, similar ao SAE 8620
- A – área [mm²]
- a.C – Antes de Cristo
- ABS – Acrilonitrila, butadieno e estireno
- AL – Alumínio SAE 383
- A_{max} – Área máxima [mm²]
- A_{min} – Área mínima [mm²]
- APQP – Planejamento avançado da qualidade
- b – espessura [mm]
- C80M – Aço liga especial para tempera plena
- cc – cilindradas
- CCDM – Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (UFSCar – São Carlos)
- CO – Monóxido de carbono
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CTA – Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial
- D – densidade [g/cm³]
- ΔH_c – Entalpia de cristalização [J/g]
- ΔH_f – Entalpia de fusão [J/g]
- DMA – Análise térmica dinâmico-mecânica
- DSC – Calorimetria exploratória diferencial
- ε – Alongamento [%]
- E – Módulo de Elasticidade [MPa]
- E' - Módulo de armazenamento [MPa]
- E'' - Módulo de Perda [MPa]
- EDS – Análise por energia dispersiva
- FEA – Análise por elementos finitos
- FMEA – Análise de modo de efeito e falha
- FTIR – Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier
- G – Módulo Transversal [MPa]
- h – altura da calota [mm]
- HC – Hidrocarbonetos
- HDT – Temperatura de deflexão térmica
- hp – altura da pista [mm]
- Hz – Hertz (frequência)
- KBr – Brometo de potássio
- k_{IC} – Coeficiente de resistência a fratura
- L/D – Parâmetro comprimento e diâmetro da rosca da injetora
- μ – Coeficiente de atrito
- M_{ar} – peso da amostra no ar [g]
- MEV – Microscopia Eletrônica por varredura
- M_{H2O} – peso da amostra na água [g]

N_2 – Nitrogênio (gás)
 NASA – Agência espacial dos Estados Unidos
 NO_x – Óxidos de nitrogênio
 NPR – Número de prioridade de risco
 P35 – Zytel HTN 51 G35 HSLR BK420 (poliftalamida com 35% de fibra de vidro)
 PA – Poliamida (alifática)
 PA46 – Poliamida 4.6
 PA66 – Poliamida 6.6
 PC – Policarbonato
 PEEK – Polieteretercetona
 PEI – Polieterimida
 PETP – Politereftalato de etileno
 PF30 – Zytel HTN WRF51 G30 NC010 (poliftalamida com 30% de fibra de vidro e PTFE)
 PP – Polipropileno
 PPA – Poliftalamida
 PPS – Polissulfeto de fenileno
 PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por veículos automotores
 PROMOT – Programa de Controle de Poluição do Ar por motociclos e veículos similares
 PTFE – Politetrafluoretileno
 ρ – densidade [kg/m³]
 $R_e r$ – raio [mm]
 r_{ep} – Raio esférico da pista [mm]
 RI – Resistência a impacto [J/m²]
 r_p – raio da pista [mm]
 S – área [mm²]
 σ_f – Tensão de flexão [MPa]
 SINT – Aço sinterizado DIN SINT C11
 σ_{max} – Máxima tensão de tração [MPa]
 SMPF – Seleção de Materiais e Processo de Fabricação
 SRT – Teste de relaxamento de tensão
 σ_{rup} – Máxima tensão de ruptura [MPa]
 $\tan \delta$ – Fator de amortecimento
 T_c – Temperatura de cristalização
 T_g – Temperatura de Transição Vítrea
 TGA – Análise termogravimétrica
 T_m – Temperatura de fusão
 V – vazão [L/min]
 v – Velocidade linear [m/s]
 V_d – volume retirado do disco [mm³]
 V_e – volume desgastado [mm³]
 VE_{cal} – Energia descontada a energia de calibração [J]
 z – número de dentes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Bomba de óleo para motores a combustão interna de motocicletas.....	20
2.2 A poliftalamida – matriz do compósito proposto.....	26
2.3 Seleção e substituição de materiais.....	31
2.4 Atrito e desgaste em materiais poliméricos.....	37
2.4.1 Mecanismos de atrito em polímeros.....	38
2.4.2 Mecanismos de desgaste em polímeros.....	42
2.5 Degradação em materiais poliméricos.....	44
2.6 Análise de Modo de Efeito e Falha – FMEA.....	48
3. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	51
4. METODOLOGIA	52
4.1 Análise de Modo de Efeito e Falha – FMEA.....	54
4.2 Determinação do desempenho do produto atual.....	54
4.3 Determinação das condições do óleo pós-uso.....	58
4.4 Caracterização dos materiais atualmente empregados.....	60
4.5 Os compósitos propostos.....	61
4.6 Envelhecimento dos materiais compósitos propostos.....	63
4.7 Caracterização dos compósitos propostos: ângulo de contato e energia de superfície.....	64
4.8 Caracterização dos compósitos propostos: densidade.....	4
4.9 Caracterização dos compósitos propostos: termogravimetria – TGA.....	65
4.10 Caracterização dos compósitos propostos: calorimetria exploratória diferencial – DSC.....	66
4.11 Caracterização dos compósitos propostos: Análise de infravermelho por transformada de Fourier – FTIR.....	67
4.12 Caracterização dos compósitos propostos: dureza Shore D.....	67
4.13 Caracterização dos compósitos propostos: impacto	68
4.14 Caracterização dos compósitos propostos: tração.....	69
4.15 Caracterização dos compósitos propostos: ensaios tribológicos.....	70
4.15.1 Ensaios tribológicos dos materiais propostos: ensaio de pino sobre disco.....	71
4.15.2 Ensaios tribológicos dos materiais propostos: ensaio de pino sobre placa deslizante (<i>reciprocating</i>).....	74
4.15.3 Ensaios tribológicos dos materiais propostos: ensaio de esfera sobre placa.....	76

4.16 Caracterização dos compósitos propostos: análise termica dinâmico-mecânica – DMA	79
4.17 Caracterização dos compósitos propostos: Microscopia eletrônica de varredura – MEV	81
4.18 Caracterização dos compósitos propostos: análise de elementos finitos para modelo proposto – FEA	82
4.19 Validação do design proposto	84
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
5.1 Análise de Modo de Efeito e Falha – FMEA	86
5.2 Determinação do desempenho do produto atual	89
5.3 Determinação das condições do óleo pós-uso	93
5.4 Caracterização dos materiais atualmente empregados	99
5.5 Ângulo de contato e energia de superfície	101
5.6 Densidade dos compósitos propostos	103
5.7 Termogravimetria – TGA	104
5.8 Calorimetria exploratória diferencial – DSC	106
5.9 Análise de infravermelho por transformada de Fourier – FTIR	108
5.10 Dureza Shore D	111
5.11 Impacto Charpy	112
5.12 Ensaio de tração dos compósitos propostos	113
5.13 Ensaio tribológicos	115
5.14 Análise térmica dinâmico-mecânica – DMA	122
5.15 Microscopia eletrônica de varredura – MEV	124
5.16 Análise de elementos finitos para o modelo proposto – FEA	128
5.17 Validação do design proposto	133
6. CONCLUSÕES	137
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
8. DIVULGAÇÕES	140
9. REFERÊNCIAS	142

1 Introdução

Como pode ser observado na Figura 1, o mercado de motocicletas vem apresentando tendência de crescimento de maneira tal que órgãos governamentais vem agindo de forma bastante ativa e contínua no que tange ao controle da contribuição deste tipo de transporte na evolução do quadro global de emissão de poluentes (NASCIMENTO, 2008).

Este crescimento foi prejudicado pela crise financeira mundial que se instaurou em 2009, retomando crescimento no final de 2009 e 2010 frente aos números de 2006. Controvérsias a parte, no Brasil estima-se que em 2018, as motocicletas deverão superar os carros nas emissões de particulados (ABRACICLO, 2010).

Esta preocupação gerou ações preventivas a nível mundial, sendo uma delas no sentido de incorporar, inicialmente, dispositivos como conversores catalíticos. Isto acarretou em um acréscimo no custo final do produto sem ganhos de desempenho, além de um incremento no peso total do produto. Considerando os níveis atuais de produção no Brasil, no qual estes ultrapassaram os valores de 2 milhões de motocicletas no ano de 2008, pode-se avaliar o impacto deste tipo de transporte na poluição de cidades, em especial em regiões metropolitanas como São Paulo (AUTODATA, 2008).

A produção mundial também é crescente ficando no continente asiático a maior parte conforme observado na Figura 2. A tendência pelas projeções e dados históricos é que a produção continuará se ampliando nos próximos anos, o que remete a necessidade em caráter urgente de formas de controlar a eficiência e a qualidade destes equipamentos.

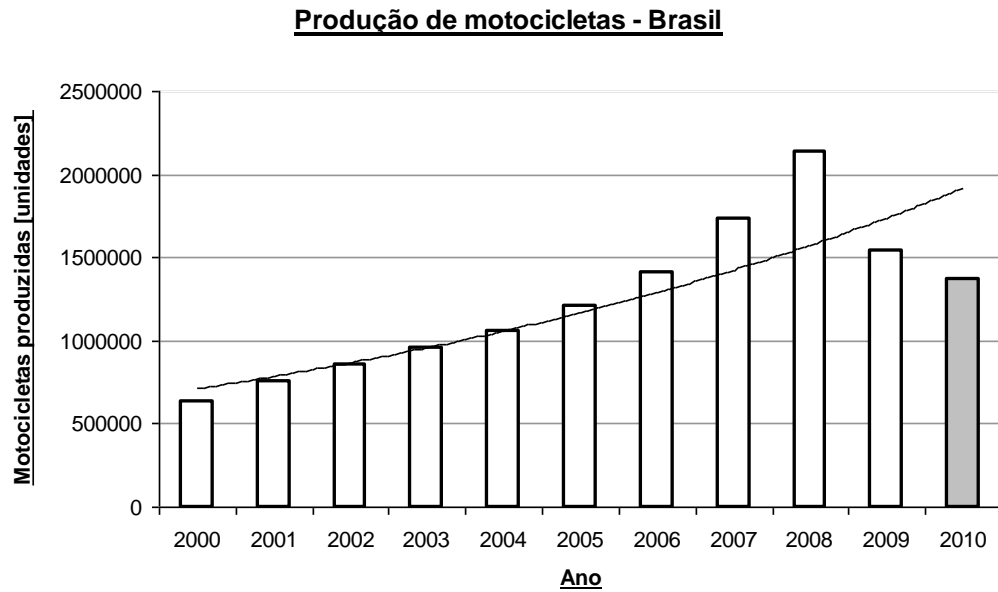


Figura 1 – Produção de motocicletas nacionais (ABRACICLO, 2010). Ano de 2010 computado somente dados até setembro.

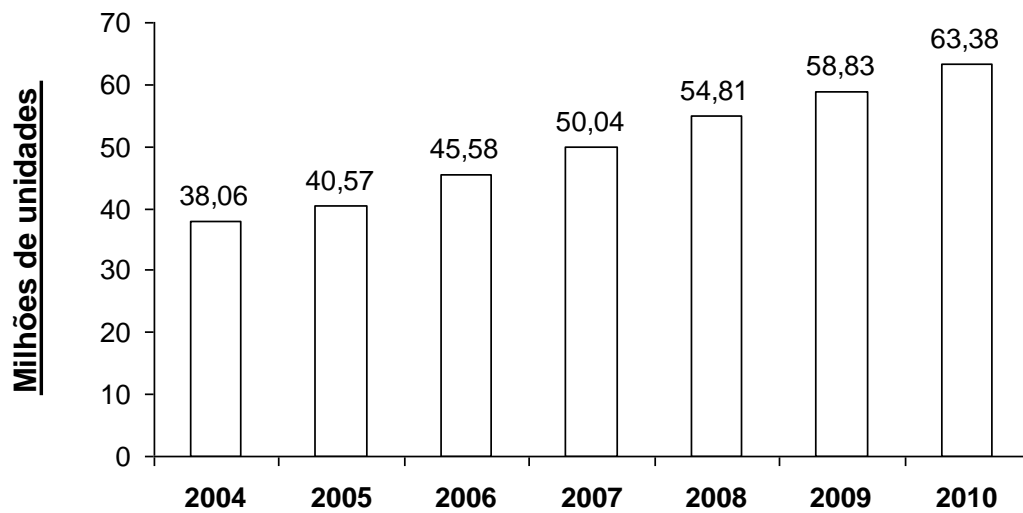


Figura 2 – Evolução da produção estimativa de motocicletas (2 e 3 rodas) – Escala Mundial

No Brasil resoluções específicas sobre emissão de poluentes regem e regulamentam a produção de motocicletas, sendo elas elaboradas e emitidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

O programa nacional responsável pelo cronograma da redução de emissão de poluentes para automóveis, ônibus e caminhões é o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, criado em 1986. Por sua vez o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares – PROMOT, criado em 2002, estabelece os limites de emissão para gases poluentes provenientes de motocicletas novas (FEEMA, 2009).

Na Tabela 1 são descritos os valores limites para emissão de poluentes para motocicletas novas a partir de 1º de janeiro de 2009 (CONAMA,2002; CONAMA,2003) em comparação com os valores limites permitidos em 2003. A redução prevista é em torno de 84,6% para o monóxido de carbono (CO), de 90,0% para hidrocarbonetos (HC) (motores $\geq 150 \text{ cm}^3$) e de 50% para os óxidos de nitrogênio (NOx), todos parametrizados pelos níveis permitidos em janeiro de 2003.

Tabela 1 – Valores limites de poluentes para motocicletas novas (CONAMA, 2003).

Data para início da vigência	Motor (cm^3)	Poluentes		
		CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
Jan / 2003	todos	13,0	3,0	0,30
Jan / 2009	< 150	2,0	0,8	0,15
	≥ 150		0,3	

Com o avanço das pesquisas em novos materiais, uma grande sinergia mundial tem atuado na busca por desenvolvimento, melhoramento e posterior aplicação de materiais

mais leves, com valores de resistência mecânica combinados ao design, semelhantes ou superiores aos materiais e *designs* aplicados em 2008 (SANTOS NETO & MANCINI, 2008).

Em geral a busca pela substituição do aço vem incentivando pesquisas e testes com o intuito de reduzir o peso e o custo de componentes. A redução de peso de um veículo acaba diminuindo o consumo de combustível do mesmo e, assim, há uma menor geração de poluentes atmosféricos em relação a veículos similares, mais pesados.

Neste sentido, os polímeros e as ligas de alumínio vêm ganhando mercado. Com densidade cerca de 6 vezes menor e com custo que permite reduções nos valores dos produtos finais de até 70%, tanto os *commodities* quanto os plásticos de engenharia, tem sido largamente utilizados, especialmente em seguimentos automotivos, sendo o polipropileno – PP , a poliamida alifática – PA, o policarbonato – PC e o copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno – ABS os mais usados (RHODIA,2006; GLASSCOCK *et al*, 2008).

Com histórico de sucesso como, por exemplo, no caso da substituição de coletores de admissão de gases, antes em alumínio injetado e atualmente geralmente em poliamida 6.6 – PA66, as pesquisas e aplicações dos polímeros vêm avançando a cada dia (RHODIA, 2006).

A poliftalamida – PPA pode ser considerada um melhoramento químico da classe das poliamidas alifáticas, vem ganhando mercado com suas características mecânicas, físico-química, térmicas e anti-desgaste em aplicações como carcaças, rotores de bomba de água, camisa de motores, etc. (RHODIA,2006; GLASSCOCK *et al*. 2008; WIEBECK & HARADA, 2006; POLÍMEROS, 2002; HEMAIS, 2003).

Neste contexto o **objetivo** deste estudo de dissertação de mestrado é analisar a proposta de substituição dos materiais metálicos atualmente empregados por materiais compósitos comerciais baseados em poliftalamida, embasando-se em resultados dos

experimentos específicos e direcionados à aplicação em bomba de óleo para motores a combustão interna de motocicletas.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Bomba de óleo para motores a combustão interna de motocicletas

Um dos maiores problemas na eficiência de motores a combustão interna está no atrito que ocorre entre seus componentes. Na Figura 3 é apresentado um gráfico no qual se demonstra as perdas por atrito nos principais componentes do motor variando-se sua rotação.

Os lubrificantes, recobrimentos superficiais e os tratamentos térmicos, como exemplo, a cementação e a nitretação, tem sido amplamente utilizadas pela indústria automotiva para reduzir os fatores de atrito e desgaste (BASSHUYSEN & SCHAFER, 2002).

Observa-se pela Figura 3 o grande atrito existente nos vários componentes do motor e em vários níveis de rotação (inclusive em bombas de óleo, foco desta dissertação) e que devem ser minimizados.

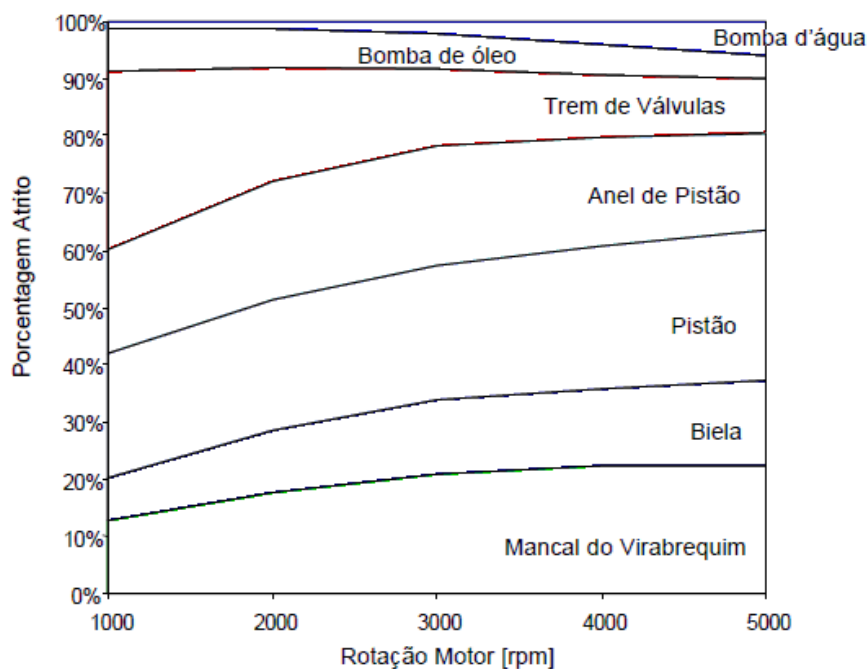


Figura 3 – Variação da porcentagem de atrito nos principais componentes de motores a combustão interna. Adaptado de INA-SCHAEFFLER KG, 2004.

Nos motores de motocicletas, a lubrificação fica a cargo de óleo sintéticos ou minerais que entre outras funções são responsáveis por: a) prevenir contra o atrito e desgaste das peças móveis; b) trabalhar em uma larga faixa de temperatura permitindo uma partida rápida; c) evitar a formação de depósitos na câmara de combustão e d) colaborar com a refrigeração do motor (REVISTA LUBES, 2008).

Para que a lubrificação seja deslocada até os pontos necessários, é preciso um deslocamento constante e na vazão adequada do fluido lubrificante, pois a solicitação da vazão irá variar de acordo com a rotação (BASSHUYSEN & SCHAFER, 2002; LECHNER & NAUHERIMER, 1999; EIDENBOCK et al 1998; GAMEZ-MONTERO, 2004; CODINA MACIÁ, 2000; LINSINGEN, 2001; ZIMMERMANN, 2003), ou seja, é importante que o sistema seja dotado de um controlador de fluxo. Este controle pode ser resistivo (válvulas) ou conservativo (bombas) (LINSINGEN, 2001).

Uma bomba de óleo pode ser considerada o “coração” do sistema hidráulico, pois é responsável pelo controle e deslocamento do fluxo para todos os componentes que

necessitam de lubrificação (ZIMMERMANN, 2003). Esta é composta por: a) carcaça; b) rotores; c) eixo; d) placa de vedação; e) pinos-guia vazados, e f) parafusos.

Em motocicletas, a bomba de óleo recebe o movimento da árvore de transmissão, em geral por engrenamento e, através de sua geometria interna transmite o movimento ao fluido, direcionando-o através das galerias da carcaça do motor.

Este movimento se dá por transferência de energia com variação de energia cinética desprezível. Restringindo o escoamento do fluido amplia-se a pressão interna no sistema, o que pode ser utilizado em aplicações como a direção hidráulica (EIDENBOCK et al, 1998; LECHNER & NAUHERMER,1999).

Por se tratar de elementos de baixa pressão interna, em certos tipos de motores há necessidade de se acrescentar ao sistema um componente que impulsionará o fluido para lugares de mais difícil acesso.

Antecedente à abertura do fluxo de entrada de óleo na bomba, existe uma tela de filtro que impede que impurezas (em geral cavacos dos elementos metálicos oriundos do próprio motor) entrem no sistema e desgastem primariamente os elementos internos da bomba (EIDENBOCK et al,1998; LECHNER & NAUHERMER, 1999; GAMEZ-MONTERO & CODINA MACIÁ,2000).

O esquema citado pode ser observado na Figura 4.

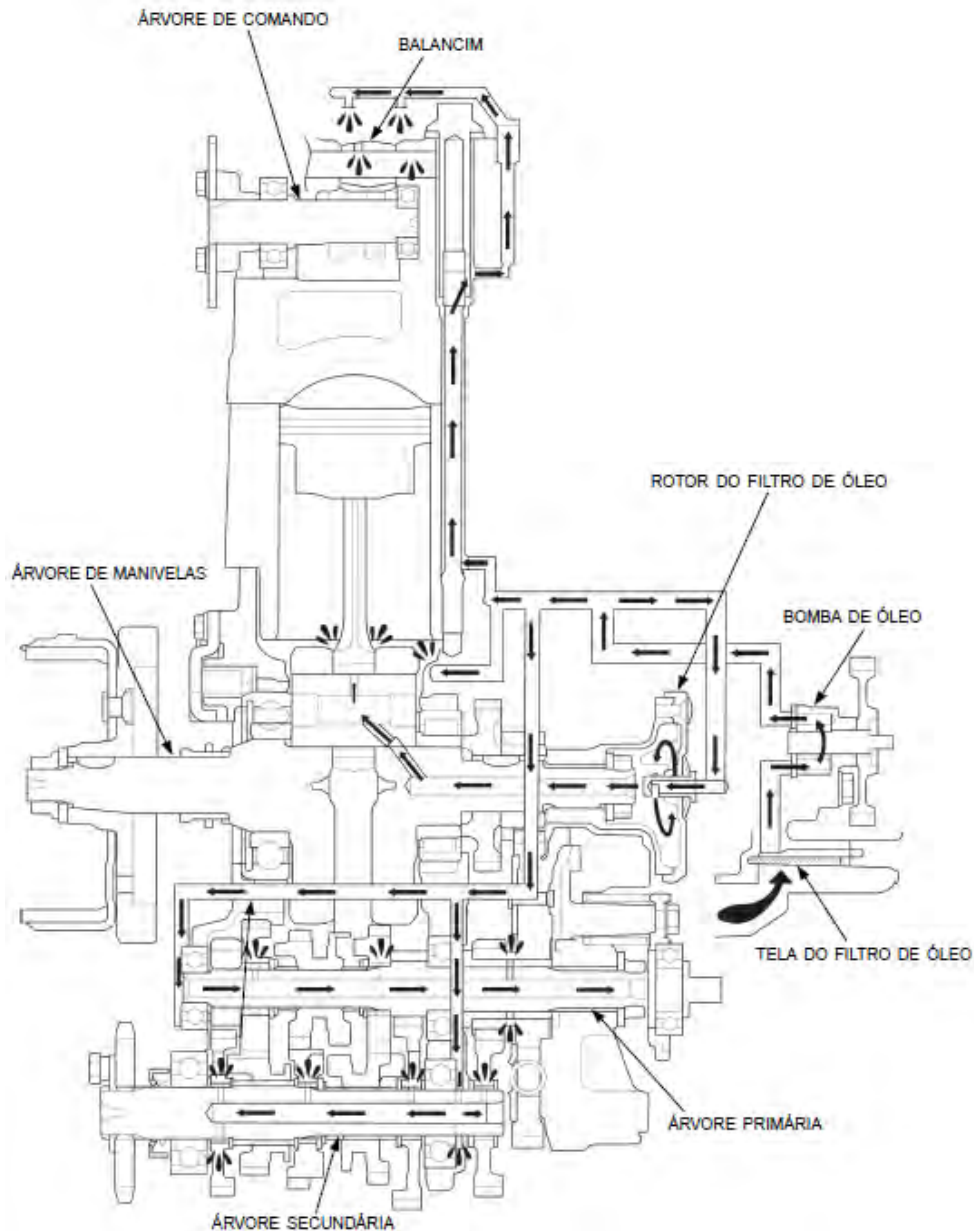


Figura 4 – Esquema de lubrificação em motocicletas (150cc). Manual de Serviços Honda CG 150 Titan, 2004.

A geometria interna deste tipo de bomba é essencial para sua aplicabilidade. As bombas de engrenagens internas, cujos detalhes são apresentados na Figura 5a e 5b, são consideradas as mais aptas para este tipo de serviço em motocicletas. Em veículos automotores, como os automóveis de pequeno e médio porte, as bombas de engrenagens externas, de paletas e de vácuo poderão ser aplicadas (EIDENBOCK et al,1998; LECHNER

& NAUHHHERIMER, 1999). Nesta Dissertação será focada uma variação da bomba de engrenagem interna do tipo gerotor, cujos detalhes do rotor são apresentados na Figura 5b.

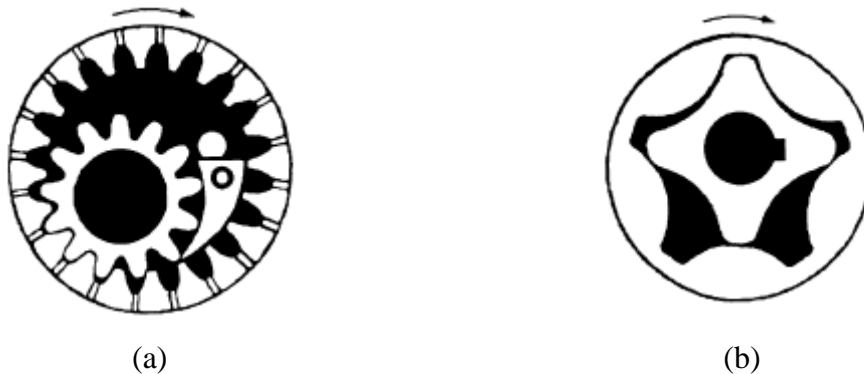


Figura 5 – Detalhe dos rotores das bombas de engrenagens internas (a) bomba de engrenagens; (b) bomba de gerotores. Adaptado de LINSINGEN, 2001

As bombas de engrenagens internas são compostas de duas engrenagens duplamente excêntricas, ou seja, seus centros são deslocados nos eixos x e y, e dotadas de uma relação de transmissão.

Conforme pode se observar pela Figura 5a, a engrenagem motora (menor) transmite o movimento para engrenagem movida (maior), a qual gira livre sendo guiada pelo seu diâmetro externo. Num determinado ponto, entre a maior folga interna nas engrenagens se dispõe um guia tanto para o diâmetro externo da engrenagem motora quanto para o diâmetro interno da engrenagem movida. Esta última direcionará o fluxo e criará várias câmaras de bombeamento do fluido, diferente do princípio das engrenagens gerotores no qual as câmaras são formadas pelos próprios dentes dos gerotores (LINSINGEN, 2001).

A origem da palavra gerotor vem da união das palavras de origem inglesa “*GEnerated ROTOR*”. Esta engrenagem especial é dotada de um tipo de engrenamento

especial no qual à engrenagem interna (gerotor interno), possui um dente a menos que a engrenagem externa (gerotor externo), conforme observado na Figura 5b.

O gerotor interno será responsável por transmitir o movimento para gerotor externo que se movimenta aleatoriamente guiada pela carcaça (EIDENBOCK et al, 1998; GAMEZ-MONTERO & CODINA MACIÁ, 2000; ZIMMERMANN,2003; GAMEZ-MONTERO,2004).

Na carcaça existem duas depressões denominadas de zona de entrada e zona de saída, sendo a primeira responsável pela captação do óleo (por sucção ou por submersão) e a segunda pelo deslocamento positivo do fluido até o primeiro diâmetro do início da galeria.

A Figura 6 apresenta um detalhamento interno da carcaça de uma bomba de óleo de engrenagens do tipo gerotor. As dimensões destas zonas cumprem papel importante no volume de fluido deslocado (ZIMMERMANN, 2003; GAMEZ-MONTERO, 2004).

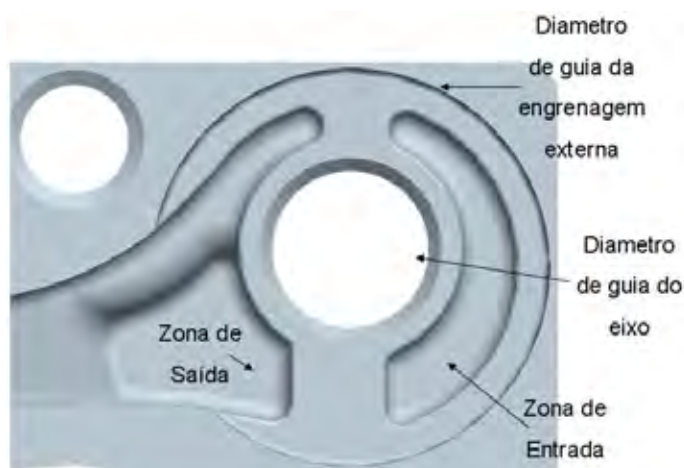


Figura 6 – Detalhamento interno da carcaça de uma bomba de óleo de engrenagens tipo gerotor.

Do ponto de vista dos materiais empregados na construção de uma bomba de óleo, utilizam-se normalmente materiais metálicos ferrosos e não-ferrosos já consagrados.

Estes foram escolhidos principalmente devido à geometria dos componentes (complexidade no processo produtivo) e pela participação térmica no processo global.

Geralmente, as carcaças são confeccionadas em alumínio para que obtenham otimização de forma e máxima troca de calor com o ambiente, além de peso relativamente baixo, sobretudo se comparado ao aço ou ferro fundido.

Já os rotores são normalmente fabricados em aço sinterizado devido à complexidade de sua geometria e tolerâncias reduzidas (em geral centésimos de milímetro). Desta forma, processos subseqüentes de usinagens como exemplo torneamento, fresamento, furação e retífica, são eliminados.

O eixo, em geral, é confeccionado em aço ligado baixo carbono cementado para reduzir o efeito do desgaste que ocorre na região de contato do rotor interno com a carcaça e com o acoplamento da engrenagem movida responsável pela transmissão de movimento na bomba.

Geralmente, a placa de vedação é estampada em aço de baixo carbono sem tratamento térmico. Poderá ser incluso entre as interfaces dos componentes elementos vedantes como *o'rings* (normalmente elastoméricos) e juntas à base de celulose ou papelão hidráulico (GAMEZ-MONTERO,2004). Um detalhe dos componentes da aplicação analisada pode ser melhor observado na Figura 7



Figura 7 – Bomba de óleo para motocicletas – esquema.

2.2 A poliftalamida – matriz do compósito proposto

A poliftalamida (PPA, na sigla comercial, do nome em inglês) é obtida a partir da reação dos compostos químicos hexametileno diamina, ácido adípico e ácido tereftálico (ou isoftálico), apresentados na Figura 8 (GLASSCOCK *et al*, 2008; WIEBECK & HARADA, 2005 , ASTM D5336, 2003; AMODEL,2003).

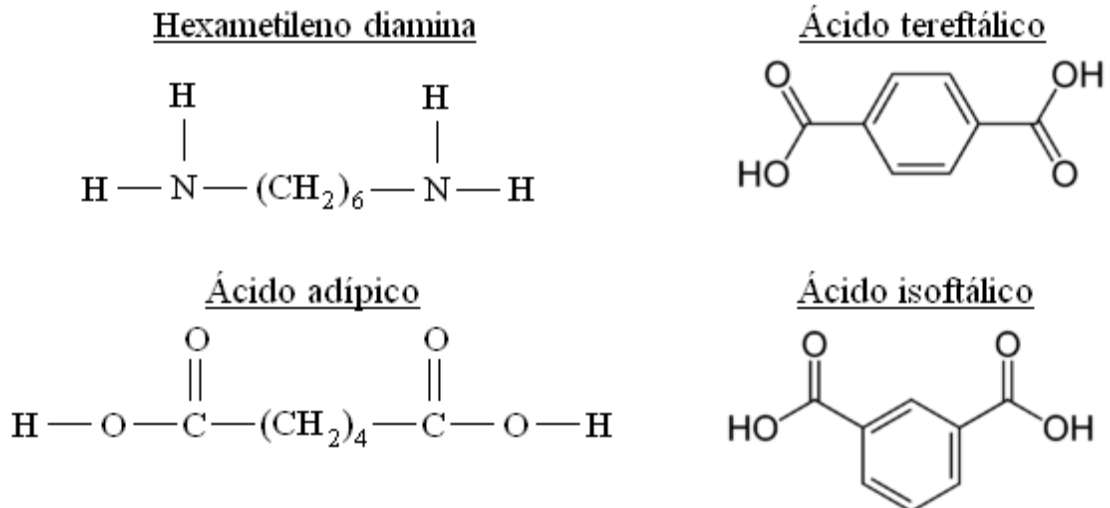


Figura 8 – Compostos químicos utilizados na obtenção da poliftalamida. Adaptado de Du Pont Engineering Polymers – Zytel HTN High Performance Resin.

As poliftalamidas são consideradas uma subdivisão das poliamidas, pois são semelhantes em estrutura, a exceção do anel aromático que é inserido de modo a obter melhores propriedades.

Estas melhores propriedades incluem: a) maiores valores de Transição vítrea - Tg, explicadas pelo aumento na dificuldade de mobilidade das cadeias devido à existência de um anel aromático; b) maiores valores de Temperatura de fusão - Tm, explicadas conforme item a; c) redução nos valores de absorção de água (redução no número de ligações de

hidrogênio); d) manutenção das características mecânicas em altas temperaturas devido ao incremento nos valores de Tg e Tm (GLASSCOCK et AL, 2008; ASTM D5336,2003; AMODEL,2003).

A norma ASTM D5336 (2003) define a poliftalamida – PPA como: “uma poliamida em que o ácido tereftálico ou o ácido isoftálico ou uma combinação dos dois compreendem pelo menos 55% do peso molar da parcela de ácido di-carboxílico das unidades repetitivas do polímero”.

Pode conformar-se em várias estruturas a partir da união da hexametileno diamina com um ácido carboxílico. Um primeiro segmento, “6T”, o ácido carboxílico é o ácido tereftálico, no segmento “66” é o ácido adípico e no segmento “6I” é o ácido isoftálico.

Há ainda um quarto segmento formado pela reação do ácido tereftálico com a 2-metil-pentametileno diamina. As poliftalamidas comerciais geralmente são fabricadas a partir da união de dois segmentos, sendo as mais comuns os copolímeros “6T/66” e “6T/DT”, além do terpolímero “6T/6I/66”, apresentados na Figura 9.

As diferenças entre elas e entre dois tipos de poliamidas alifáticas (sem anéis aromáticos, no caso poliamidas 46 e 66) podem ser visualizadas parcial e inicialmente na Tabela 2, no qual ocorre a comparação com relação à absorção de água e propriedades térmicas (GLASSCOCK *et al*, 2008; AMODEL,2003). Observa-se que as poliamidas aromáticas apresentam propriedades geralmente superiores às alifáticas.

Tabela 2 - Comparação de propriedades entre tipos de poliftalamida e poliamidas.
(Adaptado de GLASSCOCK *et al*, 2008)

Polímero	Tg (°C)	Tm (°C)	HDT 1,8MPa (°C)	% H₂O, 24h 2mm
PA6T/DT	140	300	264	0,5 %
PA6T/6I/66	125	312	278	0,5 %
PA6T/66	90	310	285	0,5 %
PA 46	80	292	290	1,5 %
PA 66	65	263	252	1,2 %
Método	DMA	ISO 11357-1/3	ISO 75f	ISO 62

No qual HDT 1,8 Mpa (°C) – temperatura de deflexão térmica, medida com tensão de 1,8 MPa
%H₂O, 24h – absorção de água após 24 horas.

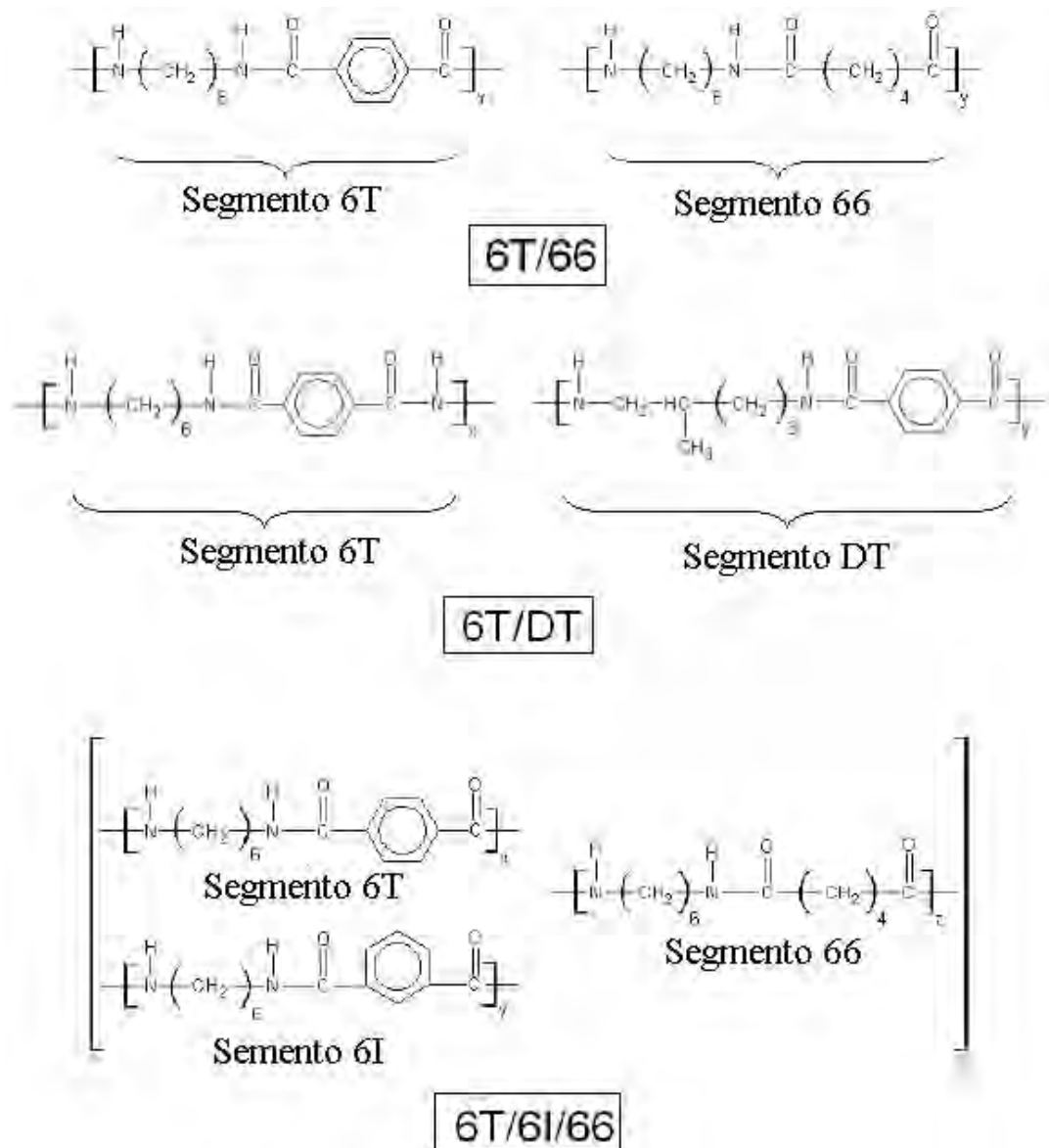


Figura 9 – Estrutura química das três possibilidades de conformação da poliftalamida. (GLASSCOCK *et al*, 2008)

Em geral as peças produzidas em poliftalamida são fabricadas através do processo de injeção ou extrusão utilizando-se equipamentos convencionais. No caso da injeção, o parâmetro L/D (comprimento e diâmetro da rosca da injetora) indicado é na faixa entre 18-22, e a taxa de compressão normalmente empregada é de 2,5 a 3,5 para 1 (AMODEL,2003).

As temperaturas usadas no processo de injeção irão variar de acordo como os aditivos e tipos de reforço utilizado, que podem alterar inclusive propriedades finais. Temperaturas típicas de injeção estão na ordem de 320°C, com o molde aquecido na faixa 135°C (AMODEL,2003).

Em geral as poliftalamidas são higroscópicas, porém em patamares inferiores as poliamidas alifáticas, conforme apresentado na Tabela 2. Este efeito de absorção geralmente tem interferência mínima nas propriedades mecânicas e dimensionais, porém no que tange ao processo produtivo o mesmo é bastante significativo (GLASSCOCK et al, 2008; AMODEL,2003).

Conforme os principais fabricantes o nível ideal de teor de umidade nas poliftalamidas antes do processamento é em torno de 0,15% ou menos, sendo que para atingir estes níveis deverá ser utilizado equipamento de secagem, no qual os parâmetros tempo e temperatura dependem do índice de absorção requerido (AMODEL, 2003; DUPONT, 2003).

A Figura 10 apresenta curvas do teor de umidade em função do tempo de secagem para três diferentes temperaturas. Em linhas gerais, quanto maior o tempo e a temperatura de secagem, menor a absorção de água.

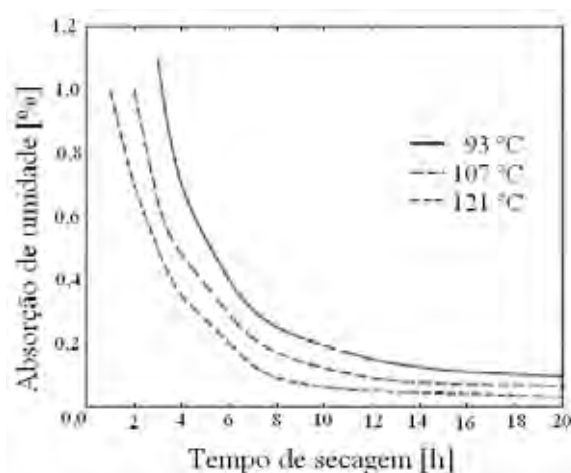


Figura 10. Parâmetros tempo-temperatura para redução dos índices de umidade em poliftalamida. Adaptado de Solvay, 2003.

Além de propriedades térmicas e de absorção de água bastante interessantes, as poliftalamidas possuem excelentes propriedades mecânicas como resistência a flexão, tração, dureza e fadiga (23°C a 60Hz), alta resistência térmica, boa estabilidade dimensional, boa resistência química a hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos e clorados, bem como óleos, graxas, cetonas, éster e álcalis, apresenta ainda resistência química regular a metanóis e ácidos fortes, porém baixa resistência a fenóis (GLASSCOCK et al, 2008; AMODEL,2006; WIEBECK & HARADA,2005). O conjunto dessas propriedades reunidas torna a poliftalamida uma opção aparentemente viável para aplicações em motores automotivos.

LYONS (1998) estudou os efeitos do tempo e temperatura sobre as propriedades mecânicas da poliftalamida. Quatro materiais reforçados com fibra foram comparados, sendo dois deles versões de poliftalamida com 33% de fibra de vidro. Estes foram confrontados com duas poliamidas, sendo que a primeira era uma PA46 com 30% de fibra de vidro e a segunda uma PA66 com 33% de fibra de vidro.

As amostras foram envelhecidas ao ar a 23, 100 e 150°C após 50, 200, 500, 1800 e 3600 horas. Após envelhecimento realizou-se os testes de fluência (*creep*), sendo que os resultados mostraram uma esperada diminuição na resistência à fluência e na resistência a ruptura com incremento da temperatura para os quatro materiais. Porém, observou-se que as versões de poliftalamida estudadas exibem uma boa combinação de resistência à fluência, resistência mecânica em geral e ductilidade após envelhecimento, propriedades superiores às poliamidas testadas até a temperatura em torno de 100°C (LYONS, 1998).

Em outro estudo, HEMPY e LYONS (1999) avaliaram e tentaram prever o fenômeno de fluência em poliftalamidas reforçadas, utilizando o método *stress relaxation test* – SRT. Neste método são obtidas as curvas de fluência através da avaliação da relaxação das tensões internas do material sobre temperatura, aplicação de carga, deformação constante e tempo.

As previsões obtidas pelo método SRT foram comparadas com experimentos realizados. O trabalho conclui que o teste é válido, porém apresenta limitações em prever valores de tensão de ruptura e o tempo para que isso ocorra em especial em temperaturas mais altas. Uma das explicações é a não possibilidade de avaliar neste método a degradação química e térmica que ocorrem no material durante os testes (HEMPY & LYONS, 1999).

2.3 Seleção e substituição de materiais

A busca por novos materiais, preferencialmente de baixo custo, de fontes renováveis, recicláveis e mais resistentes tem proporcionado aos projetistas uma gama ampla de possibilidades de novas aplicações e substituições de materiais (FERRANTE, 2002; SANT'ANNA & WIEBECK, 2006).

Na indústria automobilística, estas ações vêm de encontro à necessidade da otimização da logística e melhora na eficiência dos veículos, intimamente ligadas também à redução de peso dos mesmos. Neste tocante cumprem papel importante as novas ligas de alumínio e os materiais poliméricos com destaque para os termoplásticos (SANT'ANNA & WIEBECK, 2006).

Uma das problemáticas na escolha do material é a dificuldade de se correlacionar propriedades obtidas em ensaio com o desempenho final. Outra envolve o conflito existente entre propriedades num mesmo material, por exemplo, entre resistência mecânica à tração e tenacidade, propriedades tipicamente excludentes (BISSOTO, 2005).

Não somente as propriedades devem ser avaliadas na escolha de determinado tipo de material, mas também seu comportamento frente à linha de produção, seu fluxo

logístico e sua disponibilidade de mercado (ASHBY & JOHSNO, 2003). Para a aplicação de um material polimérico na indústria automotiva, além da avaliação das propriedades gerais, como mecânicas, térmicas e óticas, deve-se considerar também a obtenção do material e a disponibilidade do mesmo no mercado local. Sabe-se que a escassez do material escolhido para qualquer aplicação poderá afetar a cadeia logística, obrigando as empresas a reprojeter suas tecnologias produtivas ou de produtos visando superar os problemas e obstáculos causados pela dificuldade em obter o material selecionado.

A complexidade no processo de alteração de um material já empregado ou empregado erroneamente foi estudada por Sant'anna e Wiebeck (2006). No estudo, os autores abordaram o custo, relativamente alto, seja para a pesquisa ou aplicação de um novo material, ou para reavaliação e posterior substituição do material empregado atualmente por um material diferente. Estudaram ainda a questão das metodologias de Seleção de Materiais e Processo de Fabricação – SMPF, e concluíram que a falta de acesso a informações sistêmicas relativas a pratica do SMPF é uma das responsáveis pela complicação deste processo (SANT'ANNA & WIEBECK, 2006).

Para que um produto obtenha sucesso são necessárias duas características fundamentais: funcionalidade e usabilidade (ASHBY, 1992). A funcionabilidade é o ato imprescindível que incorpora segurança e economia, ambos aspectos do projeto técnico. Já usabilidade se relaciona ao fato de determinado produto ser de fácil compreensão e utilização por parte do cliente final.

Otimizar essas duas características é a função do SMPF, ao fazer a interação do material com a função desejada, forma (geometria da peça) e processamento (ASHBY,1992). Esta interação afirma que: a) o material é escolhido devido à função a exercer; b) se determina a forma (geometria da peça) estudando a realização de uma função

por um determinado material e c) o processamento atrela-se diretamente ao material e influencia a forma (geometria da peça).

Um método simplificado para comparação entre materiais é a confecção de gráficos que mapeiam duas propriedades quaisquer. Desses gráficos, se calculam os índices de mérito (produto de duas características conforme a solicitação mecânica) e estes dão ao projetista a definição primária de certo grupo de materiais ou análise da vantagem quantitativa de certo material sobre outro (ASHBY & JONES, 1981; ASHBY, 1985).

A Figura 11 demonstra um desses mapas no qual no eixo x encontra-se a característica densidade (ρ) e no eixo y a característica resistência a tração (σ_f). As linhas tracejadas (índices de mérito σ_f / ρ para barra em tração; $\sigma_f^{2/3} / \rho$ para barra em flexão e $\sigma_f^{1/2} / \rho$ para chapa em flexão) são guias para obter o ângulo de inclinação para comparação entre características. Ou seja, materiais acima da linha determinada pelo projetista, tendendo ao canto superior esquerdo são os melhores quanto ao índice de mérito resistência mecânica sobre densidade.

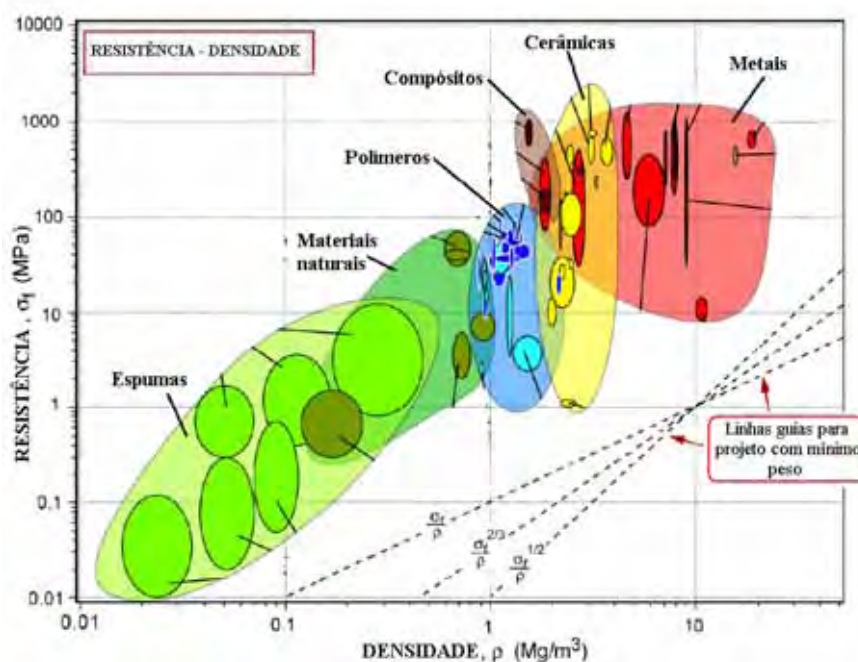


Figura 11 – Mapa de propriedades de materiais. Adaptado de ASHBY, 1993.

A Tabela 3 demonstra alguns Índices de Mérito conforme determinados carregamentos propostos, destacando-se os utilizados na Figura 11.

Tabela 3 – Índices de mérito propostos por ASHBY, com destaque para os utilizados na Figura 11. Adaptado de FERRANTE, 2002.

Modo de carregamento	Minimização de peso para...		
	Rigidez	Resistência dobramento	Resistência fratura
Barra em tração	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Barra em torção	$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Tubo em torção	$\frac{G}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Barra e tubo em flexão	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$	$\frac{k_{IC}^{2/3}}{\rho}$
Flambagem de coluna e tubo	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	-	-
Chapa em flexão	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$	$\frac{k_{IC}^{1/2}}{\rho}$
Flambagem de chapa	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	-	-
Cilindro em rotação	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$
Vaso de pressão cilíndrico	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$	$\frac{k_{IC}}{\rho}$

E = módulo elasticidade; ρ = densidade; σ_y = resistência mecânica; k_{ic} = coeficiente de tenacidade a fratura; G = módulo de rigidez

Estudos determinaram que o campo de ação da seleção de materiais compreende-se na tríade: Estrutura – Propriedade – Processamento (FERRANTE, 2002). As propostas de seleção de materiais propiciam uma das atividades mais promissoras do campo da Ciência e Tecnologia dos Materiais, uma fonte de aprimoramento e maior confiabilidade para o processo de substituição dos materiais empregados atualmente.

É este tipo de tarefa que pode trazer ao fornecedor enormes vantagens frente ao concorrente, além de uma postura mais agressiva em relação ao mercado no que tange a novidades ou melhoria no produto. Estas ações quase sempre resultam em inovações tecnológicas, ganhos em custo, produção ou ganho em desempenho do produto.

Novas aplicações para as ligas de alumínio já são realidade em boa parte das centrais de engenharia das montadoras, em especial devido sua baixa densidade, resistência moderada, baixo custo e versatilidade de processo. A boa condutividade térmica confere ao alumínio, várias utilizações em componentes no qual se faz necessária dissipação de calor, como carcaças de motores, coletores de admissão, suportes, entre outros (VAN VLACK, 1984).

Quando comparados ao alumínio, em custo final produtivo e possibilidade de agregar mais valor ao produto, os termoplásticos de engenharia se sobressaem em certos aspectos como menor peso, otimização de processo fabril, menor cadeia logística. A utilização cada vez maior destes materiais vem corroborando com esta linha de raciocínio.

O sucesso de uma substituição de material metálico por polimérico depende e muito da renovação de pensamento por parte do projetista e um maior entendimento das particularidades deste material. Entre essas particularidades destacam-se a importância nos valores de T_g e T_m , o comportamento sob fluência e fadiga, o alinhamento de eventuais fibras de reforço e suas linhas de solda (originadas pelo encontro de fluxos de materiais durante o processo de injeção); possibilidades de diferentes tipos de processos de união entre peças;

mudanças na concepção (*design*) devido a eventuais falhas decorrentes do processo de fabricação etc. (VAN VLACK, 1984; MANO, 1985, LYONS, 1998).

É comum o reforço de materiais poliméricos com fibras de vidro, o que torna o material um compósito, pela junção de duas classes de materiais distintas (CORREA *et al*, 2003). A mistura com polímeros diferentes também é possível (BASSANI, PESSAN & HAGE, 2002): no caso de polímeros submetidos a esforços mecânicos repetitivos, emprega-se normalmente a mistura com o politeretrafluoretileno, o que tende a melhorar consideravelmente a resistência ao atrito do conjunto.

2.4 Atrito e desgaste em materiais poliméricos

Uma das características que limita a vida útil de determinado produto é seu comportamento tribológico, ou seja, como o atrito e o desgaste influenciam sua condição de funcionamento. A ciência que estuda o atrito e o desgaste é a Tribologia do grego *tribos* (atrito) e *logos* (estudo) (STOETERAU, 2004).

Uma definição mais abrangente relata que tribologia é a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas (HUTCHINGS, 1992). Os estudos tribológicos remontam há alguns milhares de anos, tendo avanços desde a utilização de objetos rústicos para obtenção de fogo ou pequenas furações (maximização do atrito e desgaste) e na promoção de deslocamentos de grandes massas. Neste último caso, o ápice histórico é a invenção da roda primitiva (minimização do atrito) por volta de 3500 a.C (HUTCHINGS, 1992).

Constatou-se que a força de atrito é proporcional a carga aplicada e independente da área nominal de contato. Em 1699 foram postuladas as leis que atualmente regem o atrito em conjunto com a terceira lei que indica que a força de atrito independe da velocidade. As demais leis do atrito indicam: que o atrito estático será maior que o atrito dinâmico avaliando-se o mesmo par tribológico; a força de atrito é proporcional ao carregamento e independente da área de contato. Nos fins do século XVII foi proposta a utilização do par tribológico aço-bronze em mancais de roda, e a partir daí houve grande evolução com o acréscimo de estudos ligados a lubrificantes e desenvolvimento de materiais tribológicos (STOETERAU, 2004).

Atualmente, a mecânica quântica explica o atrito através das forças de atração e repulsão entre átomos e moléculas, manifestações estas que ocorrem de duas formas em uma situação tribológica (duas superfícies interagindo em um ambiente): a) a resistência ao movimento (coeficiente de atrito) que gera dissipação de energia, ou seja, liberação de calor e geração de ruído; b) as superfícies modificam suas características básicas durante o movimento (HUTCHINGS, 1992).

2.4.1 Mecanismos de atrito em polímeros

Diferente do que ocorre em metais, os coeficientes de atrito nos materiais poliméricos variam conforme a carga aplicada, temperatura e velocidade (REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998; RODRIGUES, 2007).

Na Figura 12, são demonstrados resultados dos trabalhos experimentais no que tange às variações dos coeficientes de atrito sob diferentes cargas aplicadas (ilustrada como

pressão em MPa) para diferentes compósitos, à base de poliamida 46, polieterimida-PEI, poliftalamida-PPA, polissulfeto de fenileno - PPS, modificados com fibra de vidro e politetrafluoretileno – PTFE, sob diferentes temperaturas (REINICKE;HAUPERT & FRIEDRICH, 1998).

Neste estudo, os autores promoveram o movimento relativo de uma placa de compósito (na realidade parada) contra uma esfera metálica (em movimento, chamada contra-peça), o que desgasta o compósito (HUTCHINGS,1992). O aumento da pressão de contato na interface deslizante explica os acréscimos nos valores de coeficiente de atrito quando se amplia a carga aplicada. Isto porque nesta região predominam o contato elástico entre os estados de superfície de ambos os corpos, ocorrendo dois mecanismos: adesão e deformação.

A adesão é oriunda das forças de ligação fracas como Van der Waals ou ligações de hidrogênio. Em geral este mecanismo se observa pelo depósito do material polimérico na contra-peça devido ao cisalhamento das junções (HUTCHINGS,1992; REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH,1998).

Por sua vez o mecanismo de deformação atua deixando na amostra uma indentação (condição de teste estática) ou uma trilha (condição de teste dinâmica), além de envolver dissipação de energia. Este tipo de mecanismo é fortemente influenciado pela rugosidade (REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998; STOETERAU, 2004; RODRIGUES,2007).

O mecanismo de desgaste que predomina no teste depende fortemente da natureza dos movimentos das partículas na área de contato e ainda serão influenciados pelo movimento rolante, natureza da partícula abrasiva e dos materiais da esfera e da amostra (REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998).

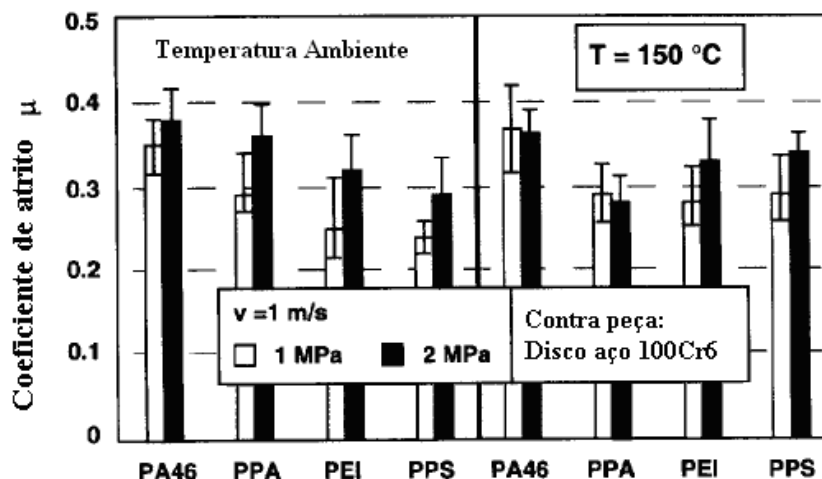


Figura 12 – Influência da carga aplicada no coeficiente de atrito. Adaptado de REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998, pg. 768. PA46 (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE); PPA (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE); PEI (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE); e PPS (30% de fibra de vidro e 15% de PTFE).

A influência da temperatura sobre o coeficiente de atrito pode ser observada em experimentos dinâmicos sobre o poliéterétercetona – PEEK, reforçado com fibra de carbono e com PTFE (CZICHOS, 1983; ASM Handbook,1992), sendo estes resultados observados na Figura 13.

O aumento no coeficiente de atrito é explicado pela transformação de grande parte da energia, gerada em um contato entre superfícies, ser transformada em calor. Este calor por sua vez eleva a temperatura na interface deslizante, propiciando transições térmicas e alterações nos mecanismos de desgaste (REINICKE; HAUPERT & FRIEDRICH, 1998; STOETERAU,2004; RODRIGUES,2007).

Em polímeros os tipos de ligações químicas induzem estes materiais a apresentarem baixos valores de condução térmica, o que o tornam mais sensíveis às variações de temperatura, em especial em patamares relativamente mais altos (acima de 100°C).

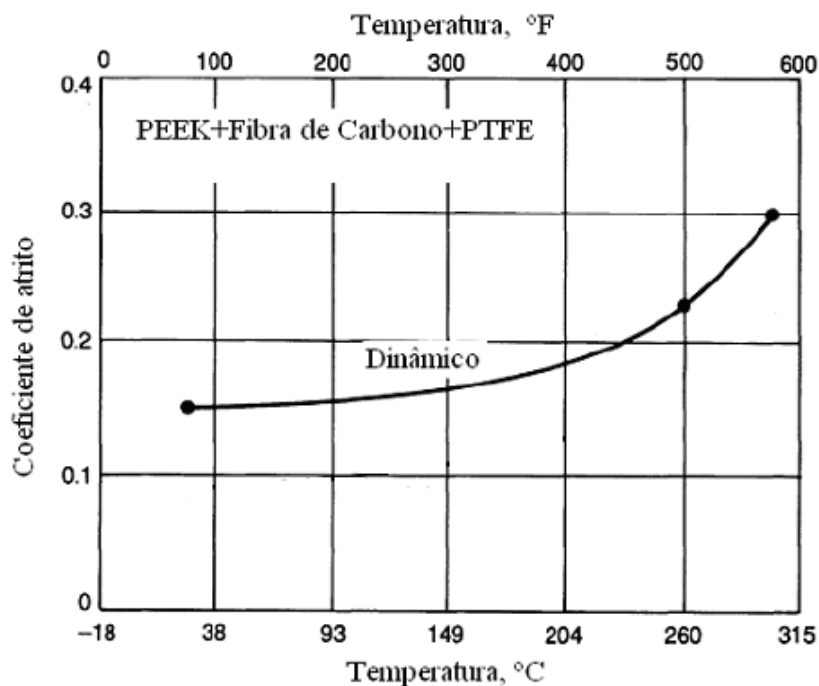


Figura 13 – Influência da temperatura no coeficiente de atrito.
Adaptado de ASM Handbook, 1992.

Outro importante fator que influencia o coeficiente de atrito é a velocidade de deslizamento, pois com o aumento desta velocidade tende-se ao aumento da temperatura. Resultados de estudos com poliamidas (CAST PA e DEVATEKS), poliacetais (DELRIN) e politereftalato de etileno (PETP), relativos à da variação do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento são apresentados na Figura 14.

Observam-se incrementos no coeficiente de atrito com aumento nas velocidades de deslizamento para DELRIN e PETP (FEYZULLAHOGLU & SAFFAK, 2008). Já com CAST PA e DEVATEKS ocorreu decréscimo nos valores dos coeficientes de atrito (FEYZULLAHOGLU & SAFFAK, 2008). Isto demonstra que para boa escolha do material em relação ao coeficiente de atrito a velocidade de deslizamento na aplicação também é uma variável a ser considerada.

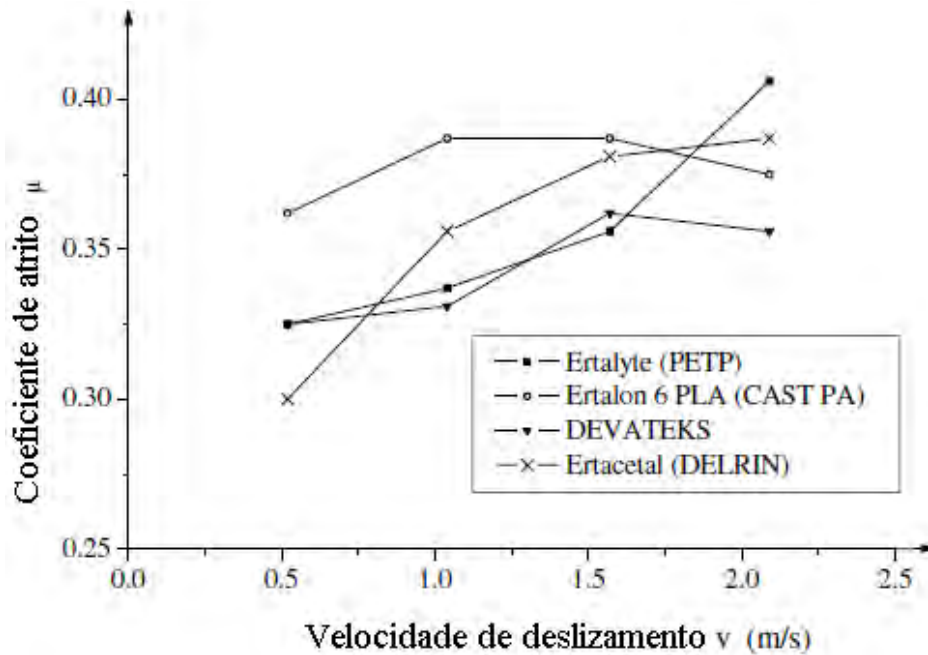


Figura 14 – Influencia da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito. Adaptado de FEYZULLAHOGLU & SAFFAK, 2008.

2.4.2 Mecanismos de desgaste em polímeros

Segundo a ASTM G40 (2010) o desgaste é um dano a uma superfície sólida geralmente envolvendo perda de material. Esta perda de material ocorre devido ao movimento relativo entre a superfície da amostra e do contra-peça. Os principais tipos de desgaste são:

- Por adesão;
- Por abrasão;
- Por fadiga superficial;
- Por reação triboquímica e;
- Por erosão.

Para materiais poliméricos o desgaste divide-se em duas classes específicas (STOETERAU, 2004): a) desgaste coesivo (abrasão e fadiga superficial) e, b) desgaste

interfacial (adesão e reação triboquímica). As áreas nas quais elas ocorrem são mostradas na Figura 15.

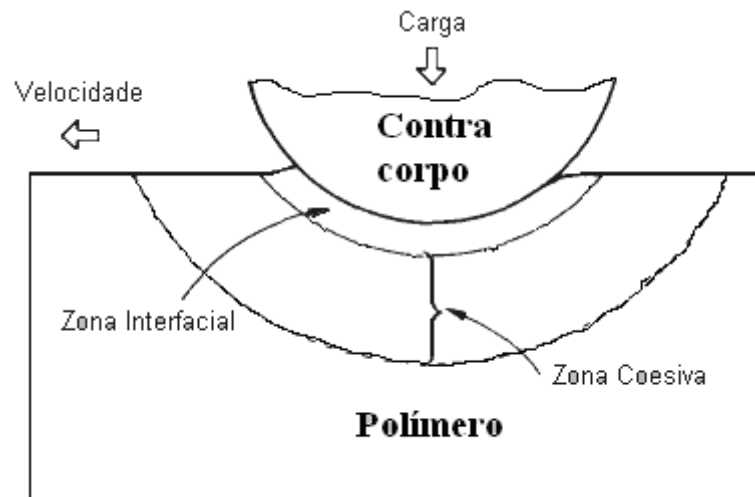


Figura 15 – Zonas de ocorrência de mecanismos de atrito e desgaste. Adaptado de RODRIGUES, 2007.

Os mecanismos de desgaste coesivo por abrasão envolverão o deslocamento de materiais ocasionados por cristas ou partículas duras em um dos corpos em movimento relativo (HUTCHINGS,1992; STOETERAU,2004).

Em desgaste abrasivo poderá ocorrer uma indentação (material não removido) ou trilha com remoção de material em forma de lascas (*cutting*), sendo esta última apresentada na Figura 16a como um exemplo de remoção em forma de lascas.

Desgastes por fadiga superficial ocorrerão devido às variações cíclicas de cargas friccionais e calor friccional e, em geral, são explicadas pela teoria de contato de Hertz. A combinação destas variações poderá gerar a nucleação de trincas que, sob a presença de tensões irão romper o material. Poderão também gerar tensões adicionais em um contato tribológico: a) o aquecimento das camadas superficiais acima dos limites compressivos do mesmo, seguido por refrigeração e; b) as forças de atrito, que geram tensões na extremidade de contato. Este tipo de desgaste é mais comum em metais, quando os limites de pressão

específica ultrapassam os valores denominados de pressão de Hertz, ocasionando a fadiga superficial por contato, que ocorre em dimensões pouco abaixo das camadas superficiais (SANTOS, 2004). Macroscopicamente é observado o deslocamento de certa região de material cuja origem será em camadas mais internas (*spalling*) conforme apresentado na Figura 16b.

Os mecanismos de desgaste interfacial por adesão resultam do cisalhamento das junções de acordo com fotomicrografia mostrada na Figura 16c. Essas junções são originadas pela ocorrência de deformação plástica e aderência na zona de contato. Nesse processo, uma característica é a transferência de material entre as amostras. Forças de atração molecular fracas (Van der Waals) podem causar a adesão entre as superfícies de contato. Esta força de aderência varia de acordo com a carga aplicada, forma e tamanho do contato entre as superfícies, propriedades mecânicas e superficiais das amostras (DA SILVA, 2006).



Figura 16 – Fotomicrografias evidenciando diferentes tipos de desgaste.
ASM Handbook, 1992.

2.5 Degradação em materiais poliméricos

Todo polímero utilizado está sujeito a ser aplicado ou inserido em ambientes que física ou quimicamente poderão afetar suas características e/ou propriedades originais. A ação que provoca este tipo de perda é denominada degradação e é normalmente irreversível, podendo ser oriunda de reações químicas, efeitos físicos ou biológicos, ou ainda de efeitos físicos que conduzem a perda da função do produto polimérico (DE PAOLI, 2008).

Em geral a degradação ocorre pela quebra aleatória de ligações na cadeia principal, podendo resultar em despolimerização, reticulação ou oxidação e ciclização, bem como degradação sem quebra da cadeia principal. (ROSA,1996 ; DE PAOLI, 2008). A Figura 17 apresenta alguns mecanismos de degradação de polímeros genéricos.







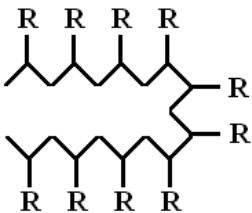
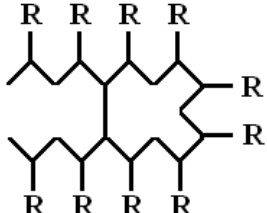
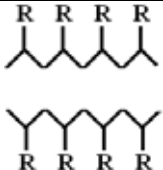
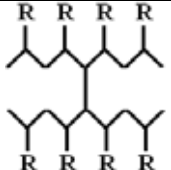
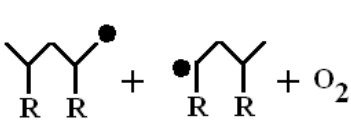
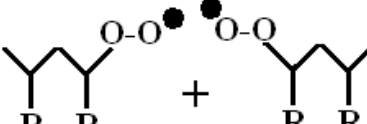
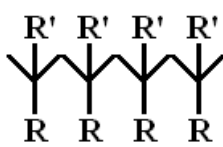
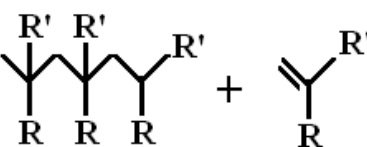
Não degradado	Degradado	Causa
		Quebra na cadeia principal (homolítica: gerando radicais livres; heterolítica: gerando íons)
		Quebra de ligação de grupo lateral
		Sem quebra da cadeia principal
		Ciclização
		Reticulação (<i>cross linking</i>)
		Oxidação
		Despolimerização (R=C ₆ H ₅ , COOCH ₃ , COOR''; (R'=H ou CH ₃))

Figura 17 – Tipos reações de degradação comuns em polímeros (Adaptado de De PAOLI,2008)

Ainda no processamento é possível ver que o polímero se degrade ou que sejam gerados grupos químicos que iniciarão ou irão acelerar os processos de degradação (DE PAOLI, 2008; REICH & STIVALA, 1971). A degradação por cisão na cadeia principal poderá ocorrer devido:

- Hidrólise: adição de H_2O em um grupo químico com ou sem a formação de radicais livres, sendo este processo acelerado em meio ácido; Trata-se de mecanismo muito comum em poliésteres e poliamidas, daí a importância do controle de umidade exemplificado na Figura 18 (DE PAOLI, 2008);
- Fotólise: quebra de uma ligação química por absorção de energia luminosa gerando um estado excitado por transferência de energia de um sensibilizador em seu estado excitado (DE PAOLI, 2008);
- Termólise: quebra de uma ligação química por calor, geralmente relacionada à presença de defeitos na cadeia do polímero, ou ainda, se esta temperatura atingir a energia de dissociação das ligações (DE PAOLI, 2008);
- Radiólise: quebra de uma ligação química com radiação de alta energia, geralmente causando reticulação (DE PAOLI, 2008);
- Cisalhamento mecânico: quebra de uma ligação química por esforço mecânico, geralmente combinado com calor, também podendo provocar reticulação (DE PAOLI, 2008);

Em um motor, mais especificamente numa bomba de óleo, das degradações possíveis, especial atenção deve ser dada à degradação iniciada termicamente. O controle desta, visando minimizá-la e a seus efeitos, é de fundamental importância durante o processamento do polímero e durante o uso do produto (ROSA, 1996). Além dos mecanismos específicos de degradação térmica, o aumento da temperatura pode levar ao aumento da taxa de outras degradações, em especial às que envolvem reagentes químicos, como oxigênio, solventes etc.

Polímeros possuem ligações covalentes que em geral apresentam energias dissociativas entre 70 – 203 kcal/mol. Desta forma energias de mesma intensidade ou superiores poderão quebrar estas ligações. Uma das formas de se obter estas intensidades de energia é através de aquecimento (MARK et al, 1986). De forma direta, as ligações covalentes intramoleculares auxiliadas pelas ligações fracas entre cadeias (intermoleculares no caso de termoplásticos) determinam as propriedades do polímero, inclusive as térmicas, como exemplo a temperatura de início de degradação térmica, temperaturas de transição vítrea e de fusão, além da estabilidade dimensional (AKCELRUD, 2007; CANEVAROLO,2002; CALLISTER JR,2003).

Outros fatores também afetam as propriedades térmicas dos polímeros como:

- a) mobilidade das cadeias;
- b) grau de cristalinidade (que interfere na mobilidade das cadeias);
- c) grau de entrelaçamento das cadeias;
- d) tempo de exposição à temperatura e e)
- e) contaminações geradas pelo processo de polimerização (AKCELRUD,2007; CANEVAROLO,2002; CALLISTER JR,2003; MANO & MENDES, 2000).

O segmento automotivo impulsiona pesquisas de aplicação de compósitos com alto desempenho sob temperatura e com isso incentiva o lançamento de novos materiais em escala comercial. Para a melhora do desempenho em temperaturas relativamente altas são frentes de trabalho: a ampliação da cristalinidade; aumento da quantidade e tamanho das ramificações; inserção de anéis aromáticos; blendas com polímeros de melhores propriedades etc. (DE PAOLI, 2008).

Termoplásticos mais resistentes à temperatura são também termoplásticos de processamento geralmente mais difícil, além de possuírem normalmente custos mais elevados de obtenção. Logo, a aplicação dos mesmos só ocorre quando vantagens claras são obtidas no processo completo de inserção de um produto no mercado, avaliando-se inclusive custos com assistência técnica (pós-venda).

De modo geral os fabricantes buscam atualmente a melhoria de seus materiais consagrados. Em específico a poliftalamida possui bons valores de resistência térmica, em especial temperaturas de Tg e Tm, bem como valores significativos de HDT, e manutenção de propriedades mecânicas até 150°C.

2.6 Análise de Modo de Efeito e Falha - FMEA

A Análise de Modo de Efeito e Falha (FMEA, na sigla em inglês) é definida como um grupo sistemático de atividades que pretende: a) reconhecer e avaliar a falha potencial de um produto ou processo e os efeitos dessa falha; b) identificar as ações que poderiam eliminar ou reduzir a possibilidade da falha potencial que ocorre, e; c) documentar todo o processo (AIAG,2001).

Criada em 1963, pela Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA), com intuito de determinar as eventuais falhas que poderiam causar o insucesso do Projeto Apollo, considera-se que o FMEA foi uma das ferramentas fundamentais para o sucesso da missão. Este procedimento atualizado e reformulado é hoje um dos instrumentos mais utilizados pela indústria automotiva, sendo base do Planejamento Avançado da Qualidade (APQP, na sigla em inglês) e recomendado sempre que haja um novo *design*, uma nova tecnologia ou um novo processo (AIAG, 2001).

Em sua essência o FMEA propicia a seu usuário o conhecimento profundo do que se faz necessário compreender sobre o produto para que o mesmo culmine com sucesso. Define em seus passos um caminho simples, porém com amplas informações sobre diversos campos que unidos irão direcionar as ações.

Com isto o *lead time* (tempo de conceituação, desenvolvimento e finalização) de um projeto se torna menor, e a eficiência do mesmo também se amplia. Com a interação dos FMEAs isolados (componentes) e dados históricos sobre aquele assunto, é possível obter a mesma previsão de falhas para os sistemas, mesmo nos casos mais complexos, como exemplo um automóvel ou uma aeronave.

Por se tratar de uma ferramenta dinâmica, o FMEA sempre poderá ser constantemente atualizado, levando com isso ao aperfeiçoamento dos produtos e da forma de como fazê-lo (AGUIAR & SALOMON, 2007).

Seu sistema é dotado de notas para três classes: severidade (indica o grau de severidade da falha), ocorrência (indica a frequência em que as causas potenciais ou os mecanismos de falha aparecem) e detecção (indica qual a possibilidade dos atuais meios de prevenção de detectar as causas ou mecanismos de falhas). O produto destas três classes irá gerar o Número de Prioridade de Risco - NPR, que quanto maior seu valor, maior criticidade deste ponto no projeto (AIAG,2001; AGUIAR & SALOMON, 2007).

De forma prática, o FMEA consiste em definir as funções que um produto exercerá, a partir do preenchimento de um formulário padrão, anotando-se quais as eventuais falhas que podem ocorrer prejudicando aquela determinada função (AIAG,2001; FERNANDES & REBELATO,2006).

Uma vez determinado o modo de falha em potencial é possível identificar os efeitos potenciais desta falha e através destes determinar qual será a severidade destes efeitos, atribuindo-se a esta severidade notas de 0 a 10 conforme tabela no próprio manual de referência (AIAG,2001).

O mesmo ocorrerá para os mecanismos que provocam a falha ou sua potencial causa, desta vez atribuindo-se nota à ocorrência com que estes acontecem. Por fim através de

uma análise destes últimos estudam-se os critérios e métodos de prevenção e detecção frente aos mecanismos da falha.

Assim o produto das três notas irá gerar o NPR, cujos valores mais altos indicaram as funções que mais devem receber atenção e os mecanismos e causas potenciais de falha que devem ser tratados com mais cautela (AIAG,2001). O formulário ainda permite campos a serem preenchidos para as ações recomendadas e verifica ainda se houve melhora no processo após estas ações.

A Tabela 4 apresenta um trecho adaptado do formulário padrão FMEA em que pode ser avaliada a severidade, ocorrência e detecção de falhas com relação à porta frontal de um automóvel. Nesta tabela serão inseridas as funções ou itens a analisar, os modos e efeitos de falhas potenciais relativas aos itens ou funções, além das potenciais causas e mecanismos de falha e os métodos de prevenção e controle relativos aos dois últimos.

Já a Tabela 5, apresenta o campo do formulário para atualização de um processo e ações recomendadas para prevenção de falhas.

Tabela 4 – Determinação do NPR através da Severidade (Sever), Ocorrência (Ocorr) e Detecção (Detec). (Adaptado de AIAG,2001).

Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito da Falha Potencial	S e v e r	Potenciais causas / mecanismos da falha	O c o r r	Métodos de prevenção e controle atuais	Métodos de controle e detecção atuais	D e t e c	N P R
Porta Frontal -Fechar	Não fechar	Porta abrir durante operação do veículo	10	Fecho não funciona	3	Ensaio experimental	Controle Estatístico de Processo	4	120

Tabela 5 – Campo para atualização do processo e ações recomendadas. (Adaptado de AIAG,2001).

Ações Recomendadas	Responsabilidade e Prazos	Resultado das ações				
		Ações realizadas	S e v e r	O c o r r	D e t e c	N P R
- Inspeção no recebimento 100%	Antídio Neto Prazo: 20/07/09	- Criada Instrução de Trabalho especifica para item	10	3	1	30

3. Objetivos da dissertação

Esta dissertação tem por objetivo estudar a possível substituição dos materiais metálicos empregados atualmente na produção de bombas de óleo para motocicletas por *grades* comerciais de compósitos em termoplásticos, sendo o principal componente deles a poliftalamida.

Entre as principais etapas destacam-se:

- 1) Determinar as principais características que o produto final necessita;
- 2) Estudar o processo tribológico e de eventual perda em propriedades mecânicas, devido envelhecimento em óleo que possa vir a aparecer na aplicação;
- 3) Determinar o desempenho atual do produto através do monitoramento da vazão, uma vez que a principal função do produto é bombear óleo;
- 4) Caracterizar os compósitos que se deseja aplicar, em especial no que tange a ensaios tribológicos e a manutenção de suas propriedades depois de envelhecido em óleo.

4. Materiais e métodos

Uma das preocupações desta pesquisa foi à determinação de todas as funções que o produto deveria exercer. Um estudo mais completo do tema poderá ser visto no item 4.1 no qual foi utilizado o método Análise de Modo de Efeito e Falha – do inglês FMEA.

Uma vez determinada às necessidades, tanto relativas à aplicação quanto relativas aos materiais a serem empregados, foi determinada uma seqüência de trabalho que é apresentada na Figura 18. Esta seqüência está baseada nas informações que serviram de entrada para determinação do *design*, suas características dimensionais e de forma geométrica, além de suprir as necessidades de informação especiais dos materiais avaliados.

Um estudo dos materiais atualmente empregados poderá ser visto no item 4.2, tendo sido realizados ensaios com o intuito de estabelecer critérios de comparação de desempenho atual, bem como estruturar os fatores relativos à durabilidade e eventuais falhas.

Por fim foi determinado um modelo matemático como proposta a substituição sendo o mesmo avaliado através de Análise de Elementos Finitos (do inglês FEA), com características obtidas nos ensaios. Este mesmo modelo, após validação, foi construído fisicamente através de prototipagem de primeiro nível (validação da forma final, porém construído em aço) e seu desempenho foi avaliado comparativamente (item 5.17).

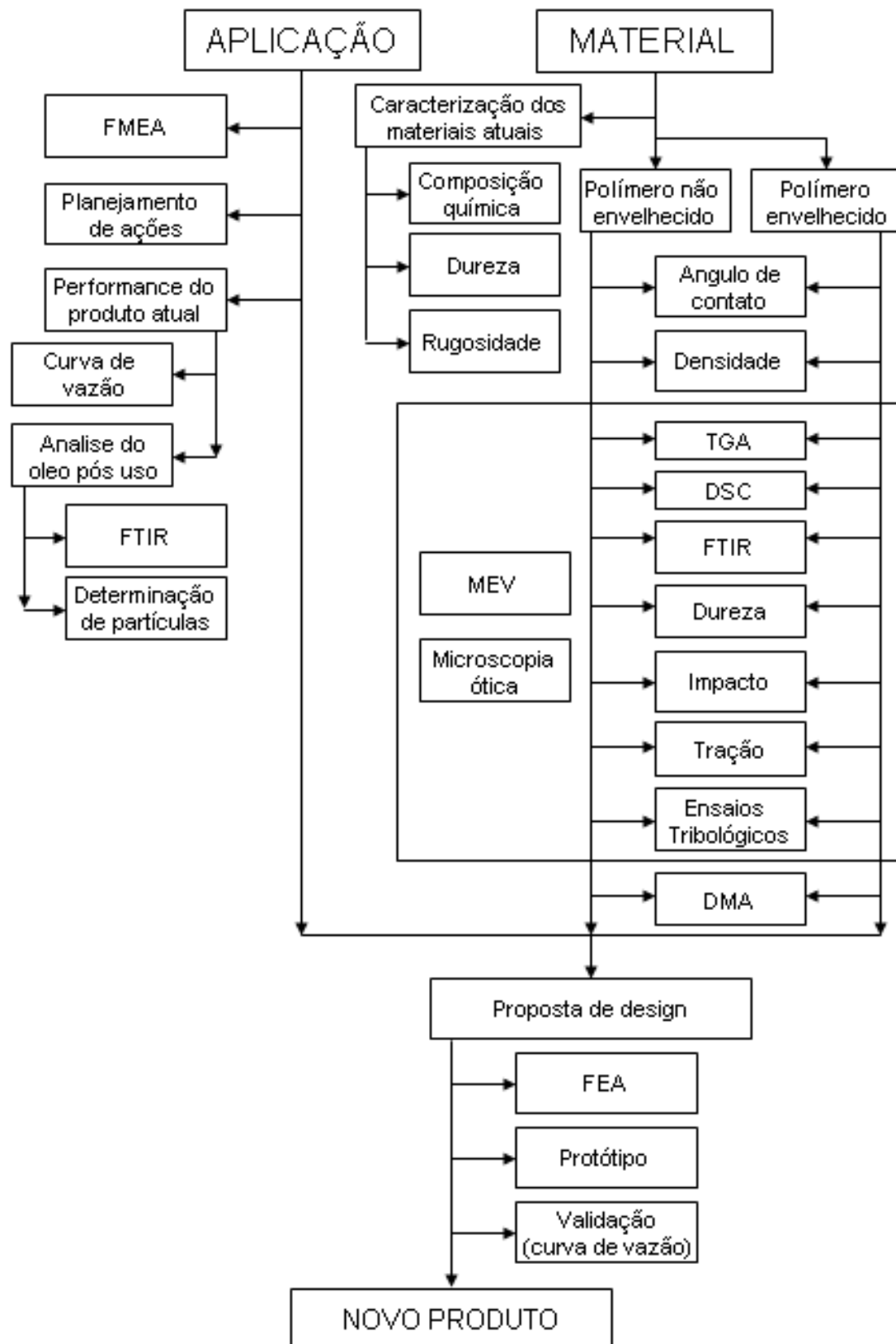


Figura 18 – Fluxograma das atividades a serem realizadas, no qual FMEA é análise de modo de efeito e falha, MEV é microscopia eletrônica de varredura, FTIR é espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier, DSC é calorimetria exploratória diferencial, TGA é análise termogravimétrica, DMA é análise dinâmico-mecânica, FEA é análise de elementos finitos.

4.1 Análise de Modo de Efeito e Falha – FMEA

Utilizando-se o formulário padrão para projeto (AIAG,2001), foram determinadas as funções do conjunto da aplicação bomba de óleo. Estas funções e os campos ligados a elas foram obtidas após extensa observação de literatura específica, bem como a partir de opiniões de especialistas de várias áreas (projeto, gestão e pesquisa de produtos, gestão da qualidade, engenharia experimental e produtos hidráulicos automotivos), a maioria do Grupo Schaeffler, na sede em Sorocaba, empresa que apoiou este trabalho.

As notas foram atribuídas seguindo as tabelas do mesmo manual. Quanto às ações a serem tomadas, o manual de referência recomenda que as mesmas sejam providenciadas para severidades que apresentem notas entre 9 e 10. Para este projeto ações foram obrigatoriamente tomadas, além das indicadas no manual, também para NPRs acima de 100, de forma a abranger 90% das possibilidades de NPR já que os mesmos podem ir de 0 a 1000.

Uma vez de posse das ações recomendadas foi determinado cronograma para os ensaios e demais ações conforme Figura 18.

4.2 Determinação do desempenho do produto atual

A principal função de uma bomba de óleo é bombear um fluxo de óleo para as partes que necessitem de lubrificação em um sistema, conforme condições pré-estabelecidas em projeto. O parâmetro para determinação deste desempenho é seu comportamento dinâmico

analisado através de uma curva de vazão, no qual são monitoradas a rotação e a vazão do equipamento (IUDICELLO & MITCHELL, 2002).

O desempenho do produto atual se deu através do monitoramento da pressão, rotação, vazão e temperatura em uma motocicleta 150cc modelo CG 150 Titan Sport do fabricante Moto Honda da Amazônia, fabricada em 2008. Utilizando-se do óleo recomendado no manual do fabricante (MANUAL HONDA, 2004), Mobil Supermoto 4T 20W50, foram determinadas as curvas rotação versus vazão para a bomba de óleo feita com os materiais atuais, conforme os trabalhos experimentais realizados anteriormente (SIRBONE & FREITAS, 2009).

Foi ainda utilizada uma metodologia analítica elaborada por Linsingen (2001) para determinação da curva ideal teórica do comportamento esperado da bomba, no qual a vazão (V) é tratada como na Equação 1. Assim, V é o um produto entre o número de dentes do gerotor interno (z), a espessura do dente (b) e a área útil disponível na máxima (A_{\max}) e mínima (A_{\min}) área das câmaras dos rotores, apresentadas na Figura 19. Foi utilizado o software *ProE Wild Fire II* para modelamento matemático dos componentes, conforme dimensões obtidas através de medição em uma máquina de medição tridimensional modelo Zeiss Prismo Navigator 7.

$$V = z(A_{\max} - A_{\min})b \quad (1)$$

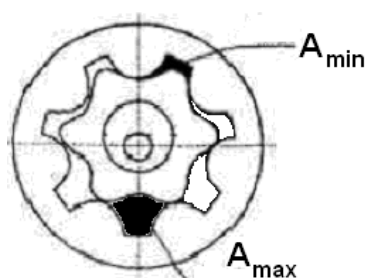


Figura 19 – Determinação das áreas máxima e mínima conforme Equação 1.

O cálculo da perda de eficiência é determinado pela diferença entre a vazão medida no produto e a vazão teórica, sendo este resultado dado em %. Para monitoramento dos demais dados foram utilizados os sensores listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Sensores utilizados para monitoramento de desempenho do produto atual

Variável	Modelo do sensor
Temperatura	Termopares do tipo k
Pressão	P3MB – 5 bar, HBM
Vazão	DZR-6, Kobold
Rotação	BES, Balluff
Aquisição de dados	Spider 8, HBM

Os testes foram conduzidos elevando-se da rotação zero até a máxima rotação do motor, neste caso em torno de 11200 rpm. Como o produto em questão possui uma relação de transmissão obtida através de um engrenamento, a rotação no produto ficou em torno de 5500 rpm, com temperatura do óleo variando entre 80°C e 130°C.

A pressão do óleo foi monitorada imediatamente na saída da bomba e sua temperatura foi monitorada no cárter do motor. Por sua vez, a rotação foi monitorada no cabeçote no qual se encontra o eixo de comando primário do motor, conforme apresentado na Figura 20.

Para medir a vazão, a saída da galeria imediatamente posterior à saída de óleo da bomba foi obstruída e criado um *by pass* através de uma mangueira, a qual foi ligada na saída do cabeçote. Entre estes pontos ficou o medidor de vazão, e ligado em série outro sensor de pressão, conforme apresentado na Figura 21.

A variação da rotação foi realizada manualmente através das manoplas de aceleração da própria motocicleta. Entre um teste e outro foi definido um tempo para

refrigeração do motor de duas horas com auxílio de um ventilador industrial. Os dados foram captados por um sistema de aquisição de dados.

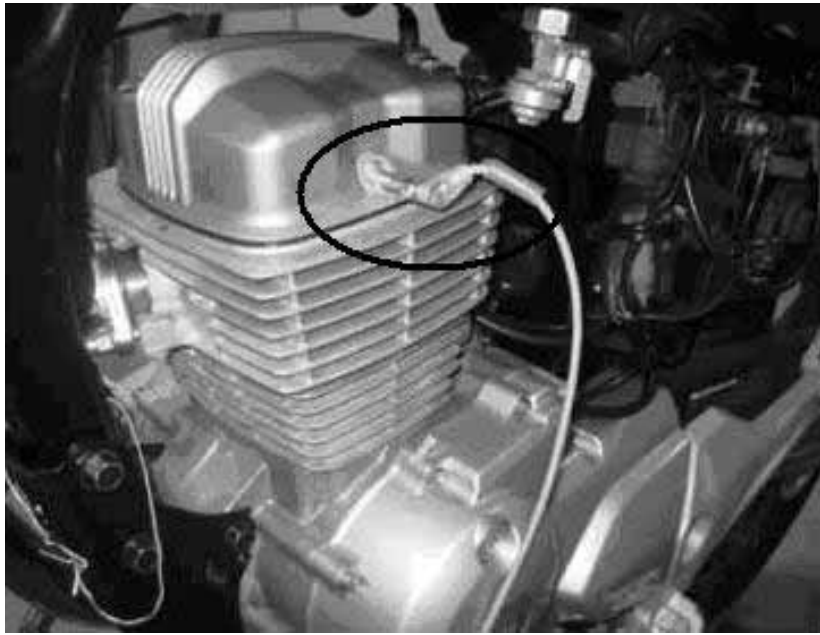


Figura 20 – Posicionamento do sensor de rotação

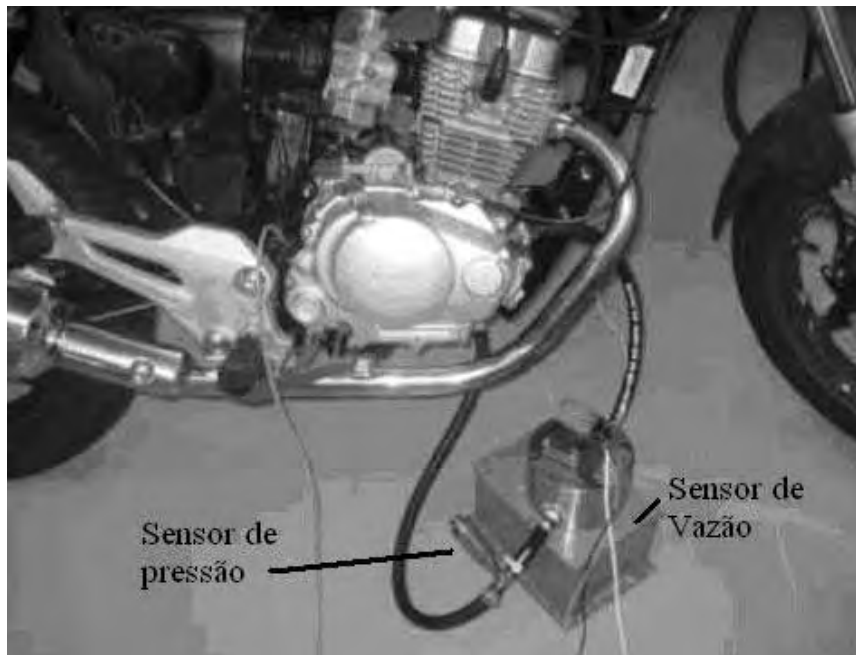


Figura 21 – Posicionamento dos sensores de pressão e vazão

Devido às limitações do sensor de vazão, os dados devem ser analisados a partir da marcha lenta da motocicleta que se situa em 1000 rpm, ou seja, serão válidas as medições de vazão a partir desta rotação. O ensaio foi realizado em uma bomba de óleo original nova e em outra bomba original com 80.000 quilômetros de uso. Esta última obtida numa concessionária foi analisada com o objetivo de comparação de desgaste e análise da perda de eficiência com o tempo de uso.

4.3 Determinação das condições do óleo pós-uso

O circuito ao qual pertence à bomba de óleo estudada é protegido por um filtro de óleo contra partículas que se desprendem dos demais componentes do motor e são levadas pelo óleo até a posição no qual se encontra a bomba.

Com isto as partículas não irão retornar ao sistema mecânico, o que poderia prejudicar o desempenho das mesmas. Devido às limitações dimensionais da tela do filtro se faz necessário uma análise do tamanho das partículas que estão presentes no óleo.

Esta análise pode indicar que tipo de aspecto tribológico o produto estará sujeito na aplicação. No caso do modelo da motocicleta utilizada para este estudo, a troca do óleo é recomendada pelo fabricante após os primeiros 1000 quilômetros e cada vez que forem completados mais 4000 quilômetros ou a cada 12 meses, o que ocorrer primeiro. Além disso, se faz necessário a checagem do nível a cada 1000 quilômetros (MANUAL HONDA,2004).

Para compreender se as especificações relativas ao tipo de óleo utilizado na prática pelos usuários finais e principalmente determinar as condições do óleo após uso foram estabelecidas duas análises: na primeira, o óleo usado foi avaliado através de espectroscopia

na região do infravermelho em comparação ao óleo virgem; na segunda as partículas foram filtradas por membranas e analisadas quali e quantitativamente.

Foram estudadas cinco amostras sendo a primeira retirada de uma motocicleta com 8364 km rodados, a segunda com 11835 km, a terceira com 32000 km, a quarta com 1000 km e a quinta com 5000 km, escolhidas aleatoriamente. Todas as motocicletas são do modelo CG Titan 150cc da Moto Honda da Amazônia, mesmo modelo utilizado para os demais testes, escolhidas aleatoriamente no pátio de manutenção de motocicletas da concessionária e oficina mecânica Walk Motos em Sorocaba, sendo esta escolhida por ser uma concessionária autorizada da Moto Honda da Amazônia.

Os ensaios de Espectroscopia na região do infravermelho foram realizados em um espectrofotômetro *Perkin Elmer* modelo *Spectrum* BX do Laboratório Químico do Grupo Schaeffler em Sorocaba/SP. Amostras do óleo foram inseridas entre duas pastilhas de KBr formando entre elas um filme fino. Estas foram submetidas à incidência de um feixe infravermelho cujos números de onda se compreendem entre 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , com resolução mínima de 4 cm^{-1} . Os procedimentos seguidos foram regidos pela norma DIN 51451 (2004).

Os ensaios de determinação da contaminação residual seguiram as diretrizes da norma DIN 51524 (2006). Os resultados são expressos em g/kg e sua avaliação qualitativa é realizada visualmente.

4.4 Caracterização dos materiais atualmente empregados

Um importante parâmetro para avaliação da proposta do trabalho é a condição atual no qual se encontra o produto. É importante além do desempenho, saber como estão os

materiais que compõe o sistema (GAMEZ-MONTERO, 2004) e, para tanto, foram realizadas nos materiais atuais as análises listadas na Tabela 7, de acordo com os componentes apresentados na Figura 7.

Os materiais atualmente empregados são:

- a. Aço Sinterizado DIN SINT C11, que será posteriormente referenciado como **SINT** e que é empregado atualmente na fabricação dos gerotores;
- b. Aço 16MnCr5 cementado, temperado e revenido (SAE 8620), que será posteriormente referenciado como **16MnCr5** e que é empregado atualmente na fabricação do eixo;
- c. Aço C80M sem tratamento térmico, que será posteriormente referenciado com **C80M** e que é empregado na construção da tampa de vedação;
- d. Alumínio SAE 383, posteriormente referenciado por **AL**, é empregado na fabricação da carcaça.

Tabela 7 – Caracterização dos materiais atuais. Ensaio determinados por componentes

Componentes	Composição química	Dureza	Aspecto de desgaste
Carcaça	X	X	X
Eixo	X	X	
Gerotor interno	X	X	X
Gerotor externo	X	X	X
Placa de vedação		X	X

Os ensaios de composição química foram realizados em um espectrômetro de emissão ótica ARL modelo 3460 multicanais, com ótica Pashen-Runge de 1 metro, com detecção por tubo foto ampliador e software de análise WinOE, disponível no Laboratório de Análises Metalúrgicas do Grupo Schaeffler, em Sorocaba/SP. O método baseia-se na

fluorescência de raios-X, oriunda da radiação secundária proveniente da excitação dos átomos provocada pela absorção de raios-X. Neste caso, os raios emitidos são analisados conforme seu comprimento de onda característico para determinação do elemento químico correspondente e comparados com padrões para determinação quantitativa deste elemento (PICCOLI et al, 2006).

Os ensaios de dureza foram realizados através de um durômetro *Brinell* do fabricante Wolpert, modelo Testor 930, conforme norma ISO 6506 (2005). Foi ainda utilizado um durômetro *Rockwell*, do fabricante Wolpert, modelo R Testor 2530 digital, conforme ISO 6508 (2005) ambos disponíveis no Laboratório de Análises Metalúrgicas do Grupo Schaeffler, em Sorocaba/SP. As conversões de escala seguiram os procedimentos indicados pela DIN EN ISO 18265 (2004). Os aspectos de desgaste foram avaliados visualmente.

4.5 Os compósitos propostos

Para aplicação em bomba de óleo foram avaliados os seguintes compósitos do fabricante Du Pont:

- Zytel HTN WRF51 G30 NC010 que, segundo o fabricante, se constitui em poliftalamida com 30% de fibra de vidro e politetrafluoretileno (PTFE) em quantidade não informada. Como a poliftalamida trata-se de um material relativamente caro, a adição de altos teores de fibra costuma abaixar o preço e melhorar os aspectos do desempenho mecânico. Já a incorporação de PTFE geralmente encarece o material final, porém sua incorporação é indicada para casos no qual ótimas

propriedades relacionadas ao atrito são requeridas. Por esta razão, este material foi selecionado para constituir a própria bomba de óleo (gerotores) e será referenciado como **PF30**;

- Zytel HTN 51 G35 HSLR BK420 que, segundo o fabricante se constitui em poliftalamida com 35% de fibra de vidro. Seus custo e propriedades geralmente inferiores em relação ao material com PTFE fizeram com que fosse selecionado, para este projeto, para constituir a carcaça da bomba de óleo, no qual as exigências mecânicas, inclusive relacionadas a atrito, são menores. Este material será referenciado como **P35**.

Os materiais citados foram doados na forma de placas, gravatas e *pellets* pela Du Pont do Brasil. Estes foram adotados por serem grades comerciais de fácil aquisição no mercado, por conterem fibras de reforço, o que geralmente amplia a resistência mecânica dos mesmos, e um deles por conter aditivo anti-desgaste necessário na aplicação bomba de óleo.

4.6 Envelhecimento dos materiais compósitos propostos

O método de envelhecimento utilizado foi o de imersão em óleo, no caso o óleo lubrificante SAE 20W50 no qual a bomba ficará totalmente imersa na aplicação, durante um tempo de 240 horas em uma temperatura de 150°C. O tempo adotado refere-se a valores típicos de testes automotivos propostos pela montadora Moto Honda da Amazônia, chamado Red Zone (24 horas sob rotação máxima, no qual ao final o componente não pode sofrer desgaste). Estes foram acrescidos do coeficiente de segurança correspondentes a uma vida

útil de componentes em uma motocicleta e a temperatura adotada representa a temperatura máxima estimada de trabalho acrescida de um fator de 1,5 vezes esta (SIRBONE & FREITAS, 2009).

Amostras dos compósitos, cedidas pela Du Pont, em forma de gravatas conforme norma ISO 527-2 (1993), tipo 1A, com raio de adoçamento entre 20 e 25 mm. Os mesmos foram acondicionados em recipientes de vidro, contendo em separado, os corpos de prova de cada material selecionado. Foi despejado nos recipientes óleo lubrificante Mobil Supermoto 4T (SAE 20W50) até que os corpos de prova ficassem totalmente submersos.

Os recipientes foram inseridos em uma câmara climática do fabricante Vötsch, modelo VTS 4034.5, ilustrada na Figura 22, com faixa de medição entre -50°C e 200°C, com precisão de 0,1°C. A câmara, pertencente ao Laboratório de Polímeros do Grupo Schaeffler, foi programada para 240 horas e 150°C.

Após o término do ciclo os corpos de prova foram retirados, lavados com solução de benzeno para retirada do óleo em excesso da superfície e secados a temperatura ambiente. Estes corpos de prova foram utilizados nos ensaios de: densidade, ângulo de contato e energia de superfície, tração, impacto, dureza Shore, calorimetria exploratória diferencial – DSC e termogravimetria – TGA. Testes comparativos dos materiais sem envelhecimento também foram realizados.



Figura 22 – Câmara climática para ensaios de envelhecimento, contendo em seu interior os recipientes de vidro com as amostras

4.7 Caracterização dos compósitos propostos: Ângulo de contato e energia de superfície

Para a obtenção dos ângulos de contato (θ) e das energias de superfície foi utilizado um goniômetro Ramé-Hart 100-00 do Laboratório de Plasmas Tecnológicos da UNESP – Sorocaba, ao qual é acoplado o software RHI 2001 *Imaging*.

Foram utilizadas 3 amostras avaliadas na mesma posição (centro da amostra), com 10 medições a cada análise. A amostra é posicionada em uma plataforma base, a qual possui ajuste de nivelamento. Em seguida através de uma seringa, é produzida uma microgota e a mesma é depositada sobre a superfície da amostra.

Um sistema de iluminação com fibra ótica e uma câmera CCD captam a imagem e esta é processada via computador. Com o auxílio do software são determinados os valores de ângulo de contato e energia de superfície, sendo o primeiro parametrizado pela medição da gota de água deionizada e o segundo pelo método da média geométrica utilizando água deionizada e diiodometano (RANGEL,2008).

Foram submetidos a este ensaio os seguintes materiais: a) **SINT**; b) **16MnCr5**; c) **C80M**; d) **PF30** e e) **P35**.

4.8 Caracterização dos compósitos propostos: Densidade

A norma ASTM D792 (2008) define a densidade como sendo a porção impermeável em um metro cúbico de um determinado material a 23°C. Este parâmetro está

diretamente ligado à relação entre a massa e o volume da espécie avaliada, tratada pela norma como gravidade específica ou densidade relativa.

Dos corpos de prova ISO 527-2/1A (item 4.6, tipo gravata) virgens e envelhecidos foram retiradas amostras com menos de 5g. Suas massas, foram avaliados em uma balança analítica modelo AB204, do fabricante Mettler Toledo, com resolução de décimo de miligrama do Laboratório de Polímeros do Grupo Schaeffler, Sorocaba/SP.

Os pesos foram obtidos no ar e imersos em água, no qual os resultados foram inseridos na Equação 2, da qual foram obtidos os valores de densidade relativa em g/cm^3 .

$$D_{[\text{g/cm}^3]} = \frac{M_{\text{ar}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} * 1 \quad (2)$$

no qual: M_{ar} é a massa da amostra no ar em g, $M_{\text{H}_2\text{O}}$ é a massa da amostra imersa em água em g e 1 g/cm^3 é a densidade relativa da água.

O método foi utilizado também para avaliar as condições do material antes do processamento por injeção do *design* proposto para o produto.

4.9 Caracterização dos compósitos propostos: Termogravimetria – TGA

As análises termogravimétricas (TGA) foram conduzidas em um equipamento DSC da NETZSCH, modelo 209 F1 Phoenix ®, com software analisador Proteus, disponível no Laboratório de Polímeros do Grupo Schaeffler em Sorocaba/SP. A taxa de aquecimento utilizada foi $10^\circ\text{C}/\text{min}$, em uma faixa de 20°C a 800°C (PINI et al,2006) sob atmosfera de gás

inerte (N₂). As quantidades de amostras variaram entre 24 mg e 32 mg. O ensaio consiste em aquecer a amostra sobre uma termobalança e esta registra as eventuais perdas de massa devido ao aquecimento e/ou outras formas de degradação. Foram testadas amostras dos compósitos **P35** e **PF30** após o envelhecimento em óleo e amostras dos mesmos materiais sem terem sido imersos, para análise comparativa.

4.10 Caracterização dos compósitos propostos: Calorimetria exploratória diferencial – DSC

Parâmetros térmicos importantes como a temperatura de transição vítrea, os pontos de fusão e temperatura de cristalização das amostras estudadas foram determinados através da técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

Os ensaios foram conduzidos conforme ASTM D3418 (2008), em um equipamento NETZSCH, modelo 204 F1 Phoenix ®, com software analisador Proteus, disponível no Laboratório de Polímeros do Grupo Schaeffler em Sorocaba/SP. O ensaio consiste em aquecer uma amostra controladamente dentro de um cadinho, simultaneamente ao aquecimento idêntico de um cadinho vazio.

Reações endotérmicas e exotérmicas que ocorram na amostra alterarão a temperatura da mesma e estas diferenças são proporcionais ao fluxo de calor (colocado num gráfico em função da temperatura) que atravessa a amostra durante o ensaio. Geralmente são realizados dois aquecimentos e um resfriamento intermediário. O primeiro aquecimento que termina após a fusão do material, destrói a história térmica prévia da amostra, e o resfriamento permite nova cristalização e posterior solidificação, quando inicia-se novo aquecimento. Este

é considerado bem mais característico do material em si do que o primeiro, pois a história térmica anterior foi apagada. Em todo o ensaio, é conveniente manter a amostra sob uma atmosfera inerte.

A taxa dos aquecimentos e resfriamento utilizada foi 10°C/min e, durante o ensaio a temperatura da amostra variou de 20°C a 340°C com atmosfera de nitrogênio. As quantidades de amostras variaram entre 16 mg e 26 mg e foram testados os compósitos com fibra de vidro (**P35**) e o que contém fibra de vidro e PTFE (**PF30**), antes (virgem) e após o ensaio de envelhecimento descrito no item 4.6.

4.11 Caracterização dos compósitos propostos: Análise de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR

O ensaio de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) no material PF30 foi realizado em um espectrofotômetro Nexus 4700 FTIR da Thermo Nicolet, do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais – CCDM, da UFSCar em São Carlos. Os espectros foram obtidos com 32 repetições, leitura de 4000 a 400 cm^{-1} , sendo para a realização do ensaio a amostra incorporada em uma pastilha de brometo de potássio (KBr). Este ensaio foi concebido para comprovação da presença do PTFE na amostra.

4.12 Caracterização dos compósitos propostos: Dureza Shore D

Os ensaios de dureza Shore D foram realizados no Laboratório de Polímeros da Schaeffler Brazil Ltda., de acordo com a norma ASTM D 2240 (2005) com um Durômetro Digital Zwick previamente calibrado. O ensaio consiste em pressionar com tensão definida, uma agulha normalizada contra uma amostra com espessura mínima de 6 mm. O tempo de exposição ao penetrador foi de 15 segundos.

Foram realizadas três medidas de dureza em placas com cerca de 10mm de espessura do PPA puro - **PPA**; do PPA com fibra de vidro (**P35**) e do PPA com fibra de vidro e politetrafluoretileno (**PF30**), envelhecidos e não envelhecidos.

4.13 Caracterização dos compósitos propostos: Impacto Charpy

O ensaio mecânico de impacto foi conduzido conforme método Charpy, segundo a norma ASTM D6110 (2006) em amostras envelhecidas e não envelhecidas de P35 e PF30. O ensaio consiste na quebra de um corpo de prova entalhado após ser atingido por um pêndulo com massa reconhecida. Para o cálculo da resistência ao impacto utilizou-se a Equação 3 (DARBELLO,2008).

$$RI_{[J/m^2]} = \frac{VEcal_{[J]}}{A_{[m^2]}} \quad (3)$$

no qual: RI = Resistência ao impacto, VEcal = Energia, descontada a energia de calibração
A = Área do corpo de prova

Para o ensaio foi adotado o pendulo de 1,0 J (1 kg) e o mesmo foi executado a temperatura ambiente, em três amostras de cada material previamente entalhadas em acordo com a normalização. Foi utilizado o equipamento CEAST modelo RESIL 5,5J disponível nos Laboratórios Analíticos da Braskem, cuja a fotografia é apresentada na Figura 23.

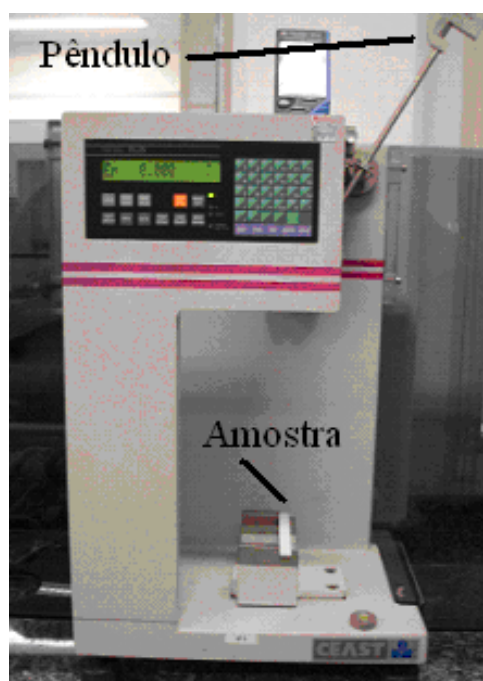


Figura 23 – Máquina de Impacto Pendular

4.14 Caracterização dos compósitos propostos: Tração

Para os ensaios de tração foi utilizado equipamento uma Máquina Universal de Ensaio do fabricante MTS, modelo Sintech 10G, com capacidade máxima de 50 kN, disponível no Laboratório de Matérias Primas do Grupo Schaeffler, Sorocaba/SP. A Figura 24 apresenta uma fotografia da máquina, com um detalhe da parte da fixação da amostra.

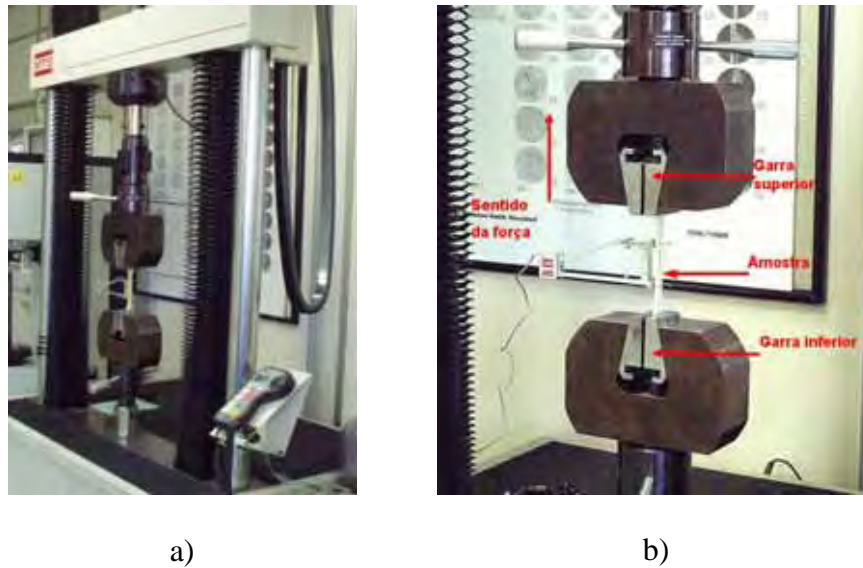


Figura 24 – Máquina universal de ensaios MTS: a) conjunto; b) detalhe da fixação

Os ensaios seguiram os procedimentos da norma ISO 527-1 (1993), com velocidade de deslocamento de 1mm/min, sob temperatura de 23°C. Os materiais compósitos descritos no item 4.5 foram analisados, sendo três amostras não envelhecidas e três amostras após o envelhecimento (item 4.6).

Deste ensaio foram obtidas as curvas tensão x deformação e dela parâmetros mecânicos de suma importância como módulo de elasticidade (E , dado em MPa) a tensão máxima de tração (σ_{Max} dada em MPa), a tensão de ruptura (σ_{rup} , dada em MPa) e o alongamento (ϵ dado em %).

4.15 Caracterização dos compósitos propostos: Ensaio tribológicos

Para a caracterização dos aspectos tribológicos dos materiais foram utilizadas três técnicas, com diferentes movimentos relativos. Duas delas, o ensaio de pino sobre disco e pino sobre placa deslizante, são normatizadas e uma terceira, a esfera sobre placa, está em fase de normatização, porém é muito utilizada para avaliação do comportamento tribológico com mecanismos de abrasividade (RUTHERFORD & HUTCHINGS,1996). Os ensaios tribológicos nos materiais compósitos foram conduzidos em amostras não envelhecidas.

4.15.1 Ensaio tribológicos dos materiais propostos: Ensaio de Pino sobre disco

O primeiro dos testes foi o ensaio pino sobre disco, conduzido sob a norma ASTM G99 (2005) em equipamentos do Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos (ASTM, 2005).

Neste ensaio os materiais foram testados em pares e em condições não abrasivas. Para o teste, faz-se necessário dois componentes, sendo um pino confeccionado com ponta esférica, cujo desenho pode ser observado na Figura 25, é posicionado perpendicularmente sobre um disco plano.

O pino fica constantemente sob carga recomendada pela norma e conseqüentemente em contato com o disco, o que provocará alguns possíveis perfis de desgaste, apresentados na Figura 26a (no qual somente o material do pino desgasta), 26b (no qual somente o material a ser testado desgasta) e 26c (no qual ambos pino e amostra se desgastam).

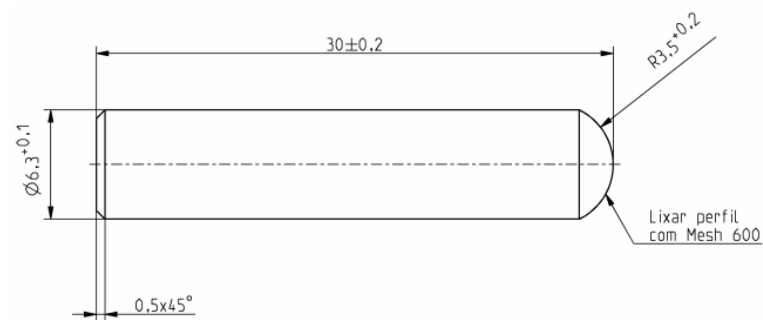


Figura 25 – Desenho de produção do pino para ensaio conforme ASTM G99-05

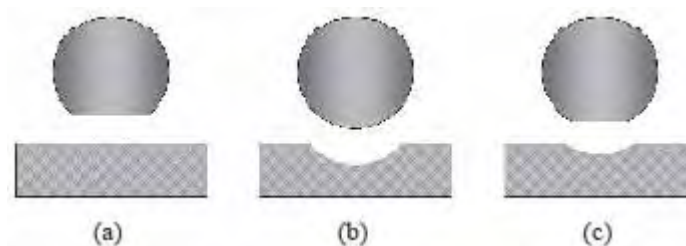


Figura 26 – Perfis de desgaste passíveis de serem obtidos em ensaio pino disco, no qual a (desgaste somente no pino), b (desgaste somente na amostra) e c (desgaste em ambos)

O material do qual o pino é constituído pode variar conforme norma e de acordo com os objetivos do ensaio. Foram então confeccionados pinos dos compósitos **PF30** (poliftalamida, politetrafluoretileno e 30% de fibra de vidro), **P35** (poliftalamida e 35% de fibra de vidro) através de usinagem simples partindo de placas injetadas cedidas pela Du Pont, e de aço **100Cr6** (recomendado pela norma), aço típico para a fabricação de rolamentos e muito utilizado em ensaios de desgaste.

As placas ensaiadas, com as quais foram cortados os discos, foram cedidas pela Du Pont no formato 100x100x3 mm (a norma recomenda espessura mínima de 2 mm) nos materiais **P35**, **PF30** e na poliftalamida pura (**PPA**). O ensaio também foi realizado em um disco de alumínio para comparação simulando a carcaça atual (item 4.4). A carga utilizada

foi de 2014 g (19,7 N) com uma rotação de 200 rpm e velocidade de 0,785 m/s (raio de pista de 37,5 mm) (ASTM,2005). Os pares testados são listados na Tabela 8, sendo que a condição de ensaio não lubrificada foi adotada para avaliar o comportamento da aplicação quando do início da operação no qual a lubrificação é baixa ou eventualmente nula.

Tabela 8 – Materiais ensaiados no ensaio Esfera sobre placa

Ensaio	Pino	Disco
PD 1	100Cr6	P35
PD 2		PF30
PD 3		Alumínio
PD 4	P35	PPA
PD 5		P35
PD 6		PF30
PD 7	PF30	PPA
PD 8		P35
PD 9		PF30

Para obtenção do volume do pino (V) antes e após o ensaio do pino foi utilizada a Equação 4 e os parâmetros área (S), raio esférico da ponta do pino (r) e altura da calota (h) medida pela diferença do comprimento do pino (A) antes e após o ensaio, são apresentados esquematicamente na Figura 27. Já o volume retirado do disco (Vd) é obtido pela Equação 5 e os parâmetros raio da pista (rp), altura da pista (hp) e o raio esférico da pista (rep) são apresentados esquematicamente na Figura 28.

$$V = \frac{\pi \cdot h}{6} \left(\frac{3}{4} S^2 + h^2 \right) = \pi \cdot h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) \quad (4)$$

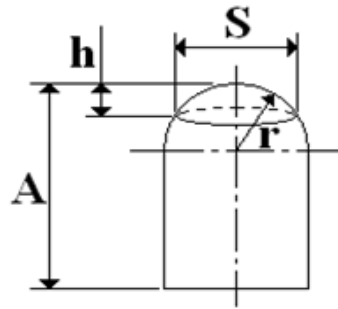


Figura 27 – Desenho esquemático da parte útil do pino conforme a norma ASTM G099-05.

$$Vd = \frac{\pi \cdot r \cdot p \cdot h p^3}{6 \cdot r e p} \quad (5)$$

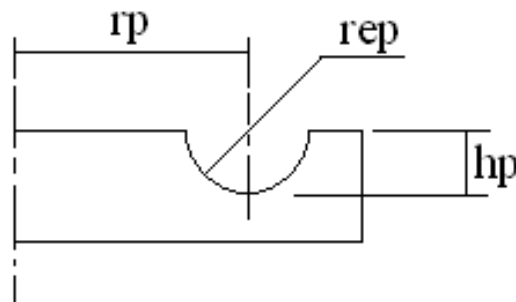


Figura 28 – Desenho esquemático do desgaste na pista conforme a norma ASTM G099-05.

4.15.2 Ensaio tribológico dos materiais propostos: Ensaio de Pino sobre placa deslizante (*reciprocating*)

O ensaio de pino sobre placa deslizante consiste no deslizamento linear alternativo de um pino sobre uma placa, denominado *reciprocating*. O equipamento no qual os ensaios foram realizados, pertence ao Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos. O ensaio foi conduzido segundo a norma

ASTM G133 (2005) e é comumente utilizado para avaliar o comportamento tribológico de materiais cuja aplicação resulta em reversões periódicas na direção do deslizamento relativo (TREZONA; ALLSOPP & HUTCHINGS,1999). Neste caso, o ensaio foi adotado para realizar a simulação dos aspectos tribológicos que ocorrem entre eixo e carcaça, além dos movimentos longitudinais que ocorrem entre os gerotores.

Para este ensaio todas as amostras foram testadas sob lubrificação em óleo SAE 20W50, e o mesmo pino esférico do ensaio pino sobre disco foi utilizado. A lubrificação é constante acondicionando-se o óleo no próprio porta-amostra. As amostras para o ensaio foram retiradas das placas cedidas com 100x100x3 mm (já comentadas no item 4.10.1), através de corte automático com lubrificação em um *cut off* modelo Discotom-5 Struers, para obtenção das dimensões de 37,5x24 mm recomendadas pela norma. Os pares testados são listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Materiais ensaiados no ensaio *reciprocating*

Ensaio	Pino	Disco
RC 1	SINT	Alumínio
RC 2	P35	P35
RC 3		PF30
RC 4	PF30	P35
RC 5		PF30

As medidas dos parâmetros necessários para os cálculos de volume desgastado, cujo procedimento de medição é o mesmo demonstrado no item 4.15.1, foram feitas utilizando-se os seguintes equipamentos, também do Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos: perfilômetro tridimensional WICO NT 1100 *Optical Profiling System* do Departamento de Física da USP São Carlos, microscópio óptico binocular marca Zeiss com câmera digital marca Sony acoplada, câmera

fotográfica digital marca Sony Cyber-Shot e paquímetro digital marca Mitutoyo (0,01-200mm).

Os testes foram conduzidos sob carga axial de 3840 g durante os tempos de 1; 3 e 5 minutos, para as distâncias percorridas de, respectivamente 7,7 ; 23,2 e 38,6 metros em uma trilha de 12 mm de comprimento com velocidade de trabalho de 322 ciclos de ida e 322 ciclos de volta do pino por minuto (frequência de 10,44 Hz). Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente com umidade relativa do ar entre 40% e 60% (ASTM G133, 2005).

4.15.3 Ensaios tribológicos dos materiais propostos: Ensaio de Esfera sobre Placa

Os métodos mais tradicionais para a análise de desgaste são o pino disco e *reciprocating*. Estas duas técnicas de desgastes são bastante utilizadas para se caracterizar recobrimentos e tratamentos de superfícies.

Às vezes, porém podem ser ineficientes na medição da taxa de desgaste, por apresentar pares cujos desenhos e movimentos não simularem efetivamente o uso. Uma técnica relativamente recente foi testada, que é a esfera sobre placa cujo esquema pode ser mais bem visualizado na Figura 29.

Para esta pesquisa preferiu-se ensaiar o par tribológico com e sem lubrificante, de modo a analisar eventuais modificações no tipo de desgaste de adesivo para abrasivo. A presença do lubrificante impacta em redução de interação entre superfícies, ou seja, adesividade entre superfícies (HUTCHINGS, 1992). Isso permite avaliar o comportamento dos pares frente à condição real da aplicação, isto é, sob regime de lubrificação constante,

além de avaliar o ponto de partida da operação com baixa ou nula lubrificação. O processo simula a rotação do eixo na carcaça, a rotação do gerotor externo na carcaça e a rotação do gerotor interno no gerotor externo.

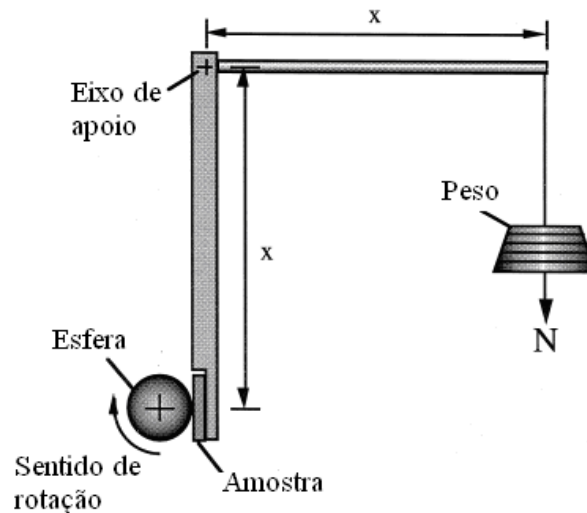


Figura 30 – Esquema do ensaio Placa sobre esfera (caloteste).

O ensaio esfera de aço sobre placa foi conduzido em máquina especialmente projetada, pertencente ao Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos. Neste equipamento uma esfera de aço gira em rotação e pressão constante contra uma placa da amostra que se quer avaliar, conforme apresentado na Figura 30.



Figura 31 – Detalhe da esfera atuando na placa durante o ensaio.

Como pode ser observado na Figura 31, o ensaio de esfera sobre placa consiste em promover o contato entre uma esfera e uma amostra plana com a esfera girando em relação à amostra, possibilitando o uso de cargas elevadas e conseqüentemente altas tensões no ensaio. O resultado desse contato é uma região desgastada em forma de uma calota esférica, possuindo relação geométrica com a esfera que a gerou. Assim, conhecendo-se o diâmetro da calota pode-se determinar a quantidade de material removido durante o ensaio (GEE et al, 2003).

Para uma calota de desgaste com geometria esférica produzida por uma esfera de raio “R” em uma amostra plana, o volume desgastado (V_e) pode ser calculado de acordo com a Equação 6 e com os diâmetro da calota (b) e raio da esfera de teste (R).

$$V_e = \frac{\pi \cdot b^4}{64 \cdot R} \quad (6)$$

As medidas dos parâmetros necessários para os cálculos de volume foram feitas utilizando-se os mesmos equipamentos do item 4.10.2: perfilômetro WICO NT 1100 *Optical Profiling System*, Microscópio Óptico binocular marca Zeiss com câmera de vídeo,

Câmera fotográfica e paquímetro digital marca Mitutoyo (0,01-200 mm), do Departamento de Engenharia e Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP São Carlos.

O ensaio em questão foi realizado a seco e com utilização de lubrificante SAE 20W50, através de gotejamento a cada 30 segundos, com cargas de 1826 g, nos tempos de ensaio de 5,10,15 e 20 minutos com rotação constante da esfera de 300 rpm. Os pares tribológicos testados estão listados na Tabela 10, tendo sido utilizadas esferas de aço SAE52100 (100Cr6) e placas de compósitos.

As esferas possuíam diâmetro de 1” (25,4 mm) e foram fornecidas pela Schaeffler Group com dureza superficial de 63 ± 3 HRC. Já as placas de compósitos, assim como no ensaio de pino sobre placa (4.10.2), tinham dimensões de 37,5x24x3 mm, condições estas para todos os ensaios lubrificados ou não para esfera sobre placa. Estas condições foram determinadas após resultados de pré-testes para resultar em um desgaste significativo que permitisse um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos, uma vez que com as cargas iniciais de 665 g e 1349 g não houve sucesso em se obter níveis de desgaste para análise.

Tabela 10 – Materiais ensaiados no ensaio Esfera sob Placa.

Ensaio	Condição	Esfera	Placa
EP 1	Seco	100 Cr6 (SAE 52100)	PPA
EP 2			P35
EP 3			PF30
EP 4	Lubrificado SAE 20W50		PPA
EP 5			P35
EP 6			PF30

4.16 Caracterização dos compósitos propostos: Análise térmica dinâmico-mecânica – DMA

As análises térmicas dinâmico-mecânicas foram conduzidas em um equipamento DMA, modelo 2980 da TA Instruments disponível no Laboratório de Materiais Compósitos da Divisão de Materiais do Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA). O objetivo do ensaio era verificar mudanças no comportamento mecânico dos materiais compósitos **P35** e **PF30** sem envelhecimento conforme se variou a temperatura.

Utilizou-se os modos de flexão em três pontos, com intuito de simular o eixo, uma vez que este componente é tido por mais crítico em termos de exigência mecânica (GAMEZ-MONTEIRO,2004). Foram empregadas frequências fixas em 8,3 Hz (simulando a rotação de funcionamento da bomba de óleo em ponto morto); 45 Hz (simulando a rotação de funcionamento da bomba de óleo em marcha média) e 100 Hz (simulando a rotação de funcionamento da bomba de óleo em marcha alta) num intervalo de temperatura entre 30°C a 250°C com taxa de aquecimento de 10°C/min. As amostras foram seccionadas a partir de placas injetadas no formato 100x100x3 mm, nas dimensões de 35x13 mm nos dois materiais ensaiados.

O ensaio fornece informações do comportamento viscoelástico de um sistema, dividindo-o em duas componentes: a elástica (tensão e deformação em fase) e a viscosa (tensão e deformação fora de fase). Assim podem ser obtidas curvas em função da temperatura do: a) módulo de armazenamento (E') – medida da energia mecânica que o material consegue armazenar na forma de energia potencial ou elástica, segundo condições experimentais, isto é, componente elástica; b) módulo de perda (E'') – associado à componente plástica do polímero, ou seja, relaciona a tensão e a deformação fora de fase e c) do fator de amortecimento ($\tan \delta$, dado pela relação E''/E') – a medida da capacidade de um

material de converter energia mecânica, a partir da aplicação de uma tensão ou deformação relativamente baixa.

Dentre todas as opções possíveis do ensaio de DMA, a utilizada (variação da temperatura com frequência e amplitude constante) é recomendada para determinação de transições de fase e verificação de estabilidade dimensional (CASSU & FELISBERTI, 2005; CANEVAROLO, 2003).

Uma aplicação bastante importante deste ensaio foi à utilização dos valores de módulo de armazenamento a 150°C dos compósitos para obtenção dos módulos de elasticidade (E) nesta temperatura. Esses dados alimentaram a análise de elementos finitos - FEA, abordada no item 4.15.

A temperatura de transição vítrea – T_g é obtida através da temperatura correspondente ao máximo da curva do módulo de perda (CASSU & FELISBERTI, 2005; CANEVAROLO, 2003).

4.17 Caracterização dos compósitos propostos: Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Para observação da zona de fratura dos ensaios mecânicos e do aspecto de desgaste dos ensaios tribológicos as amostras foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura em um microscópio eletrônico de varredura Quanta Inspect S (FEI), disponível no Laboratório de Análises Metalúrgicas do Grupo Schaeffler, em Sorocaba/SP. As análises foram realizadas em modo BSED (elétrons retroespalhados) com ampliações variando entre 50x e 1.000x, com tensão de 20 kV. Também foram obtidos os espectros de análise química

elementar por análise de energia dispersiva (EDS) através do detector de raios-X INCA x-sight (Oxford) acoplado ao equipamento.

Para realização deste ensaio foi necessária a metalização das amostras devido à natureza não condutiva dos compósitos poliméricos, razão pela qual em todos os espectros aparecer o elemento ouro, o metal do recobrimento (SOARES & SARON, 2010). Esta metalização foi conduzida no Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Foram ensaiados apenas os materiais aditivados com PTFE, devido seu maior interesse em compor os gerotores, elementos mais críticos da aplicação.

4.18 Caracterização dos compósitos propostos: Análise de elementos finitos para modelo proposto – FEA

Os resultados obtidos do ensaio realizado em 4.2, relativo às curvas de vazão, foram dados de entrada para a proposta de um projeto para o novo produto. O mesmo foi elaborado no software paramétrico de modelamento matemático ProE WildFire II da PTC.

Concluído o modelamento matemático do novo produto o mesmo foi analisado pela metodologia de elementos finitos – FEA através do Pro Mechanica da PTC integrado ao ProE WildFire II, sob as seguintes condições de contorno:

- Temperatura de análise: 150°C;
- Pressão interna da bomba: 3 bar (0,3 MPa);
- Propriedades dos polímeros:
 - **P35** (carcaça);
 - Coeficiente de Poisson: 0,39 (Du Pont, 2003);

- Coeficiente de expansão térmica paralelo: $0,15 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Du Pont, 2003);
- Coeficiente de expansão térmica normal: $0,45 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Du Pont, 2003);
- **PF30** (rotor interno e eixo integrado);
 - Coeficiente de Poisson: 0,39 (Du Pont, 2003);
 - Coeficiente de expansão térmica paralelo: $0,11 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Du Pont, 2003);
 - Coeficiente de expansão térmica normal: $0,65 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Du Pont, 2003);

Os módulos de elasticidade para os polímeros foram obtidos através dos resultados dos ensaios de DMA através do módulo de armazenamento (*storage modulus*) á temperatura de 150°C.

Os engastamentos na região de furos para passagem dos parafusos travando todos os graus de liberdade nos eixos x, y e z podem ser visualizados conforme Figura 31, e as superfícies de aplicação das forças na Figura 32. Estes engastamentos simulam o componente sob ação dos parafusos.

Para esta Dissertação somente foram analisados os itens mais críticos que são a carcaça e o rotor interno. As análises realizadas foram: a) tensão Von Mises (dada em MPa), que será utilizada comparando-se as tensões de resistência a ruptura obtidas no ensaio de tração (item 4.14), ou seja, se a tensão atuante na simulação (tensão de Von Mises) for menor que a tensão de ruptura do material o ensaio terá resultado positivo; b) deslocamento (mm) para melhor compreensão das folgas entre componentes e c) deformação (adimensional) cujos valores serão comparados com os alongamentos obtidos no ensaio de tração (item 4.14), ou

seja, valores de deformação na simulação menores que os valores de alongamento do material o ensaio terá resultado positivo.



Figura 31 – Detalhe do desgaste (escuro), travando nos furos (carcaça) e no corpo cilíndrico (eixo) todos os graus de liberdade

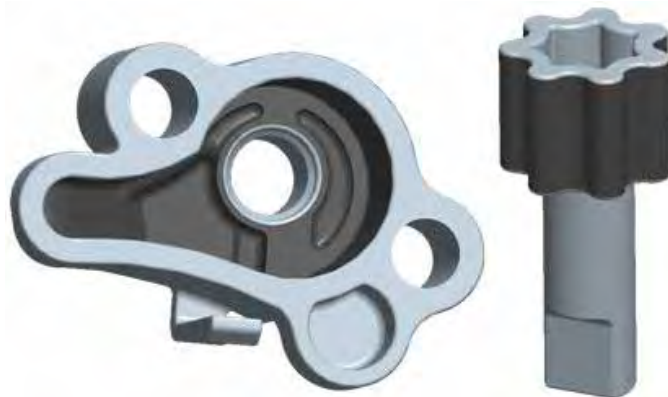


Figura 32 – Detalhe da área (escuro) de aplicação de pressão

4.19 Validação do *design* proposto

A validação do modelo proposto foi realizada pela medição do desempenho do produto através do ensaio de monitoramento de vazão em relação à rotação conforme item 4.2

A Figura 33 apresenta a expansão da estrutura, sendo apresentados com destaque a carcaça, o rotor interno, o rotor externo, a placa e os pinos.

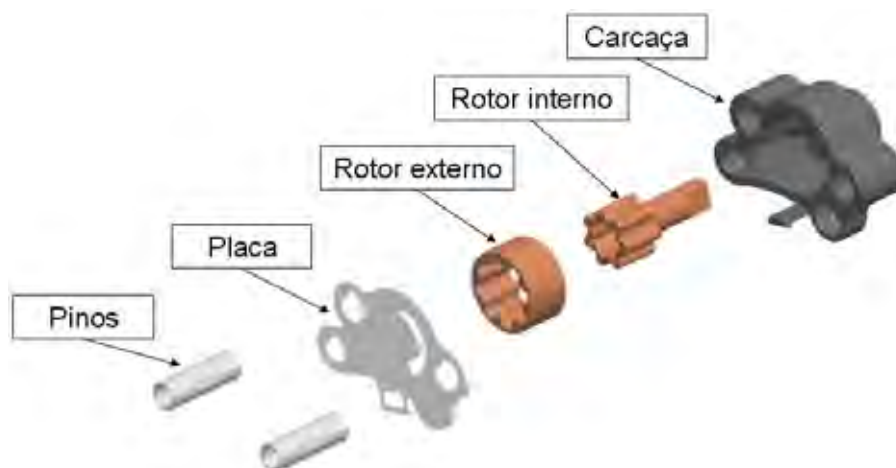


Figura 33 – Detalhe dos materiais empregados para validação do novo produto

Pelo projeto proposto, a carcaça, o rotor interno e o externo serão fabricados em compósitos, P35, PF30 e PF30, respectivamente. Para a validação do design, os componentes a serem fabricados em compósitos foram produzidos em aço 100Cr6 sem tratamento para validação exclusiva do desempenho do produto pelo Grupo Schaeffler.

A placa foi fabricada através de corte a laser nas dimensões determinadas pelo modelo matemático, de chapa de aço SAE1010 (mesmo material de fabricação atual) e depois foram fosfatizadas. Os pinos foram usinados em aço DC04 (mesmo material utilizado

atualmente) utilizando-se de torno convencional e o rasgo foi obtido através de uma fresadora universal e sua superfície também foi fosfatizada.

A carcaça foi confeccionada em alumínio SAE 383 (cuja composição química será detalhada no item 5.4 Tabela 15) utilizando-se de centro de usinagem CNC com dimensões partindo do modelo matemático produzido para o design.

A montagem do conjunto foi realizada de forma manual e a colocação dos itens de aquisição e sensoriamento na moto foi executada de acordo com item 4.2, sendo executados os testes conforme o mesmo procedimento.

5. Resultados e discussões

5.1 Análise de Modo de Efeito e Falha – FMEA

A Tabela 11 apresenta o resultado do FMEA de Projeto executado para as funções e modos de falha, efeitos, causa da falha potencial e formas de controle atual. Ao todo são apontadas oito causas de possíveis falhas que podem ocorrer com a bomba, as quais poderiam fazer com que a peça não cumprisse sua função.

A Tabela 12 apresenta para cada causa da falha potencial, as formas de controle atual, as ações recomendadas e o resultado das ações. Ao final da Tabela é realizado o comparativo de NPRs (Número de Prioridade de Risco) antes e depois das ações.

Segundo a contagem de NPR apresentada na Tabela 12, o maior número obtido foi de 392 para a causa potencial envolvendo excesso de resíduo devido à presença do novo material, causa esta que está ligada ao desgaste dos componentes no novo material. Com as ações recomendadas, em especial o ensaio de partículas residuais em amostra de campo (item 4.3) aliado a adoção de filtro de óleo já para o projeto atual, este número reduziu para 56.

Pode-se observar na Tabela 12 que outras três causas de falha apresentavam NPR maior que 200. A realização e os resultados satisfatórios dos ensaios de bancada para monitoramento do desempenho (vazão, rotação, temperatura e pressão), bem como ensaios de caracterização dos materiais propostos, ensaios tribológicos e de compatibilidade (ensaio mecânicos após envelhecimento, densidade, TG e DSC), fizeram que todas as causas de falhas (inclusive as quatro que inicialmente tinham NPR acima de 200) ficassem em patamares inferiores a 60, o que é considerado aceitável em termos de um novo projeto. Os

itens 5.2 a 5.15 vão apresentar os resultados de todos os ensaios realizados e a análise destes permitirá concluir que foram satisfatórios.

Dessa forma, acredita-se que a substituição dos materiais atuais para os materiais propostos é viável.

Tabela 11 – FMEA – Funções, modos de falha, efeitos, causa da falha potencial e formas de controle atual

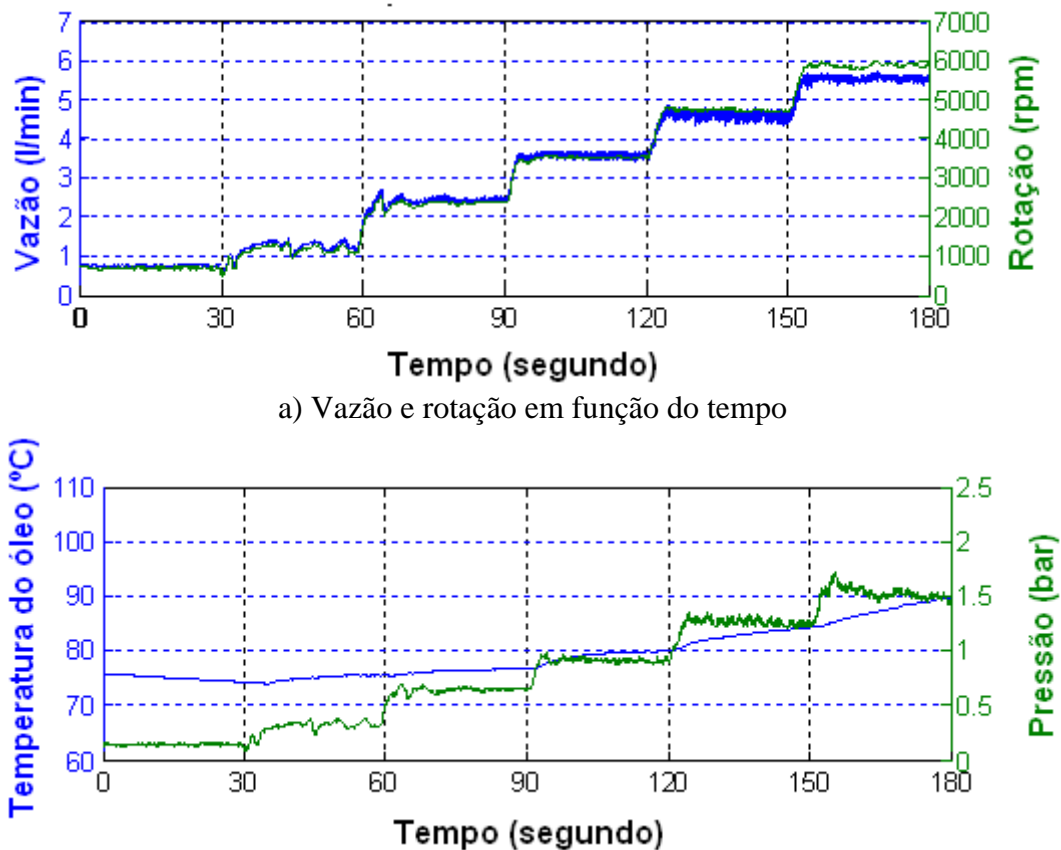
Função	Modos de falha	Efeitos	Causa da Falha potencial	Formas de controle atual
Bombear óleo em acordo as especificações de desempenho	Não bombear, bombear parcialmente, bombear em excesso	Fundir o motor	Dimensional inadequado	Calculo de tolerância, CAD, FEA
		Danificar os componentes	Especificação de materiais em condições críticas de operação; Análise estrutural, compatibilidade química	Teste prático de materiais sob condições da aplicação. Compatibilidade química. Durabilidade. Tribologia
		Desgastar componentes	Perfil e design incorreto	Testes práticos
			Material incompatível com óleo	Teste de bancada com óleo. Teste de compatibilidade química.
			Seleção de materiais	Avaliar dados de fadiga do material
			Excesso de resíduo devido a presença do novo material	Teste de partículas residuais
			Especificação incorreta de temperatura de operação	Pesquisar especificação de lubrificação. Temperatura de aprovação e pressão do motor.
		Cavitação	Geometria dos gerotores	Testes experimentais

Tabela 12 – FMEA – causa da falha potencial, formas de controle atual, as ações recomendadas e o resultado das ações e NPR comparativo

Causa da Falha potencial	Formas de controle atual	Ações recomendadas	Resultado das ações	NPR	
				Antes	Depois
Dimensional inadequado	Calculo de tolerância, CAD, FEA	Nenhuma.	-	54	54
Especificação de materiais e propriedades em condições críticas de operação; Análise estrutural, compatibilidade e química	Teste prático de materiais sob condições da aplicação. Compatibilidade química. Durabilidade. Tribologia	Teste prático de materiais sob condições da aplicação. Compatibilidade química. Durabilidade. Tribologia.	Realizado teste prático com o compósito, incluindo testes de envelhecimento, ensaios mecânicos, bem como os ensaios tribológicos	294	49
Perfil e design incorreto	Testes práticos	Testes práticos	Perfil aprovado	144	24
Material incompatível com óleo ou inadequado	Teste de bancada com óleo. Teste de compatibilidade química.	Teste de bancada com óleo. Teste de compatibilidade química.	Envelhecimento de material e realizados testes (DSC, TG e densidade)	140	35
Seleção de materiais	Avaliar dados de fadiga do material	Avaliar dados de fadiga do material	Usar curvas fornecidas pela Du Pont	294	49
Excesso de resíduo devido a presença do novo material	Teste de partículas residuais	Teste de partículas residuais	O filtro de óleo retém partículas maiores que 100µm	392	56
Especificação incorreta de temperatura de operação	Pesquisar especificação de lubrificação. Temperatura de aprovação e pressão do motor.	Pesquisar especificação de lubrificação. Temperatura de aprovação e pressão do motor.	Óleo SAE 20W50 confirmado por FTIR. Temperatura e pressão monitorados por testes experimentais.	42	14
Geometria dos gerotores	Testes experimentais	Realizar ensaio de bancada para verificar pressão e vazão	Pressão e vazão monitoradas e aprovadas	210	35

5.2 Determinação do desempenho do produto atual

A Figura 34 apresenta os resultados do desempenho de uma bomba de óleo original nova. Por sua vez, a Figura 35 apresenta a desempenho de uma bomba original desta vez com 80.000 km de uso.



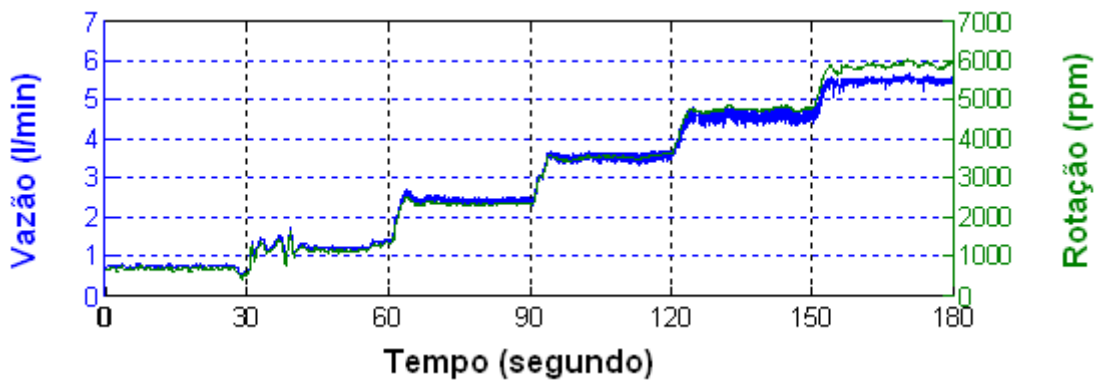
a) Vazão e rotação em função do tempo

b) Temperatura de trabalho e pressão atingida em função do tempo

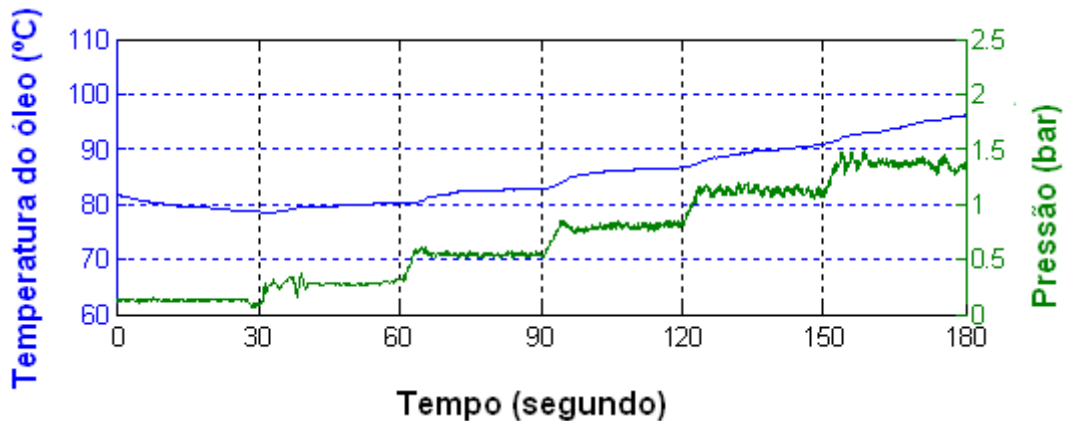
Figura 34 – Desempenho de uma bomba de óleo original nova

Com os dados do monitoramento da Figura 35 é possível identificar que, em uma bomba nova, a maior pressão situa-se em patamares abaixo de 1,7 bar e o maior pico de temperatura de trabalho foi de 90°C. O sistema se estabiliza após 180 segundos, com isso a

pressão de trabalho constante é 1,5 bar. Quanto ao fluxo de óleo (vazão) o monitoramento demonstra ruídos em baixas rotações no qual a partir de 2500 rpm a vazão se torna praticamente constante (sem picos). A medida que se aproxima de 6000 rpm a relação rotação-vazão inicia sua amplitude máxima, atingindo vazão máxima de 5,6 L/min. O melhor desempenho deste produto encontra-se entre 2500 e 4500 rpm.



a) Vazão e rotação em função do tempo



b) Temperatura de trabalho e pressão atingida em função do tempo

Figura 35 – Desempenho de uma bomba de óleo original com 80000 km de uso

Conforme demonstra a Figura 35 o mesmo fenômeno de desempenho de amplitude da rotação em relação à vazão apresentada para a bomba nova, ocorre para a usada. Isto é explicado pela mudança de regime do escoamento em relação ao perfil dos gerotores,

provavelmente ocorrendo neste ponto cavitação. Ainda assim a vazão de 5,5 L/min é atingida a 5500 rpm, o que comprova que mesmo com desgaste os componentes da bomba não perdem eficiência. Devido a este mesmo desgaste as folgas se ampliam e com isso a pressão de trabalho se reduz em uma pressão média de 1,35 bar, cerca de 10% menor em relação a uma bomba nova. A temperatura de trabalho para a bomba usada se amplia e atinge 97°C.

A curva vazão versus rotação é apresentada na Figura 36, obtida a partir dos dados do monitoramento de desempenho. A comparação entre bombas é realizada também contra o desempenho da bomba teórica, considerando pelo dimensional dos gerotores um volume deslocado de 1,33 L/min a 1000 rpm e vazão linear sem perdas devido ao volume útil de seus dentes conforme Equação 01 e Figura 19.

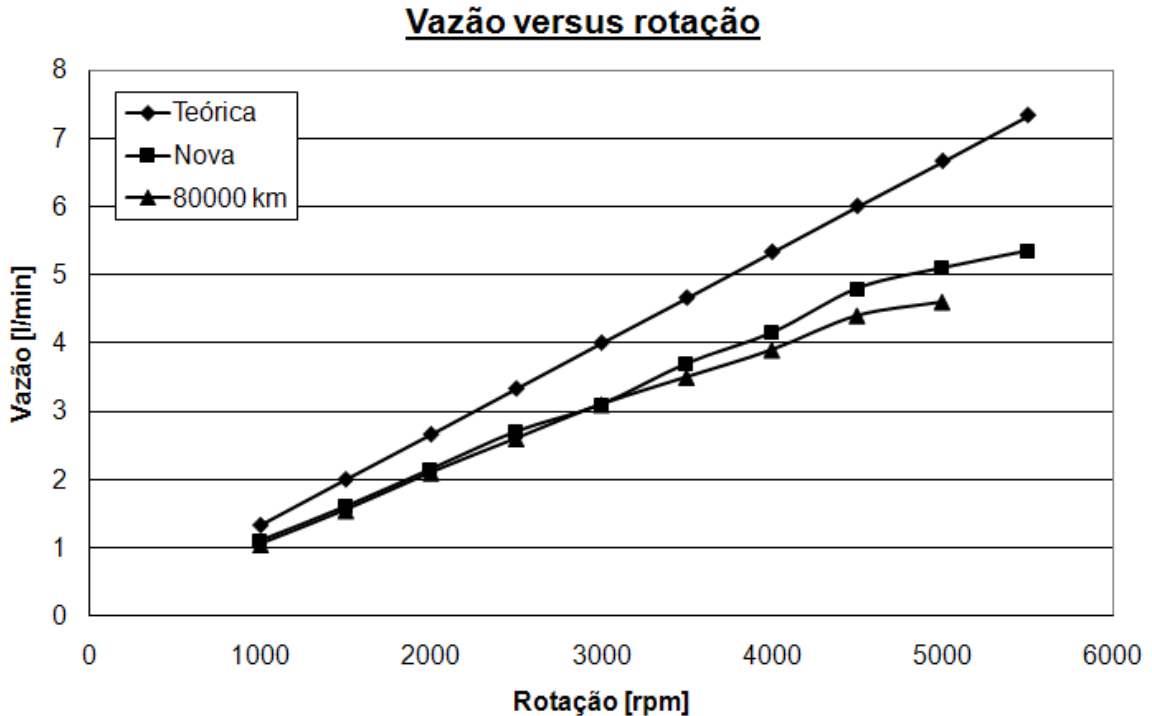


Figura 36 – Curva comparativa de vazão entre uma bomba teórica sem perdas, uma nova e uma com 80000 km de uso

A diferença de comportamento entre as bombas pode ser mais bem observada quando gerado gráfico de perdas (diferença entre a vazão medida no produto e a vazão teórica sem perdas) em função da rotação, conforme apresentado na Figura 37. A bomba nova, por apresentar folga menor e por não possuir desgaste, mantém os níveis de fluxo de óleo com baixas perdas em relação à bomba com 80.000 km de uso, que possui maiores folga e desgaste. A perda média da bomba nova é em torno de 21,1% com pico de 27% a 5500 rpm, enquanto a bomba usada fica com média de 33,1% e pico de 44,8% a 5000 rpm. São consideradas normais neste tipo de bomba com gerotores, perdas em torno de 15% (LINSINGEN,2001).

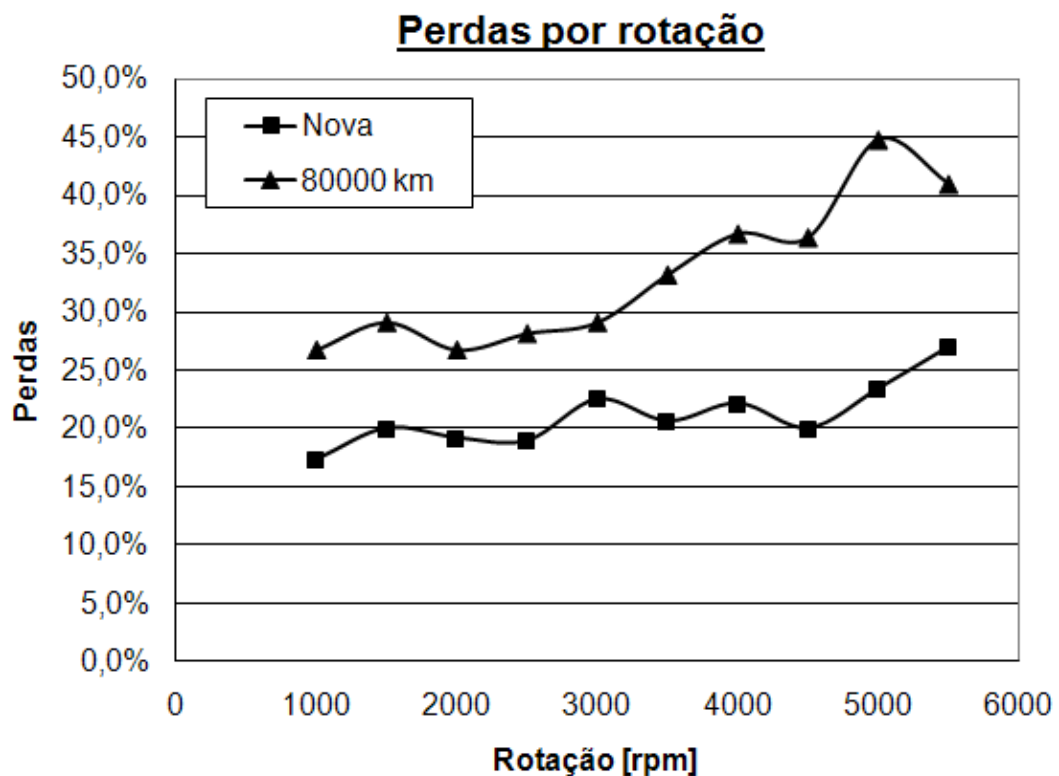


Figura 37 – Curva de perdas por rotação de uma bomba nova e outra com 80000 km de uso

5.3 Determinação das condições do óleo pós-uso

Como indicado no item 4.3 as análises de FTIR foram comparativas de modo a observar através dos espectros se os óleos utilizados pelos consumidores finais são o indicado pelo fabricante. Uma alteração significativa no óleo utilizado poderia comprometer o compósito proposto para a bomba.

Como mostra a Figura 38, o espectro base foi gerado a partir de um óleo virgem indicado pelo fabricante. Esta curva-padrão é determinada e enviada pelo próprio fabricante do óleo, sendo que para obtê-la deve-se utilizar a quantidade indicada de óleo pelo mesmo para análise.

Na indústria estas análises são comparativas, ou seja, amostras a serem avaliadas devem apresentar o mesmo padrão de espectro. Os resultados das amostras são mostrados nas Figuras 39 e 40.

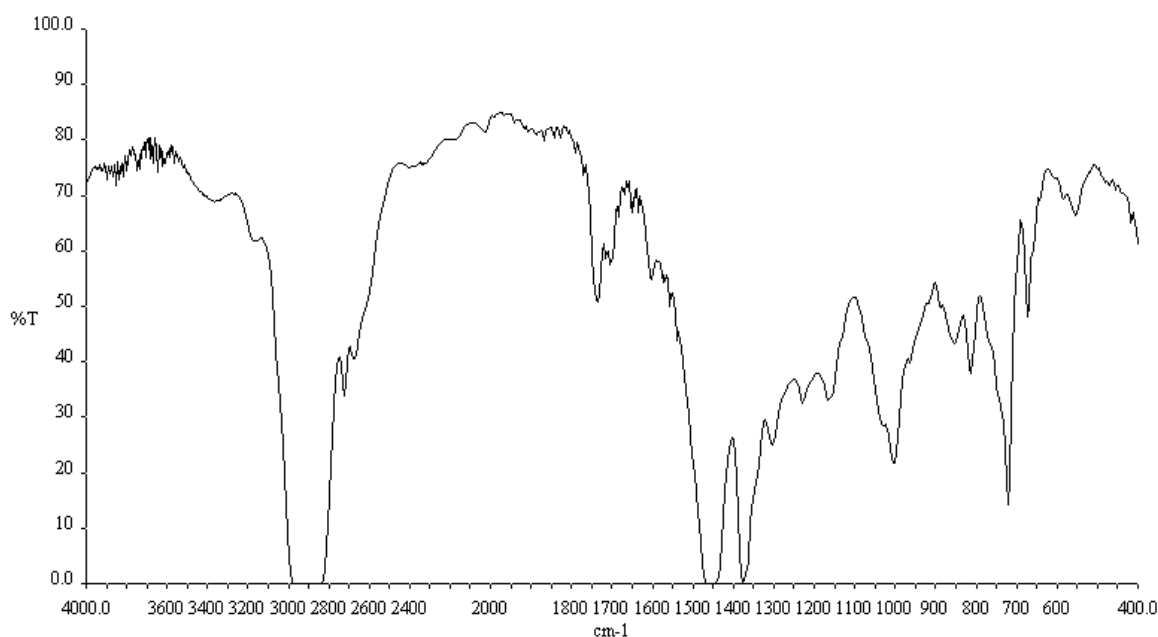


Figura 38 – Espectros de transmitância padrão para óleo virgem recomendado

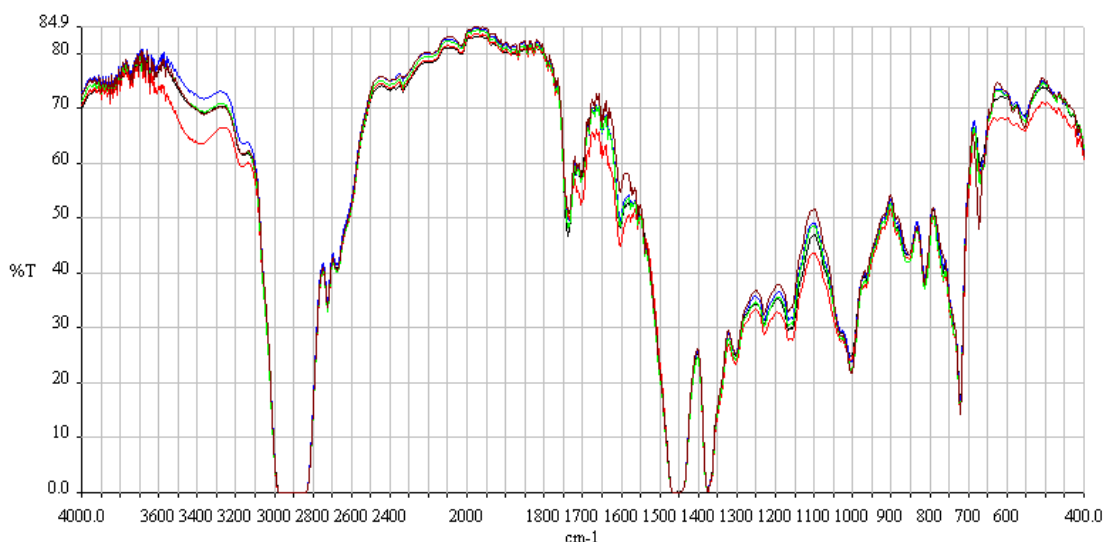


Figura 39 – Espectros de transmitância das amostras. Virgem (vinho); Amostra 1 (vermelho); Amostra 3 (azul); Amostra 4 (preto) e Amostra 5 (verde)

A Figura 38 revelou algumas bandas características do óleo, listadas na Tabela 13 (LOPES & FASCIO, 2004).

Tabela 13 – Bandas de FTIR para o óleo recomendado pelo fabricante.

Intervalo de banda (cm ⁻¹)	Atribuição
750 - 720	substituição 1,4 (para) anel aromático
1000	Vibrações de anéis aromáticos
1510 - 1450	Estiramento de anéis aromáticos
próximos a 2900	Estiramento C-H

O resultado comprova que o óleo utilizado é o recomendado pelo fabricante (SAE 20W50) na maioria dos casos. Uma divergência foi encontrada em uma amostra com espectro (de cor azul na Figura 39) foi um pouco diferente do padrão e dos demais. Essa diferença pode ser melhor visualizada na Figura 40, em que o referido espectro é comparado sozinho com o do óleo virgem. A comparação deste espectro com os padrões de óleos

lubrificantes SAE permitiu a identificação do mesmo como SAE 10W30. Acredita-se que, por possuir natureza química semelhante este não atuará de forma significativamente diferente do SAE 20W50 e que teria sido escolhido por apresentar um custo inferior ao indicado.

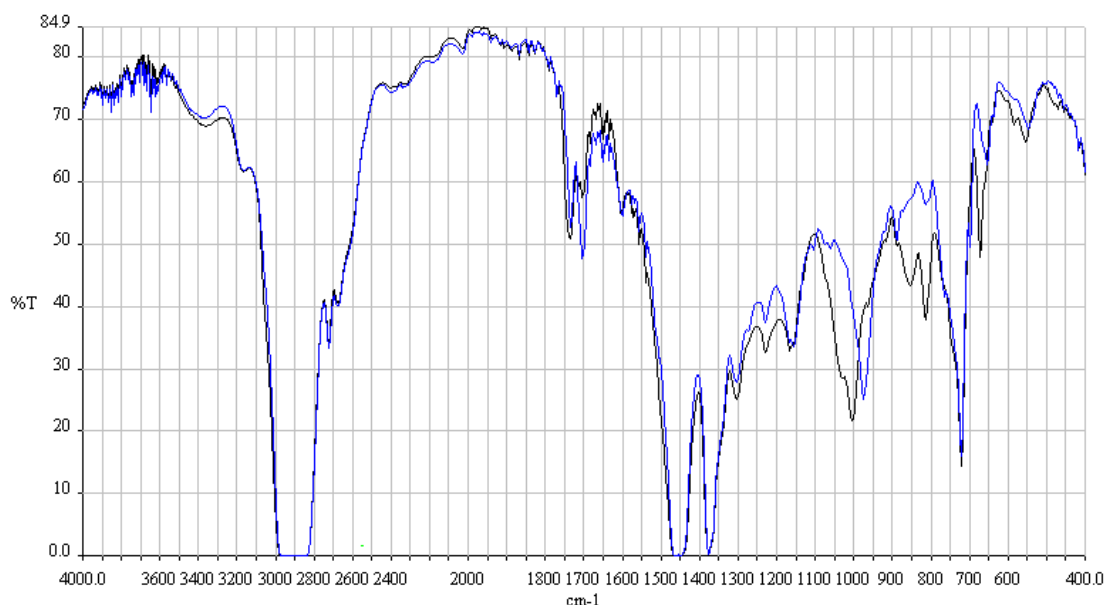


Figura 40 – Espectros de transmitância da amostra divergente e o padrão. Virgem (preto); Amostra 2 (azul).

A Figura 40 revelou algumas bandas diferentes em relação ao óleo SAE 20W50, características do óleo 10W30 conforme indicado pelo fabricante, listadas na Tabela 14 (COATES, 2000; LOPES & FASCIO, 2004).

Tabela 14 – Bandas de FTIR para o óleo divergente (10W30).

Intervalo de banda (cm ⁻¹)	Atribuição
750 - 720	Substituição 1,4 (para) anel aromático
850 – 800	=C-H e =CH ₂ (dobramento angular)
1000	Vibrações de anéis aromáticos
1510 - 1450	Estiramento de anéis aromáticos
1700	Carbonila
próximos a 2900	Estiramento C-H

Os resultados de partículas constam na Tabela 15, na qual se verifica a eficácia do filtro de óleo situado anterior à câmara de entrada da bomba de óleo. A presença de partículas, sobretudo metálicas, vem de outros componentes do próprio motor. A presença de partículas grandes no circuito da bomba, sobretudo de partículas com dimensões acima das folgas permitidas entre componentes poderia provocar desgaste excessivo de componentes.

Tabela 15 – Análise quantitativa e qualitativa de impurezas de óleo lubrificantes em fim de vida de motocicletas 150cc.

Característica	Resíduos (g/kg)	Avaliação Qualitativa	Tamanho da maior partícula (mm)
Amostra 1 (8364 km)	0,21	Resíduo metálico	0,07
Amostra 2 (11835 km)	0,69	Resíduo metálico	0,40
Amostra 3 (32000 km)	0,71	Resíduo metálico	0,10
Amostra 4 (1000 km)	0,28	Resíduo metálico	0,10
Amostra 5 (5000 km)	0,27	Resíduo metálico	0,05

O resultado do desgaste de pequenas partículas (menores que 0,04 mm) que o filtro permite passar, aliado ao desgaste adesivo entre componentes provoca trilhas nos componentes das bombas utilizadas.

Em uma análise visual observou-se que este desgaste é prematuro, ou seja, ocorre de forma mais atuante em motores com pouco uso, pois boa parte das impurezas são levadas pelo óleo lubrificante dos componentes novos do motor até o reservatório de óleo. Estas impurezas ficam no reservatório do motor e tendem a serem eliminadas na substituição deste óleo.

No entanto, devido a folgas que vão se originando durante o uso do motor, ou dependendo das condições de uso do produto, mais partículas vão se originando e sendo eliminadas do seu local de origem pelo óleo.

Observa-se ainda pela Tabela 15 a não correlação entre tempo de uso do motor e quantidade de resíduos, o que reforça a necessidade da troca de óleo em períodos recomendados. O resultado visual do desgaste em componentes comparativo entre motos com baixa e alta quilometragem pode ser mais bem observado na Figura 41.

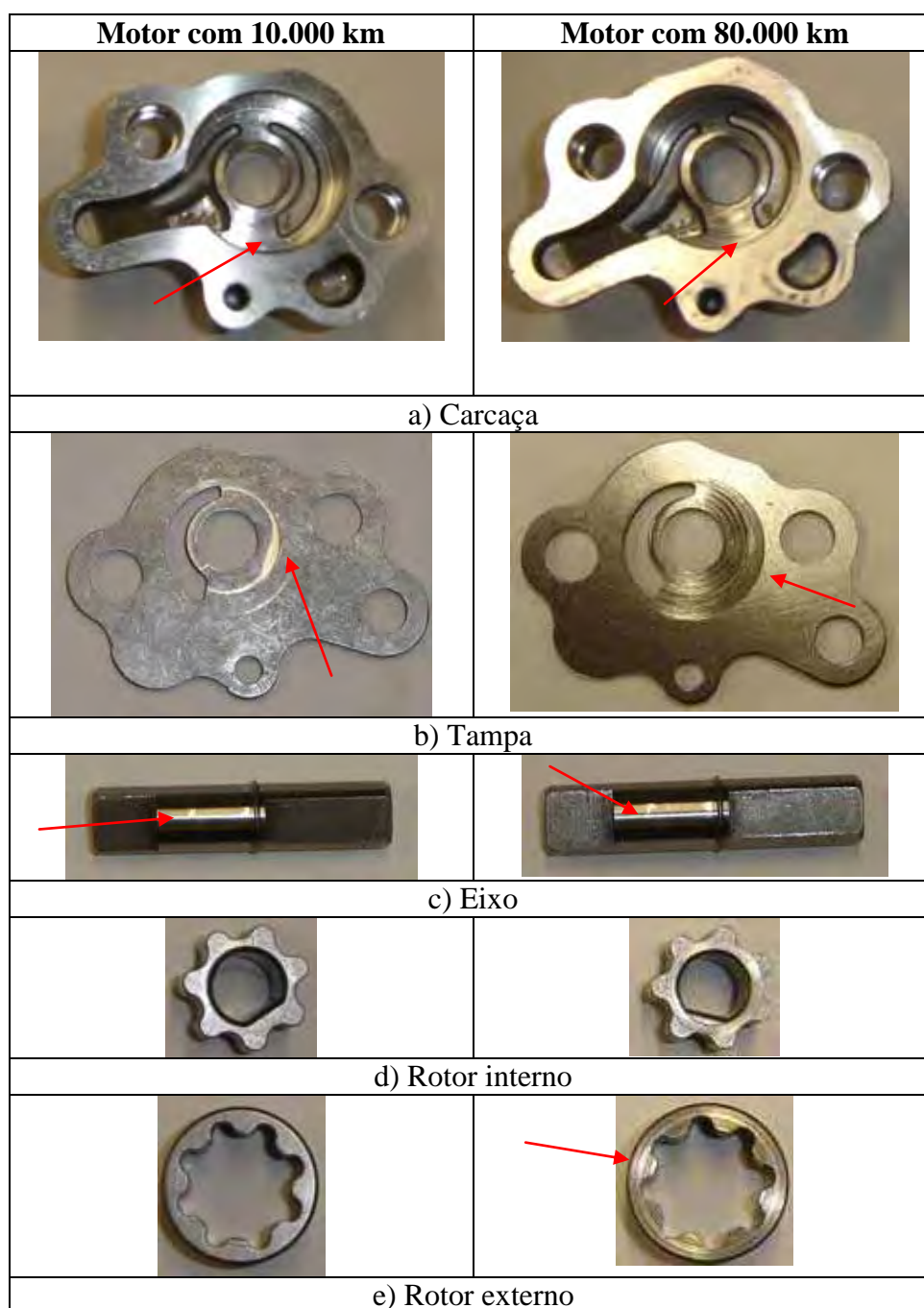


Figura 41 – Análise visual das condições de desgaste – comparativo. Escala 1:1

A verificação deste desgaste aliado ao monitoramento de desempenho comparativo entre uma bomba nova e uma usada com 80.000 km demonstra que as tolerâncias e folgas permitidas podem ser ampliadas, isso porque como comprovado pelo monitoramento da bomba de 80.000 km mesmo com desgaste (o que amplia as folgas) o produto mantém desempenho similar a um novo.

Estima-se que devido ao processo produtivo de sinterização, o campo de tolerância adotado para um projeto de gerotor utilize dimensões centesimais com campo aproximado entre 0,02 e 0,06 mm (CREMONEZI et al, 2009). No processo produtivo envolvendo termoplásticos, as tolerâncias de fabricação em geral são abertas podendo estas ser direcionadas conforme norma ou ainda tabeladas conforme indicação dos fabricantes (DIN 16901, 1982; AMODEL, 2006).

A tolerância de fabricação adotada impactará diretamente nas folgas entre gerotores, face a face entre gerotores e carcaça, e são imprescindíveis para o desempenho do produto. Outro ponto importante no qual esta impacta é no custo do produto sendo este maior quanto menor a tolerância adotada.

Observou-se que na carcaça o maior ponto de desgaste encontrado é na área de apoio do gerotor externo próximo às zonas de entrada e saída (explicitadas na Figura 6), e um leve desgaste no alojamento do mesmo gerotor. Este se deve ao contato direto entre uma peça mais dura contra uma mais mole (desgaste adesivo), ou seja, aço sinterizado contra alumínio.

No contato com o eixo também é encontrado leve desgaste, enquanto na tampa o desgaste encontrado é devido à rotação dos gerotores diretamente em contato com a mesma. Ainda com folgas existindo entre a face da tampa e a face dos gerotores, com a alta rotação a força centrífuga e a pressão do óleo que existe nas zonas de entrada e saída (empuxo) devem elevar os gerotores já que estes não possuem muito peso.

O desgaste encontrado no eixo é mínimo e visto no diâmetro externo que fica em contato com o alojamento da carcaça. O tratamento de cementação encontrado no eixo reduz sensivelmente o desgaste. Nos rotores o perfil de desgaste é encontrado nas faces e nos diâmetros externos e internos. As faces se desgastam pelo contato direto em rotação com os outros componentes e os diâmetros se desgastam devido a micropartículas (leve desgaste abrasivo) e eventual cavitação.

5.4 Caracterização dos materiais atualmente empregados

A Tabela 16 apresenta os resultados das análises químicas das peças que compõem a bomba de óleo feita em metal e na Tabela 17 são apresentados os valores médios de dureza de cada peça.

Tabela 16 – Análise química dos componentes do produto atual

Elementos	Carcaça	Eixo	Gerotores	Placa
Fe	0,89	Restante	Restante	Restante
C	-	0,19	0,32	0,09
Mn	0,21	0,77	-	0,36
P	-	0,024	-	0,032
S	-	0,017	-	0,012
Al	83,6	-	-	-
Si	10,8	0,19	-	-
Ni	0,17	0,41	-	-
Cr	-	0,47	-	-
Cu	2,3	-	2,8	-
Zn	1,4	-	-	-
Mo	-	0,15	-	-
Outros	0,63	-	0,83	-
Conclusão para classificação do material	SAE 383	SAE 8620	DIN SINT C11	SAE 1010

Tabela 17 – Análise das durezas dos componentes do produto atual

Componentes	Dureza
Carcaça	86 – 91 HB
Eixo	733 – 768 HV10 Camada: 0,45 – 0,49 CHD 550 HV1
Gerotor interno	42 – 45 Rockwell B
Gerotor externo	43 – 45 Rockwell B
Placa de vedação	112 – 117 HB

A análise de caracterização dos materiais metálicos atualmente empregados demonstram a utilização de metais e processos produtivos altamente conhecidos na área mecânica.

As durezas encontradas são típicas dos materiais sem tratamento térmico, a exceção do eixo que sofreu tratamento térmico de cementação uma vez que apresenta camada com alta dureza típica deste tratamento, bem como apresenta valores que encontram-se em patamares comumente utilizados na indústria.

São processos e materiais facilmente empregados em especial os aços **SAE 1010** e **8620**. A maior dificuldade encontra-se no aço sinterizado **DIN SINT C11**, pois no Brasil são poucos os fornecedores que trabalham com este tipo de material. O processo de sinterização utilizado para produzir peças com estes materiais é adequado para peças de geometrias muito complexas e garante uma excelente tolerância de processo, porém tem custo maior que os outros aços utilizados (CREMONEZI, 2009).

Se estes processos forem substituídos por injeção de materiais baseados em termoplásticos os ganhos em custo poderão ser atrativos, pois serão eliminadas etapas e equipamentos de alto custo de operação e manutenção, como prensas e fornos. Ou seja, o

fluxograma produtivo de uma peça injetada é extremamente simplificado em relação ao processo de sinterização.

Se eixo e gerotor interno forem acoplados, a otimização de processo se torna ainda mais ampla. Para se ter uma idéia de como a substituição de peças fabricadas em metais por peças baseadas em termoplásticos pode ser interessante, estudo feito com um pistão de lavadora de alta pressão mostrou que a substituição do aço 100Cr6 pelo compósito PF30 reduziria o número de etapas do processo produtivo de 13 para 2. Ainda, resultaria numa diminuição de gastos de energia elétrica de 83% e de água em 99,9%, o que contribuiu para que o custo final da peça em compósito possa ficar 27% inferior que a do metal e com massa 88% menor (SANTOS NETO & MANCINI, 2009).

5.5 Ângulo de contato e energia de superfície

A Tabela 18 apresenta os resultados para o ângulo de contato e a conseqüente classificação de todos os materiais ensaiados como hidrofílicos, pois todos os ângulos de contato θ medidos foram menores que 90° . Em caso de apresentar ângulo θ maior que 90° o material seria classificado como hidrofóbico (DARBELLO, 2008). Por sua vez a Tabela 19 apresenta os valores de energia superficial polar, dispersiva e total.

Observa-se pela Tabela 18, que os valores dos ensaios de ângulo de contato classificam todos os materiais como hidrofílicos. Os valores indicam uma menor característica de serem hidrofílicos dos materiais compósitos ensaiados em relação aos materiais metálicos.

Tabela 18 – Ângulo de contato nos materiais metálicos e compósitos ensaiados.

Materiais	Ângulo de contato - θ (°)		Classificação hidrofílica ($\theta \leq 90^\circ$) hidrofóbica ($\theta \geq 90^\circ$)
	Polar (água deionizada)	Apolar (dióxido de metano)	
Metálicos			
Sinterizado	75,68	43,54	hidrofílica
Aço 16MnCr5	77,01	47,91	hidrofílica
Aço C80M	74,99	36,27	hidrofílica
Compósitos			
P35	79,59	49,28	hidrofílica
PF30	83,62	45,36	hidrofílica

Tabela 19 – Valores de energia superficial polar, dispersiva e total nos materiais ensaiados.

Materiais	Energia superficial - γ (Dyn.cm)		
	Polar	Dispersiva	Total
Metálicos			
Sinterizado	6,416	34,22	40,63
Aço 16MnCr5	6,484	31,96	38,45
Aço C80M	5,722	37,90	43,60
Poliméricos			
P35	5,516	31,50	37,02
PF30	3,376	34,25	37,62

A energia superficial polar está ligada às interações totais entre o sólido e o líquido. Essas interações são do tipo dipolo – dipolo e ligações de hidrogênio, que em situações de contato, como exemplo as que acontecem em aplicações com desgaste adesivo, ocorrem facilmente.

O material que apresentou menor energia superficial polar entre os avaliados foi a PF30. A baixa afinidade polar deste material deve-se ao PTFE que não apresenta polaridade em sua estrutura química.

Reduzindo a adesão entre contatos reduzem-se os valores de coeficiente de atrito e as taxas de desgaste. Logo, se a adesão de um material é tanto melhor quanto maior sua energia superficial, a redução destes valores melhora os aspectos tribológicos do material.

O aço sinterizado apresentou valores de energia superficial polar em um nível cerca de quase 2 vezes maior que o apresentado pela PF30, o que sugere que em termos de desgaste o material compósito terá melhor comportamento.

5.6 Densidade dos compósitos propostos

A Tabela 20 apresenta os valores das densidades obtidas em corpos de prova originados de materiais com os compósitos como recebidos (virgem) e envelhecidos em óleo.

Tabela 20 – Densidades das amostras de resina virgem e envelhecida em óleo. Resultados em g/cm^3 .

Material	Virgem (g/cm^3)		Envelhecido (g/cm^3)	
	Amostras	Média	Amostras	Média
P35	1 ^a : 1,47	1,47	1 ^a : 1,48	1,47
	2 ^a : 1,47		2 ^a : 1,47	
	3 ^a : 1,47		3 ^a : 1,47	
PF30	1 ^a : 1,55	1,55	1 ^a : 1,55	1,55
	2 ^a : 1,55		2 ^a : 1,55	
	3 ^a : 1,55		3 ^a : 1,55	

Os resultados demonstram que não houve interferência do envelhecimento em óleo nas características de densidade dos materiais ensaiados. De certa forma este resultado sugere que o espaço entre as macromoléculas do polímero permaneceu em suas dimensões originais, o que deverá contribuir para a manutenção das propriedades mecânicas dos materiais.

O fato dos valores de densidade não ter variado sugere que não há a tendência, até certo ponto esperada para polímeros imersos em óleo, de inchamento. Isto diminuiria a

densidade (aumentaria o volume) e poderia contribuir para alterações dimensionais nas peças a serem fabricadas com estes materiais, diminuindo folgas e eventualmente superando as tolerâncias. A entrada de óleo poderia também alterar propriedades mecânicas, tornando o material mais flexível.

5.7 Termogravimetria – TGA

Nas Figuras 42 e 43 são apresentadas, respectivamente, as curvas termogravimétricas dos compósitos P35 e PF30 virgem e envelhecidos.

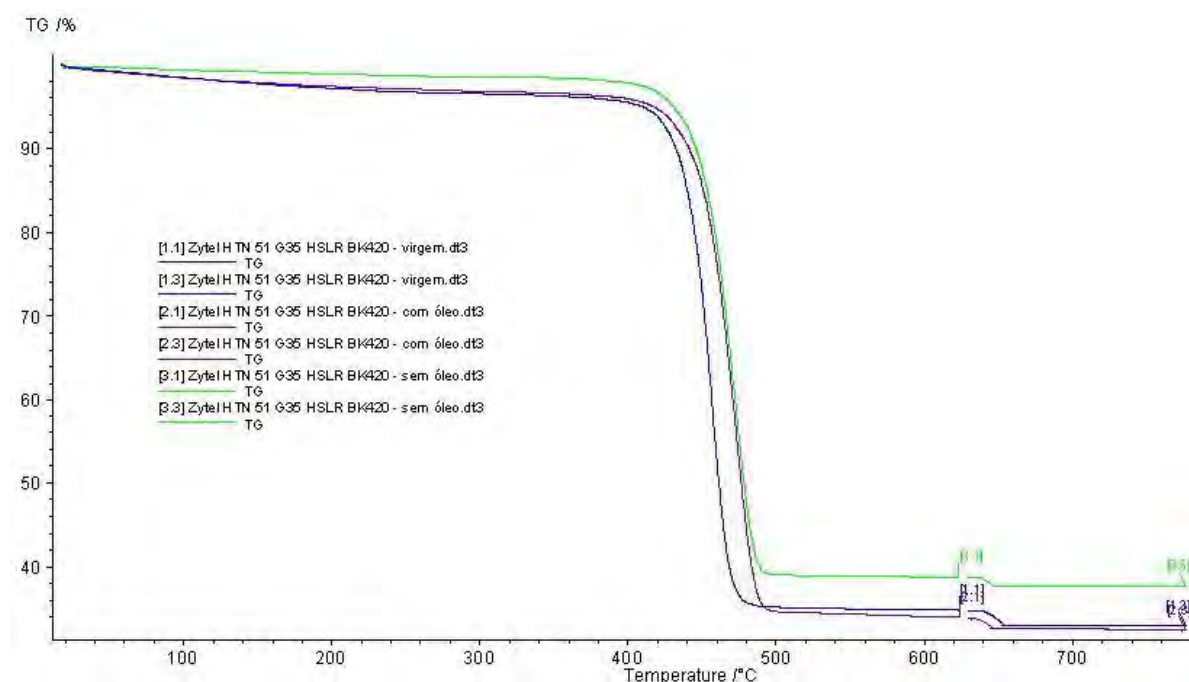


Figura 42 – Curva de termogravimetria do P35 virgem (azul), envelhecido em óleo (roxo) e envelhecido não imerso em óleo (verde).

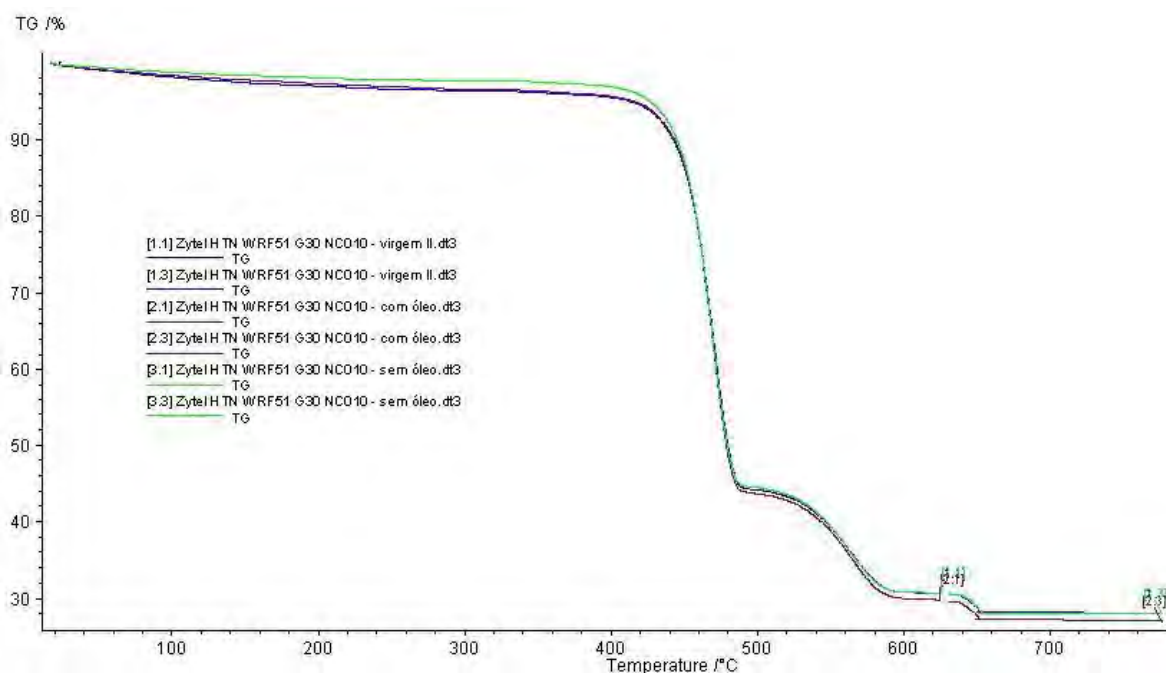


Figura 43 – Curva de termogravimetria do PF30 virgem (azul), envelhecido em óleo (roxo) e envelhecido não imerso em óleo (verde).

Com os resultados das curvas termogravimétricas identifica-se que os compósitos nas versões virgem e envelhecida não apresentam variações (virgem e envelhecidas) e se mostram muito estáveis. Até a temperatura de trabalho, cerca de 100°C, a P35 apresenta 98,43% de sua massa original enquanto a PF30 98,11%, ou seja, a perda possivelmente se refere ao teor de umidade presente. O teor residual para P35, ou seja, o percentual de material que não volatizou acima de 650°C (inorgânicos) foi de 32,91% e para PF30 foi de 27,99%. Esses teores estão próximos aos 35% e 30% informados pelo fabricante para o teor de fibra de vidro. Esta última ainda possui uma perda de massa intermediária de 13,69% provavelmente relativo ao PTFE.

5.8 Calorimetria exploratória diferencial – DSC

Nas Figuras 44 e 45 estão as curvas de DSC do P35 e PF30 (virgens e envelhecidos), respectivamente. Em cada curva constam apenas o resfriamento e o 2º aquecimento. Para este ensaio, amostras com corpos de prova envelhecidas a 150°C sem imersão em óleo (à seco) foram também analisadas. A Tabela 21 apresenta os valores dos parâmetros obtidos nas curvas, quais sejam: temperatura de cristalização (T_c), entalpia de cristalização (ΔH_c), temperatura de fusão (T_m) e entalpia de fusão (ΔH_f).

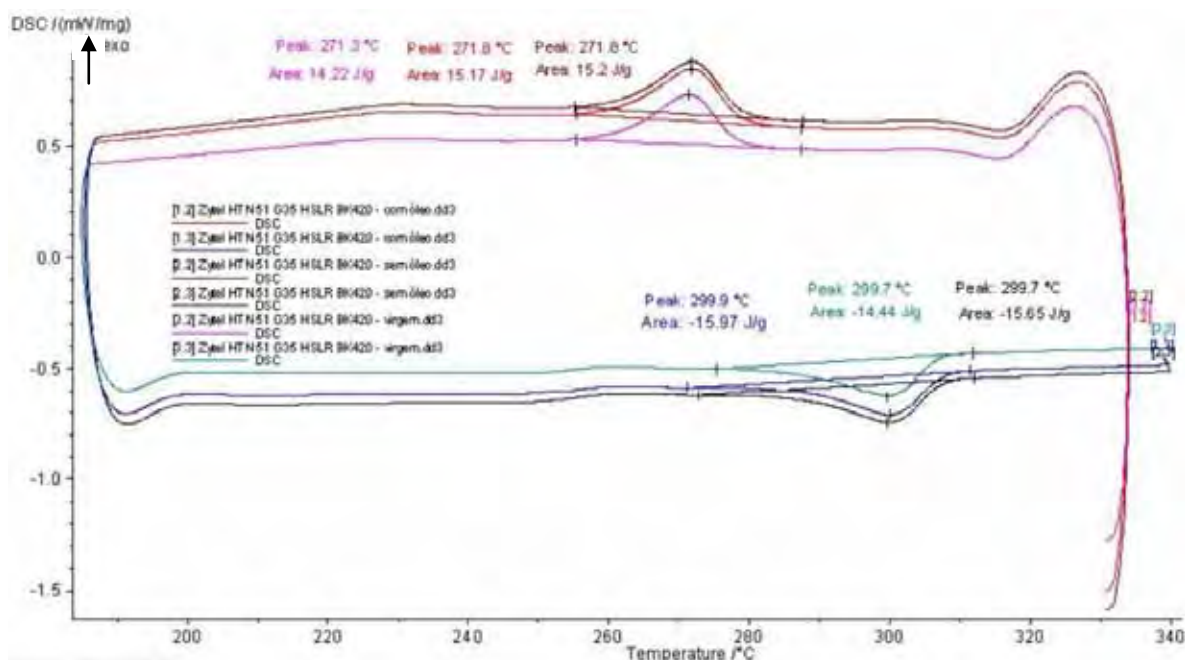


Figura 44 – Curvas de DSC para P35, virgem (rosa e verde), envelhecida em óleo (vermelho e azul) e envelhecida não imerso em óleo (marrom e preto), bem como temperaturas e parâmetros obtidos.

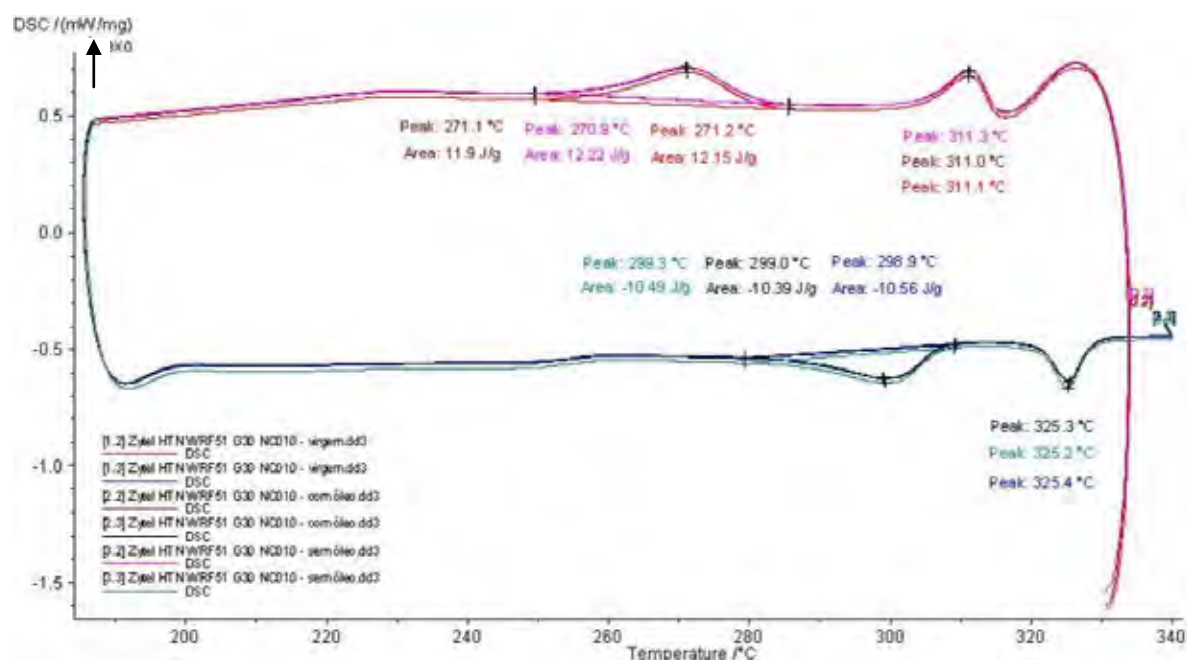


Figura 45 – Curvas de DSC para PF30, virgem (vermelho e azul), envelhecida em óleo (marrom e preto) e envelhecida não imerso em óleo (rosa e verde), bem como temperaturas e parâmetros obtidos

Tabela 21 – Temperaturas e entalpias de fusão – $T_m/\Delta H_f$ e cristalização – $T_c / \Delta H_c$ das amostras virgem e envelhecidas em óleo e a seco.

Material	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)
P35 virgem	271,5	14,22	300,3	14,44
P35 envelhecida em óleo	271,8	15,17	299,9	15,97
P35 envelhecida à seco	271,8	15,20	299,7	15,65
PF30 virgem	271,2 ¹ / 311,1 ²	11,9 ¹ / 5,1 ²	298,9 ¹ / 325,4 ²	10,6 ¹ / 5,2 ²
PF30 envelhecida em óleo	271,1 ¹ / 311,0 ²	12,2 ¹ / 5,2 ²	299,0 ¹ / 325,3 ²	10,4 ¹ / 5,2 ²
PF30 envelhecida à seco	270,9 ¹ / 311,3 ²	12,2 ¹ / 5,5 ²	299,3 ¹ / 325,2 ²	10,5 ¹ / 5,5 ²

¹ Primeiro pico – referente à matriz poliftalamida - PPA

² Segundo pico – referente ao politetrafluoretileno – PTFE

As Figuras 44 e 45 em conjunto com a Tabela 21 mostram que não ocorreram variações significativas nas temperaturas de fusão – T_m e de cristalização – T_c , sendo em alguns casos as diferenças entre as curvas imperceptíveis. Esses resultados demonstram que o envelhecimento realizado praticamente não altera estas propriedades térmicas dos compósitos. Os altos valores de T_c e T_m propiciam ao material maior resistência mecânica e desgaste em comparação com polímeros tradicionais. Para o material PF30 são apresentados dois picos de

T_c e T_m, sendo o de temperaturas menores se referem à poliftalamida e a de temperatura maiores ao PTFE indicando a imiscibilidade da mistura.

Com relação à entalpia de fusão, registrada como pico endotérmico nas curvas de DSC, observa-se tanto pelas Figuras e Tabelas que o envelhecimento, tanto em óleo quanto a seco, parece contribuir para o aumento de seus valores, exceção para o PF30 cujos os valores praticamente se mantiveram após o envelhecimento em óleo.

A entalpia de fusão tem uma relação direta com a cristalinidade dos materiais poliméricos envolvidos e, no caso do compósito sem PTFE observa-se que o envelhecimento provocou um aumento das entalpias em relação ao material virgem, o que pode explicar eventuais comportamentos mecânicos mais frágeis da resina envelhecida. Já as entalpias de cristalização (picos exotérmicos) apresentam comportamento semelhante ao das de fusão, e indicam a quantidade de material que cristalizou no resfriamento realizado.

5.9 Análise de infravermelho por transformada de Fourier – FTIR

A Figura 46 mostra o espectro no infravermelho da amostra PF30. A comparação com o espectro padrão de uma poliftalamida pode ser observada na Figura 47. Segundo o software acoplado ao equipamento há uma correlação de similaridade entre os espectros é de 83%. Esta diferença se deve deste compósito provavelmente conter, além da poliftalamida e da fibra de vidro (esta última invisível ao infravermelho), também o PTFE.

A Figura 46 revelou algumas bandas características do espectro, listadas na Tabela 22 (COATES, 2000). Já a Figura 47 apresenta uma comparação entre o espectro da

PF30 e o espectro de uma poliftalamida pura, enquanto a Figura 48 apresenta o espectro de uma amostra de politetrafluoretileno.

Tabela 22 – Bandas de FTIR que permitem identificação da PPA

Intervalo de banda (cm^{-1})	Atribuição
750-600	Deformação C-H; anel benzênico
próximo a 1440	Dobramento angular da NH (amida)
1680 – 1630	Grupo funcional amida (derivada de ácidos carboxílicos)
2850 - 3000	Estiramento assimétrico da CH_2

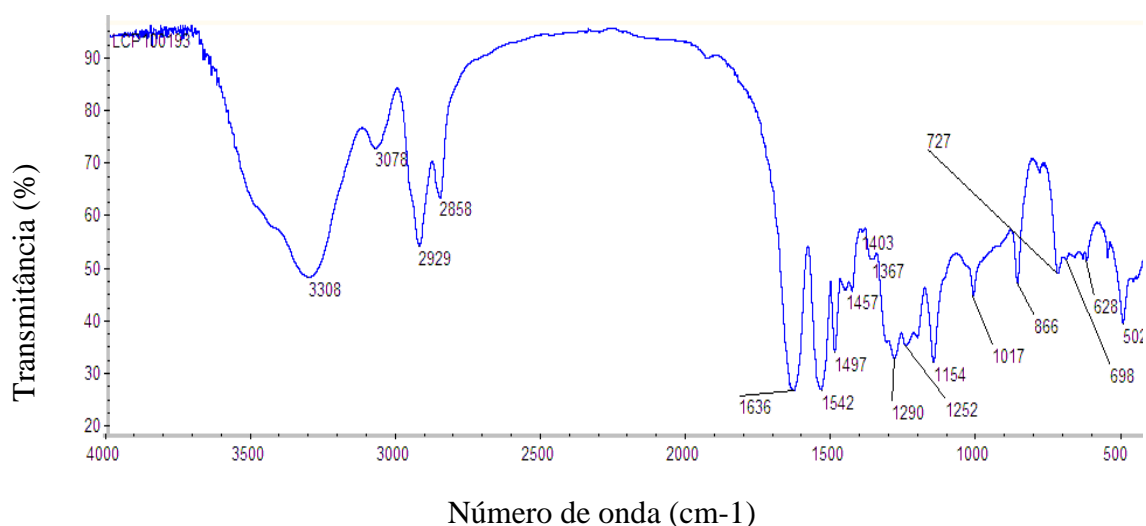


Figura 46 – Espectro FTIR da amostra de **PF30**

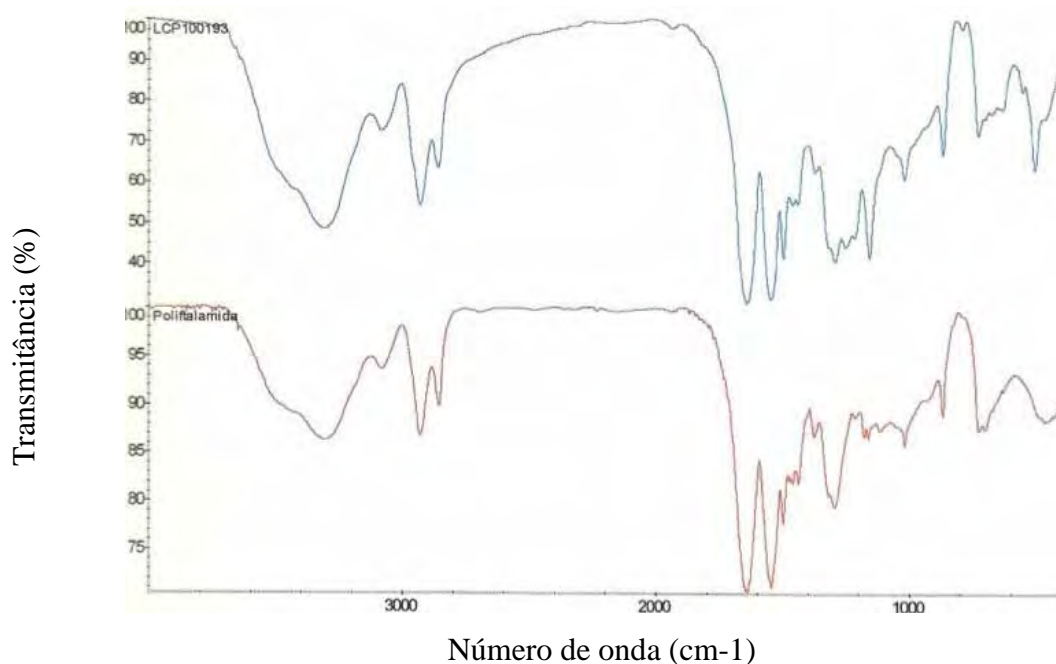


Figura 47 – Espectro FTIR da amostra de **PF30** comparativo (acima) com espectro de polifalámidas pura (abaixo).

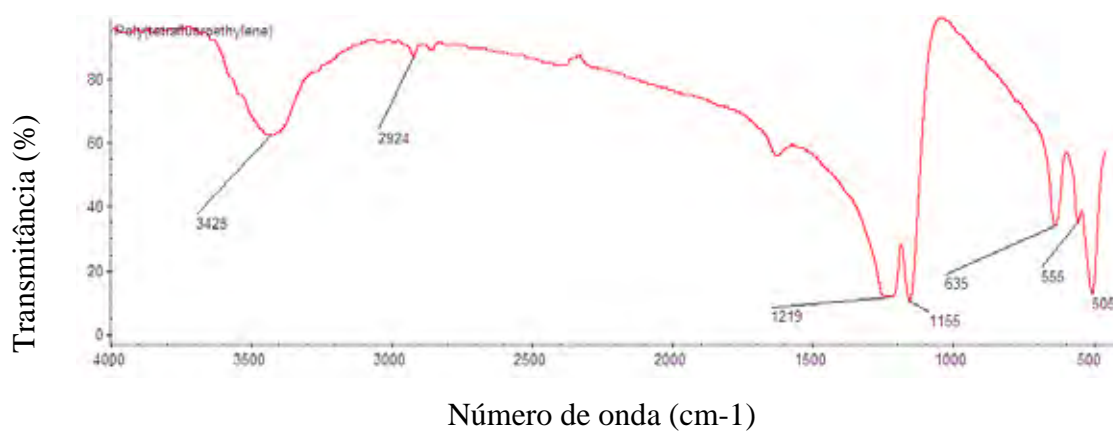


Figura 48 – Espectro FTIR de um padrão de politetrafluoretileno – **PTFE**.

A análise das Figuras 48 e 49 comprovam a incorporação do PTFE ao material PF30 estudado. Os picos do espectro característico do PTFE são o estiramento das ligações CF_2 entre 1000 e 1150 cm^{-1} (COATES, 2000) e as deformações axiais, simétricas e assimétricas para CF_2 além das bandas de polarização entre 640 e 556 cm^{-1} (FERRETO et al,

2006). Estes picos que não aparecem no padrão de poliftalamida são claros no padrão da amostra analisada (Figura 47) comprovando a existência do PTFE no PF30.

5.10 Dureza Shore D

A Tabela 23 apresenta os valores das durezas Shore D obtidas em corpos de prova originados de materiais com resina virgem e envelhecida em óleo. O material P35, tanto virgem quanto envelhecido, apresenta maior dureza superficial comparativamente ao PF30, pois possui maior teor de fibra de reforço.

Os resultados demonstram que não ocorre interferência do envelhecimento em óleo nas características de dureza Shore D dos materiais ensaiados. O pequeno acréscimo de dureza nas amostras envelhecidas poderia ser explicado pela maior cristalinidade do material envelhecido, sobrepujando o efeito da penetração do óleo, inchamento e flexibilização, ao menos na superfície (no qual é realizado o ensaio). Isto tende a acontecer, pois o envelhecimento foi realizado numa temperatura maior que a de transição vítrea (Tabela 24, item 5.14), o que significa que as cadeias tiveram energia para se movimentarem e eventualmente procurarem um melhor empacotamento.

Tabela 23 – Dureza Shore D das amostras de resina virgem e envelhecida em óleo. Resultados Shore D.

Material	Resina Virgem			Resina envelhecida		
	Amostras	Média	Desvio Padrão	Amostras	Média	Desvio Padrão
P35	1ª: 87,6	87,7	0,153	1ª: 88,4	88,6	0,173
	2ª: 87,9			2ª: 88,7		
	3ª: 87,7			3ª: 88,7		
PF30	1ª: 84,7	84,8	0,100	1ª: 86,1	86,1	0,153
	2ª: 84,8			2ª: 85,9		
	3ª: 84,9			3ª: 86,2		

5.11 Impacto Charpy

Na Tabela 24 são apresentados os resultados do ensaio de impacto Charpy, assim como as dimensões dos materiais ensaiados. Com os resultados da Tabela 24 se comprova que o material sofre interferências mínimas em suas propriedades mecânicas nas condições do envelhecimento realizado.

De fato o material sem PTFE sofre menos variação na energia absorvida e apresenta maiores valores de Resistência ao Impacto, provavelmente por deter em sua composição uma maior porcentagem de matriz de poliftalamida (cerca de 65% contra 55% do PF30, segundo o próprio fabricante), compensando inclusive o fato do P35 apresentar maior teor de fibra, mais rígida.

Tabela 24 – Valores de energia para ensaio de impacto Charpy e dimensões dos materiais ensaiados

	Espessura (mm)	Largura ¹ (mm)	Área (mm ²)	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto - RI ² (kJ/m ²)
P35 virgem	4,18	8,07	33,73	0,309	9,16
	4,17	8,40	35,03	0,335	9,56
	4,19	8,59	35,99	0,356	9,89
Médias				0,333	9,54
P35 envelhecido	4,19	8,46	35,45	0,339	9,56
	4,19	8,42	35,28	0,333	9,44
	4,19	8,36	8,36	0,327	9,34
Médias				0,333	9,45
PF30 virgem	4,19	8,00	33,52	0,223	6,65
	4,19	7,78	32,60	0,220	6,75
	4,18	7,90	32,92	0,221	6,73
Médias				0,221	6,71
PF30 envelhecido	4,18	8,46	35,36	0,247	6,98
	4,18	8,54	35,70	0,257	7,20
	4,17	8,55	35,65	0,238	6,68
Médias				0,247	6,95

¹ Largura = Largura total – Profundidade do entalhe

² Cálculo conforme Equação 3

5.12 Ensaio de tração dos compósitos propostos

A Tabela 25 apresenta os valores de espessura, largura e área dos corpos de prova de compósitos virgens e envelhecidos submetidos aos ensaios de tração bem como os resultados dos ensaios.

Tabela 25 – Especificações dos corpos de prova e resultados dos ensaios de tração dos compósitos virgens e envelhecidos.

	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	σ_{res} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	ϵ [%]	E (GPa)	Desvio Padrão
P35 virgem	4,15	10,33	42,86	164,85	97,38	2,45	13,82	
	4,13	10,27	42,41	179,73	95,23	2,31	12,37	
	4,13	10,11	41,75	177,00	103,69	2,17	10,11	
Médias	4,14	10,24	42,34	173,86	98,77	2,31	12,10	1,87
P35 envelhecido	4,15	10,30	42,75	173,86	97,06	2,27	11,73	
	4,15	10,14	42,08	168,70	91,57	2,21	11,80	
	4,13	10,23	42,25	170,03	96,84	2,48	11,74	
Médias	4,14	10,22	42,36	170,86	95,16	2,32	11,76	0,04
PF30 virgem	4,15	10,27	42,62	161,95	89,77	2,81	13,55	
	4,14	10,16	42,06	148,87	94,00	2,61	12,10	
	4,14	10,28	42,56	157,72	85,51	2,67	11,14	
Médias	4,14	10,24	42,41	156,18	89,76	2,69	12,26	1,21
PF30 envelhecido	4,13	10,22	42,21	164,47	94,63	2,72	12,63	
	4,12	10,22	42,11	174,07	98,48	2,59	12,25	
	4,12	10,21	42,07	162,37	92,50	2,54	12,23	
Médias	4,12	10,22	42,13	166,97	95,20	2,62	12,37	0,22

No qual σ_{res} é a tensão de resistência, σ_{rup} é a tensão de ruptura e ϵ é o alongamento.

Observa-se pela Tabela 25 que não houve interferência do envelhecimento em óleo nos resultados do ensaio de tração. Estes, em especial o módulo de elasticidade e o alongamento na ruptura, sugerem que não houve perda sensível nas propriedades mecânicas de ambos os materiais para o tempo, temperatura e substância química envolvidos no envelhecimento. Entre os dois materiais, os maiores valores de tensão de resistência e de ruptura foram encontrados no material P35, que possui quantidades maiores de fibra de vidro como reforço. Os maiores valores de alongamento na ruptura foram apresentados para o material com PTFE, mostrando sua interferência na ductilidade do material. Esses resultados corroboram os resultados de resistência ao impacto (item 5.1, Tabela 24).

5.13 Ensaio tribológicos

A Figura 49 apresenta os resultados do ensaio tribológico de pino sobre disco. De acordo com a figura, o melhor resultado para par tribológico foi o par 100Cr6 – PF30 (PD2 - 0,14 mm³), e o pior resultado ficou com o par 100Cr6 – Alumínio (PD3 – 11 mm³). Neste último caso o ensaio foi realizado em condições diferentes dos demais, uma vez que a carga foi de apenas 18 g (contra 2014 g dos demais) e com duração de menos de 1 minuto devido ao excessivo desgaste.

O par tribológico PF30 – PF30 (PD 9 – 0,59 mm³) – tribologia em mesmo par material, apresenta bons resultados sendo que o PF30 – P35 (PD 8 – 1,27 mm³) – tribologia em materiais diferentes, porém ambos os compósitos, segue na linha de bom desempenho frente ao desgaste.

Contrariando um comportamento esperado, o aço desgastou menos os materiais compósitos (PD 1 e PD 2) do que os próprios compósitos (PD 5, PD 6 e PD 8). O material polimérico puro (testado em PD 4 e PD7) apresentou, nas condições testadas, propriedades de desgaste bem inferiores aos materiais de compósitos, provavelmente devido a ausência da fibra de vidro como elemento de reforço.

O grande desgaste visto no ensaio entre materiais metálicos 100Cr6 e alumínio (PD 3) já era esperado devido a grande interação superficial que apresentam estes tipos de materiais (elétrons livres). Na prática, para evitar este fenômeno utiliza-se elementos minimizadores ou eliminadores desta interação como lubrificantes e graxas.

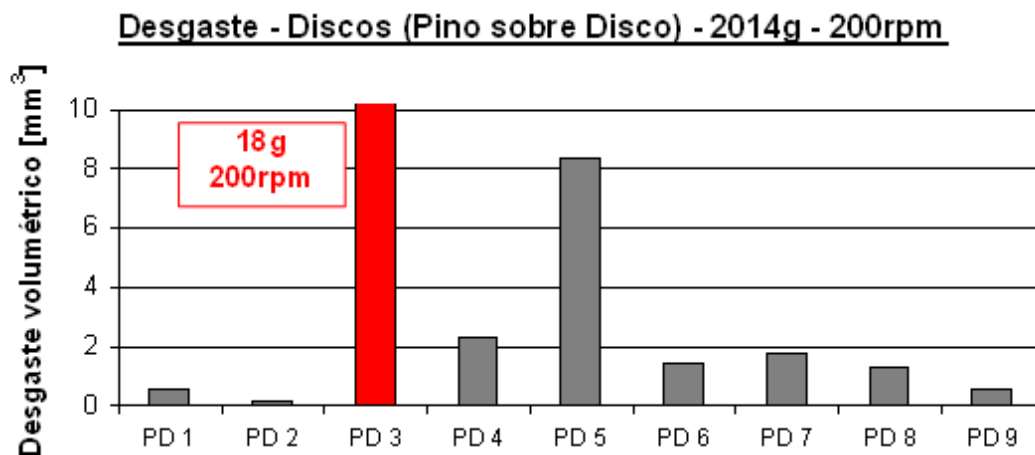


Figura 49 – Desgaste nos discos. Ensaio Pino sobre Disco, não lubrificado, no qual os pares pino/disco (PD) são: 1) 100Cr6-P35; 2) 100Cr6-PF30; 3) 100Cr6-Alumínio; 4) P35-PPA; 5) P35-P35; 6) P35-PF30; 7) PF30-PPA; 8) PF30-P35 e 9) PF30-PF30

O par pino/disco 8 (PF30 / P35) é o que simula a peça desejada e suas condições de trabalho, apresentando um dos melhores resultados entre os pares testados conforme a Figura 49, pois apresentou baixo valor de desgaste volumétrico.

A Figura 50 em seus itens a,b,c,d,e,f,e g demonstram os aspectos visuais finais das pistas após os ensaios. As Figuras 51 a,b,c,d,e e f apresentam os aspectos de perfilometria tridimensional da secção de algumas amostras. Nas condições em que um dos elementos do par tribológico era compósito observou-se apenas um leve “polimento” da superfície, ou seja, o fenômeno desgaste ocorreu apenas com a remoção de cristas da matriz polimérica.

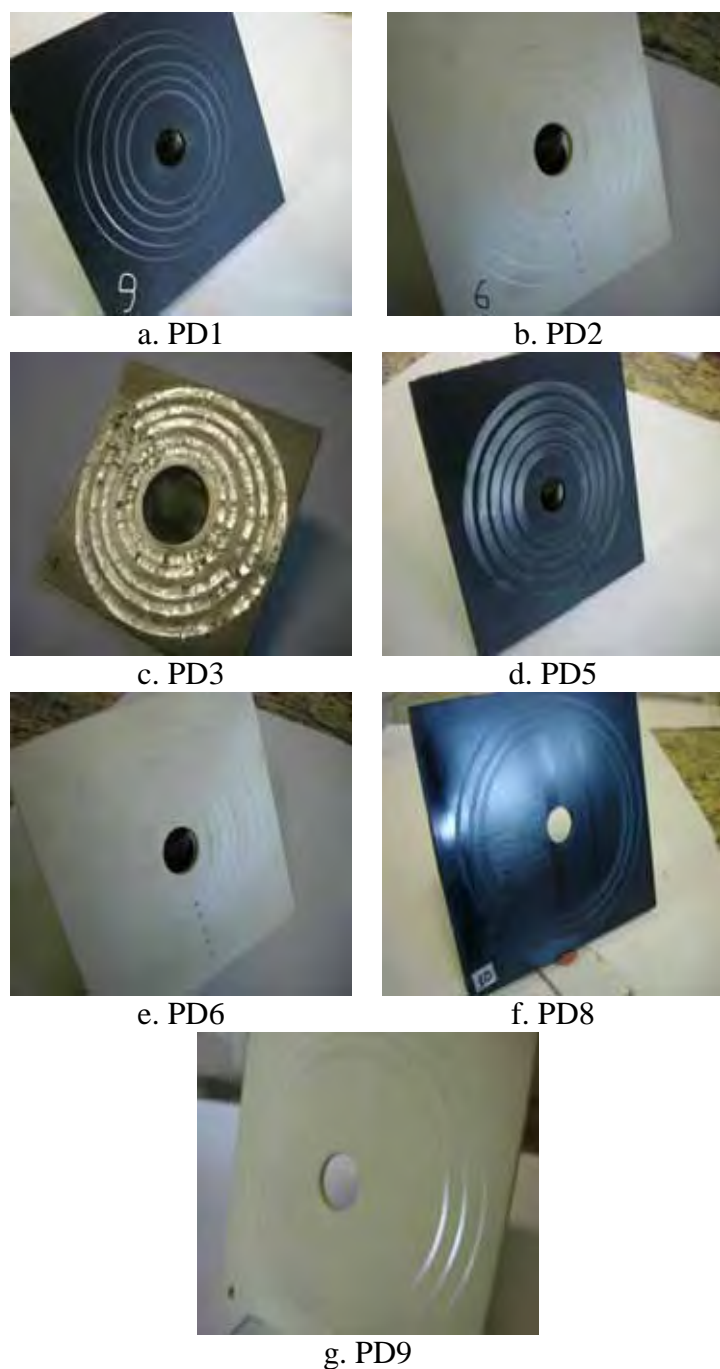


Figura 50 – Aspectos visuais dos discos. Ensaio Pino sobre Disco, não lubrificado, no qual os pares pino/disco (PD) são: a) 100Cr6-P35; b) 100Cr6-PF30; c) 100Cr6-Alumínio; d) P35-P35; e) P35-PF30; f) PF30-P35 e g) PF30-PF30

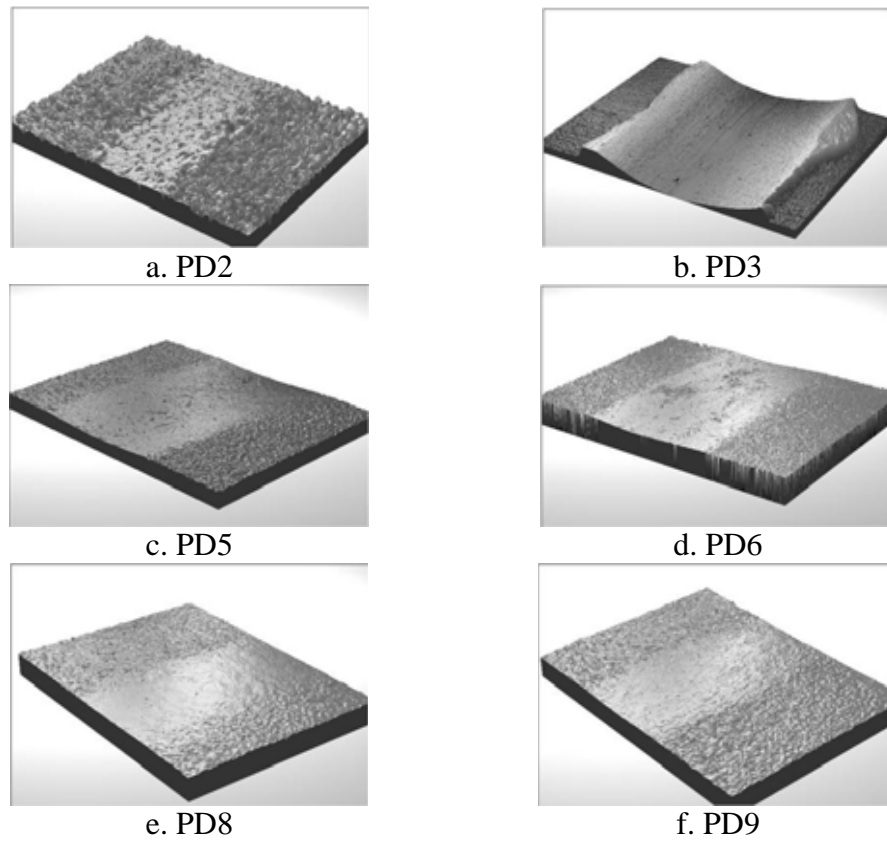


Figura 51 – Aspectos de perfilometria tridimensional. Ensaio *reciprocating* lubrificado. a) 100Cr6-PF30; b) 100Cr6-Alumínio; c) P35-P35; d) P35-PF30; e) PF30-P35 e f) PF30-PF30

A Figura 52 apresenta os resultados do ensaio tribológico *reciprocating*.

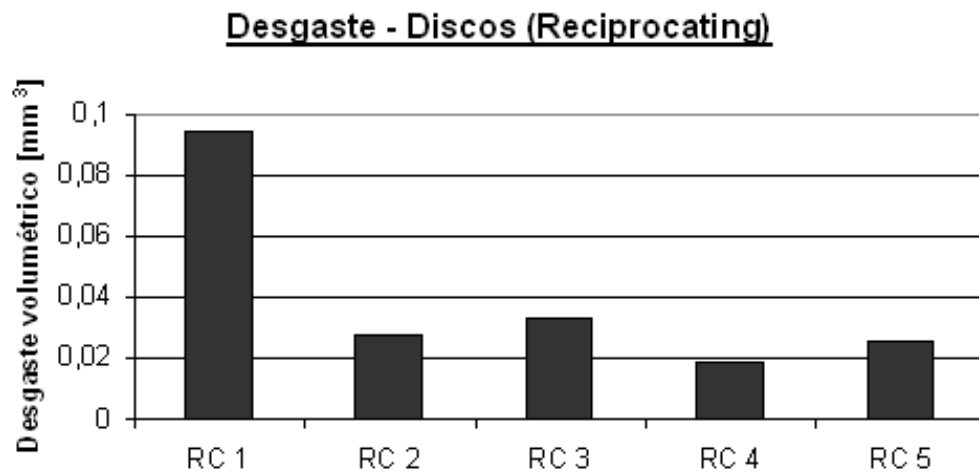


Figura 52 – Desgaste nos discos. Ensaio *reciprocating*, lubrificado, no qual os pares pino/disco (RC) são: 1) aço sinterizado-alumínio; 2) P35-P35; 3) P35-PF30; 4) PF30-P35 e 5) PF30-PF30

O menor desgaste volumétrico foi observado quando usado o par RC4 (PF30 – P35), justamente o par que simula os materiais propostos para a carcaça e gerotores. O ensaio somente utilizando os mesmos materiais compósitos como pares tribológicos P35 – P35 (RC2) e PF30 – PF30 (RC5) também apresentaram bons resultados, principalmente em comparação com o ensaio para o par aço sinterizado/alumínio (RC 1), o par utilizado atualmente na aplicação.

A Figura 53 apresenta os resultados do ensaio tribológico de Esfera sobre Placa. As Figuras 54 e 55 apresentam gráficos dos ensaios sobre o desgaste ocorrido nas placas, em condições sem lubrificação e lubrificada, respectivamente. Tratam-se das mesmas curvas apresentadas na Figura 53, porém a apresentação em separado serve para permitir uma melhor visualização.

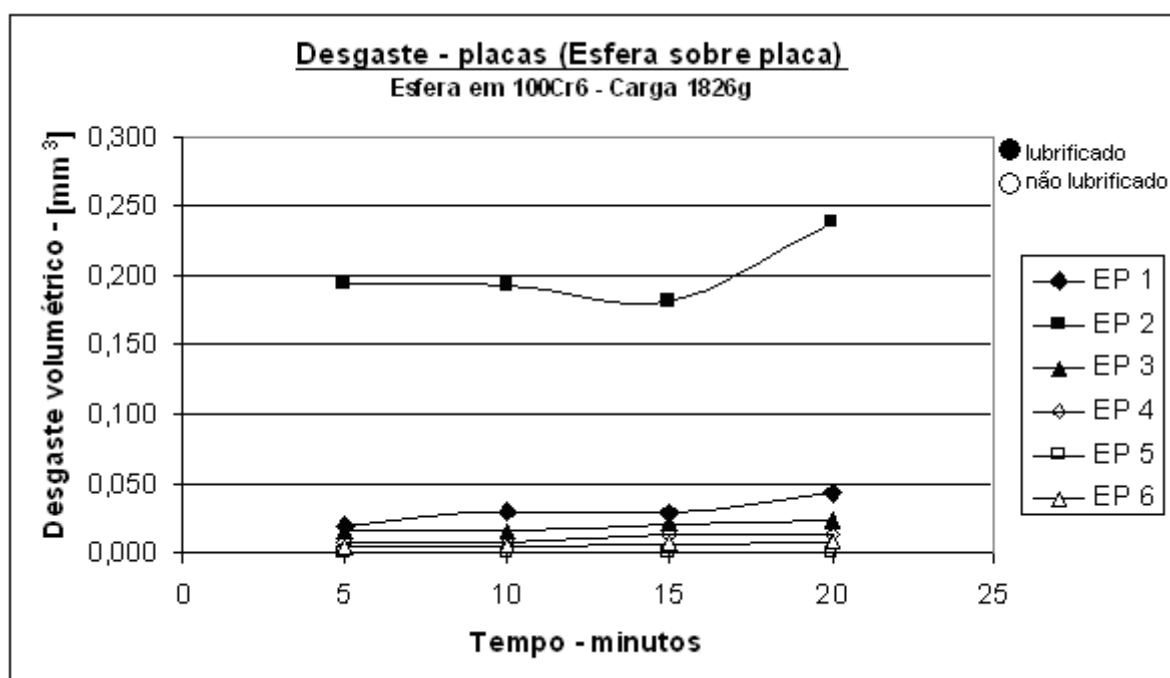


Figura 53 – Desgaste na placa. Ensaio Esfera sobre Placa, lubrificado e não lubrificado, no qual os materiais da placa são: EP1 e EP4:PPA; EP2 e EP5:P35; EP3 e EP6:PF30;

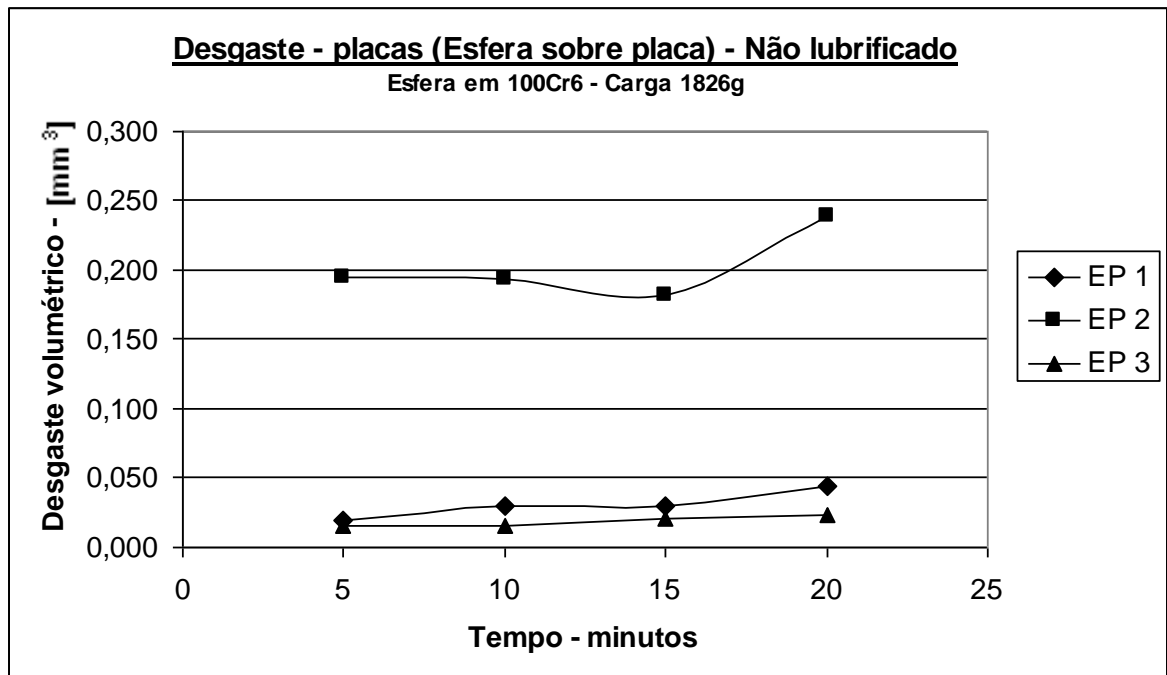


Figura 54 – Desgaste na placa. Ensaio Esfera sobre Placa, não lubrificado, no qual os materiais da placa são: EP1:PPA; EP2:P35; EP3:PF30.

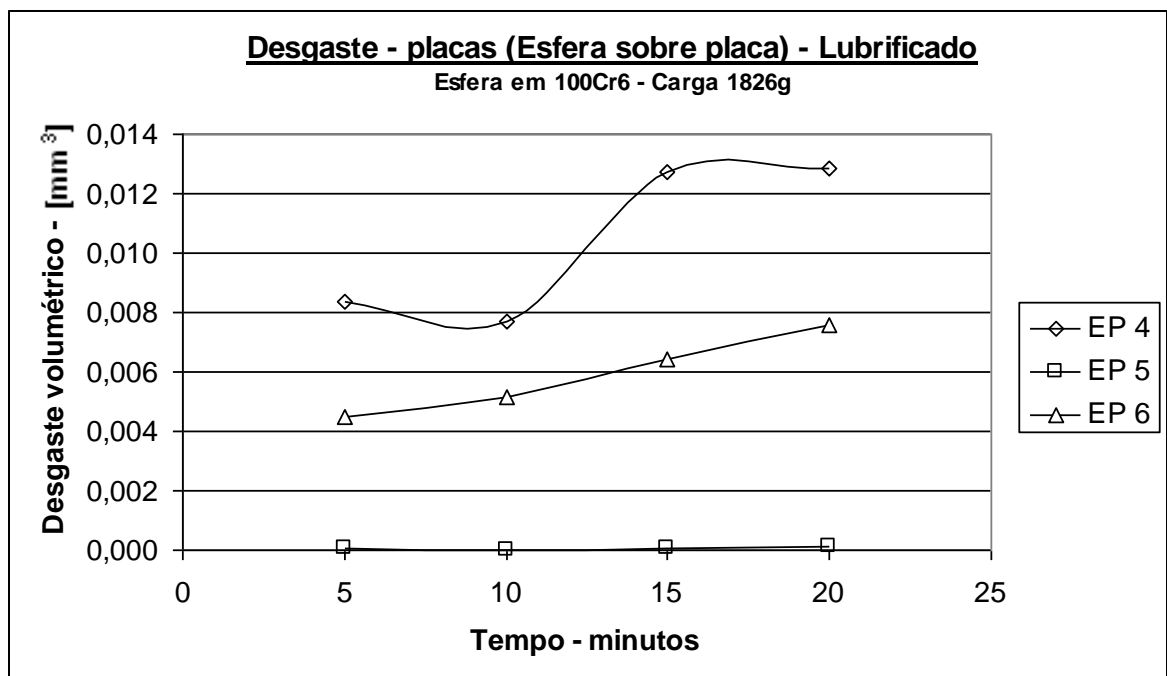


Figura 55 – Desgaste na placa. Ensaio Esfera sobre Placa, lubrificado, no qual os materiais da placa são: EP4:PPA; EP5:P35; EP6:PF30.

Observa-se pela Figura 54 que, em linhas gerais, os materiais ensaiados em condições sem lubrificação apresentaram maiores valores no desgaste volumétrico comparados aos ensaios com lubrificação. Isso é bastante nítido quando a placa foi produzida com o compósito somente com fibra de vidro. Já o polímero puro e o compósito com fibra de vidro e PTFE apresentaram propriedades de desgaste semelhante ao obtido pelas amostras em condições lubrificadas.

Observa-se pelas Figuras 53, 54 e 55 que o melhor desempenho ficou com a placa P35 lubrificada e o pior desempenho observa-se na P35 não lubrificada. Em ensaios não lubrificadas a PPA pura leva ligeira vantagem frente a PF30, posição que se inverte no ensaio lubrificado. As variações nas tendências dos ensaios EP1 e EP4 se devem às mudanças nos mecanismos de desgaste ora adesivos ora abrasivos (partículas da esfera que atuavam como abrasivos no ensaio)

Em todos os ensaios tribológicos, o que se observa é a boa vantagem dos compósitos sob os materiais metálicos, em virtude principalmente da estrutura dos materiais. Materiais metálicos apresentam superfícies que têm alta reatividade com o oxigênio e vapor d'água do ar. Ainda possuem elevada energia superficial (Tabela 19), de tal modo que filmes contaminantes tendem a ser fortemente absorvidos por elas.

Se forem considerados dois destes materiais em contato, haverá forte interação entre as superfícies dos mesmos (STOETERAU,2004). Os materiais compósitos utilizados, com suas ligações covalentes, possuem superfícies menos reativas, o que tende a reduzir a adesividade entre superfícies. Ou seja, materiais compósitos com base polimérica sofrem menos interação em sua superfície do que materiais metálicos.

A presença de PTFE na estrutura conjunta com a matriz PPA reduz ainda mais esta interação, propiciando a este tipo de compósito, melhor vantagem frente a certas condições de trabalho tribológico. A limitação do uso destes materiais compósitos se dará

pelas características de pressão e velocidade atuantes na aplicação, uma vez que comparando-se as propriedades de dureza e resistência mecânica dos aços frente aos compósitos, os valores para este último será inferior (SILVA & SINATORA, 2007).

Para a aplicação estudada nesta Dissertação, as condições de teste que mais se aproximam são os ensaios pino sobre disco e reciprocating, resultados estes que corroboram com a viabilidade de substituição (pares PD8 e RC4, respectivamente, que apresentaram bons resultados frente a pares metálicos).

Os resultados sugerem que utilizar materiais diferentes para os componentes tribológicos gerotores e carcaça é possível tecnicamente. Torna-se então uma questão prática envolvendo custos de aquisição de matéria-prima e produção, pois, se escolhidas do ponto de vista de desgaste, ambas as situações terão desempenho próximos (conforme ensaio pino sobre disco e *reciprocating*). Há ainda muitas vantagens frente ao par tribológico metálico utilizado atualmente, como por exemplo, redução das etapas de produção, menor peso do produto final, e logística reversa (reutilização e reciclagem).

5.14 Análise térmica dinâmico-mecânica – DMA

Nas Figuras 56 e 57 são apresentadas as curvas das análises térmicas dinâmico-mecânicas (DMA) realizadas respectivamente na P35 e PF30. Na Tabela 26 são apresentados os valores de módulo de armazenamento a 150°C na pior condição de trabalho da aplicação (100 Hz) e os valores de temperatura de transição vítrea – T_g retiradas com base na curva de $\tan\delta$.

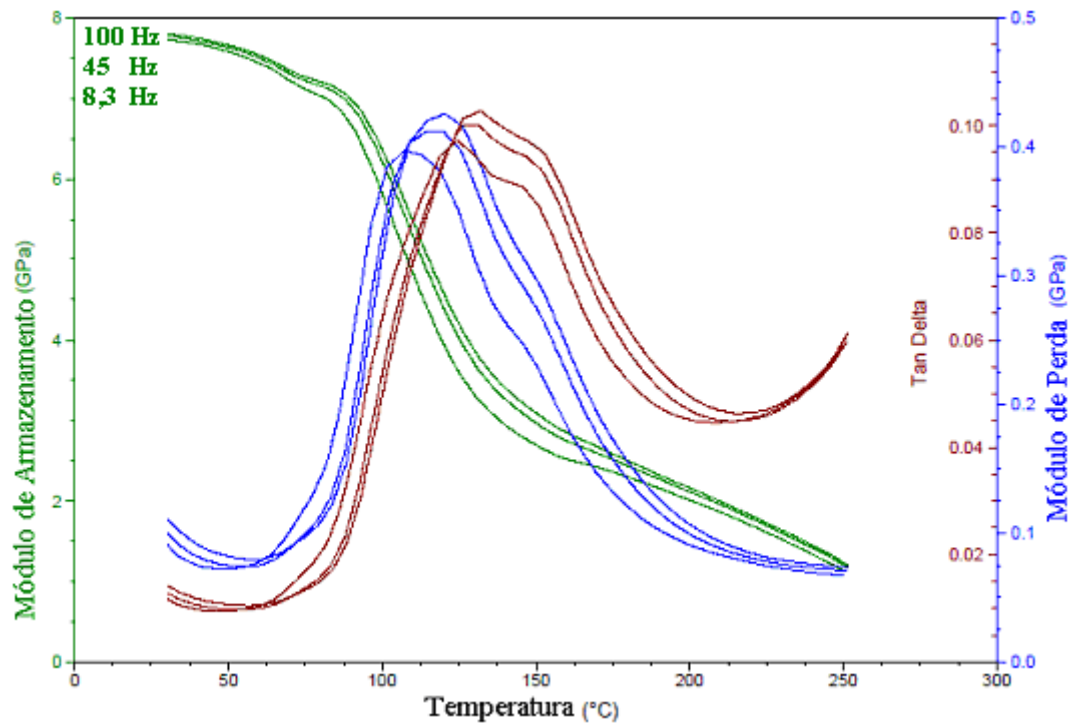


Figura 56 – Curva de DMA para P35 em três frequências

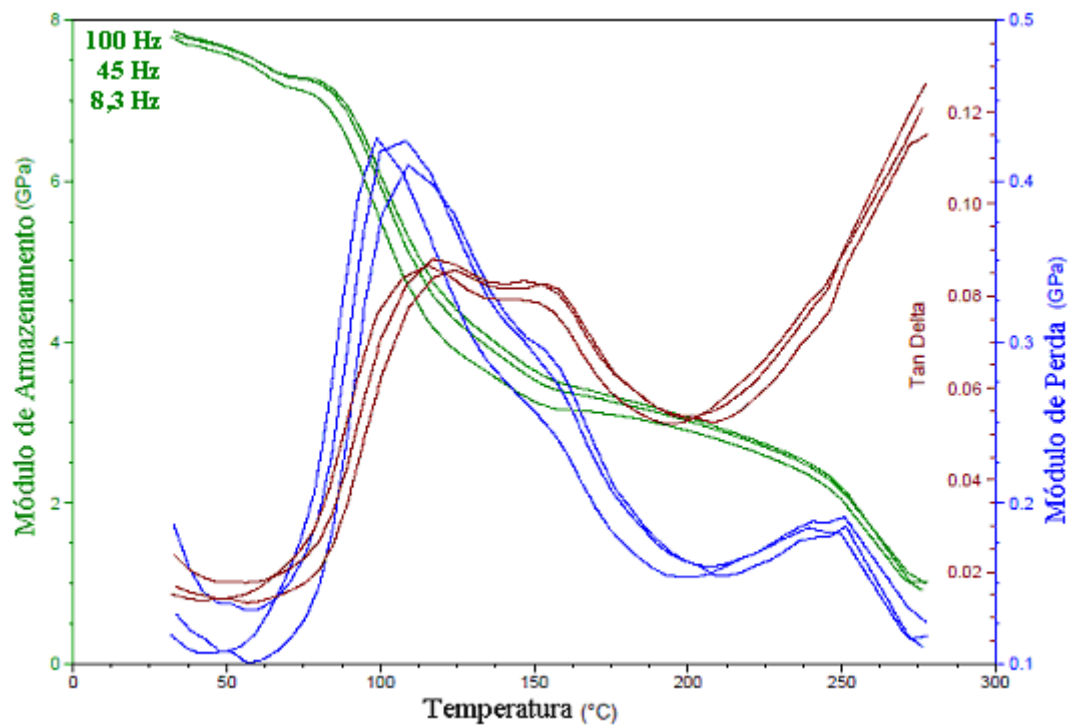


Figura 57 – Curva de DMA para PF30 em três frequências

Tabela 26 – Valores de módulo de armazenamento a 150°C e 100 Hz e de Tg

Material	Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento a 150°C (GPa)	Tg (°C)
P35	8,3	2,7	121
	45	2,9	135
	100	3,2	139
PF30	8,3	3,2	105
	45	3,5	117
	100	3,7	109

A ampliação dos módulos de armazenamento com o aumento da frequência em determinada temperatura (condição isotérmica), se deve ao fato das cadeias poliméricas absorverem energia em faixas de frequências características e esta absorção só ocorre quando a frequência (tempo) é igual ao tempo de relaxação. Este tempo de relaxação tende a diminuir com a redução da temperatura e indica a mobilidade das cadeias, que por sua vez está atrelada à sua estrutura molecular e a temperatura. A relaxação associa-se em geral a mudanças conformacionais e o efeito desta condição, relacionando temperatura e frequência, indica que em frequências altas, ou seja, altos tempos de relaxação, o comportamento do polímero será vítreo, com módulos de armazenamento mais altos (CASSU & FELISBERTI, 2005).

5.15 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Na Figura 58 é apresentada a fotomicrografia em MEV da região afetada no ensaio esfera sobre placa do material compósito com fibra de vidro e PTFE (PF30). A observação da Figura 58 sugere que o ensaio de esfera sobre placa somente retirou material

referente à matriz polimérica de poliftalamida, deixando a região central da amostra (no qual a esfera ficou deslizando) muito concentrada de fibras.

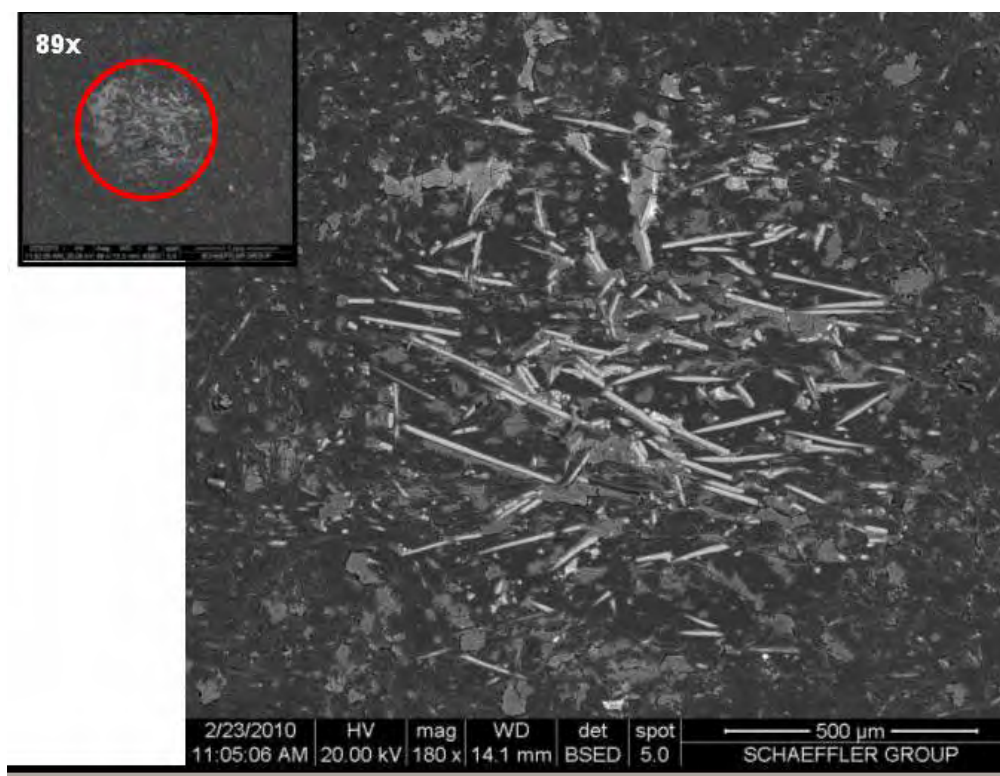


Figura 58 – Fotomicrografia (MEV) do ensaio esfera sobre placa, 100Cr6 – PF30

A adesão entre fibra de reforço e matriz pode ser observada na Figura 59 e 60, na qual observa-se regiões de pull-out e fibras lisas indicando baixa adesão entre sistema fibra matriz (MONTEIRO & ALMEIDA, 2006; SOARES, COUTINHO & SYDESTRINCKER, 2005; REZENDE, 2007), obtidas nas faces fraturadas após ensaios de impacto e tração, respectivamente. As Figuras 61 e 62 apresentam o espectro de raio-x obtido por EDS das regiões A e B da Figura 59, ou seja, da região da fibra e da matriz do compósito PF30 após ensaios de impacto.

Observa-se pela Figura 60 que as fibras estão dispersas pela matriz, não havendo regiões concentradas de uma ou de outra. Observa-se ainda que a fratura cria buracos na face fraturada, uma vez que a fibra que preenchia este orifício foi arrancada durante o ensaio de impacto, ficando provavelmente na outra face.

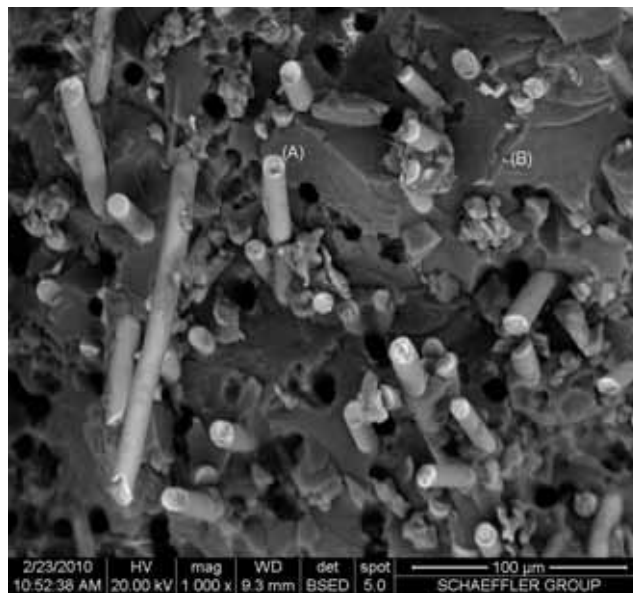


Figura 59 – Fotomicrografia (MEV) com ampliação de 1.000 vezes do aspecto de fratura do ensaio de impacto de corpo de prova feito com o compósito **PF30**

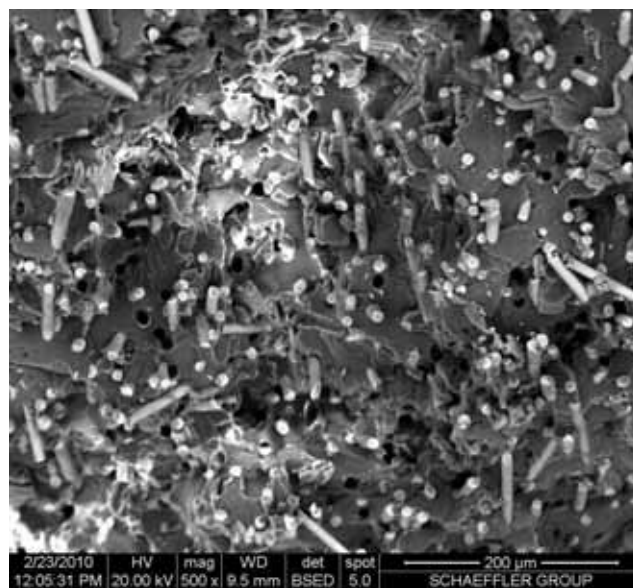


Figura 60 – Fotomicrografia (MEV) com ampliação de 1.000 vezes do aspecto de fratura do ensaio de tração de corpo de prova feito com o compósito **PF30**

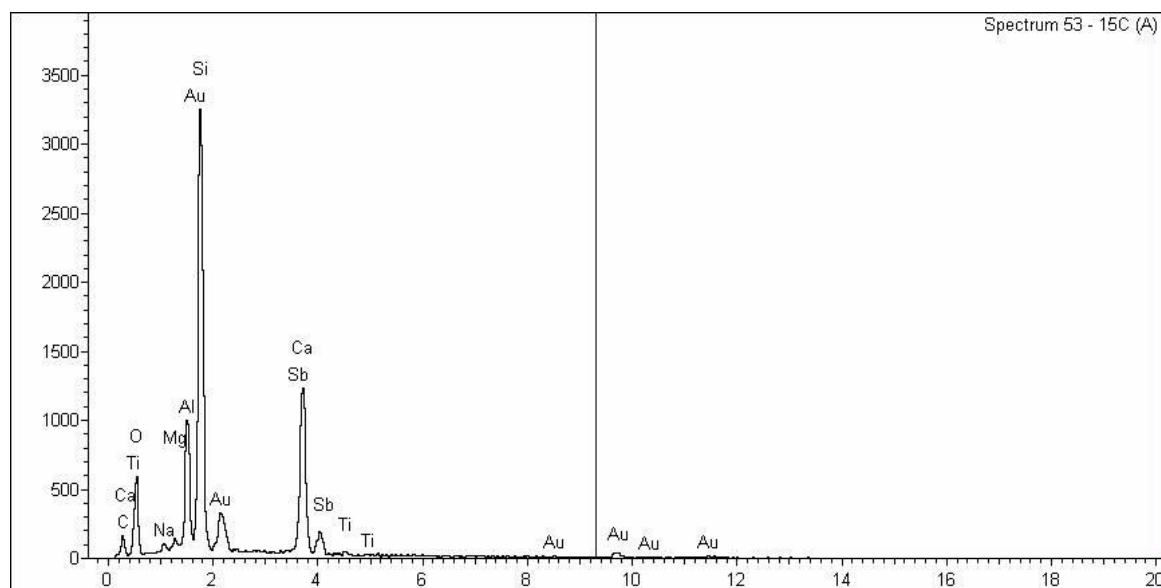


Figura 61 – Espectro EDS do ensaio de impacto, PF30, região A (fibra de reforço) da Figura 59, região (A)

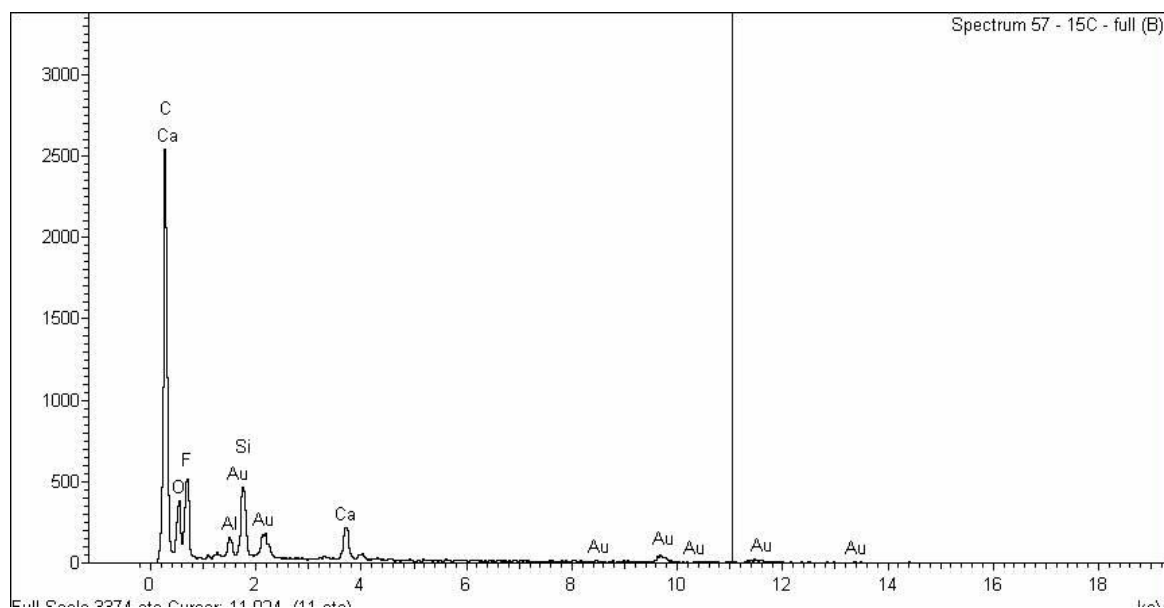


Figura 62 – Espectro EDS do ensaio de impacto, PF30, região B (matriz) da Figura 59 região (B)

Relativamente aos resultados de espectroscopia por energia dispersiva, observa-se pelas Figuras 61 e 62 a distinção entre os materiais da fibra (composta majoritariamente por óxidos de silício, titânio e magnésio (KINGERY,1976) e da matriz. Na

Figura 62 o aparecimento de silício e cálcio (este último numa faixa de energia semelhante a do carbono) deve ser fruto de que a análise não consegue ser efetivamente pontual, captando os raios-x advindos de uma região em que ocorre também a presença de fibra de vidro. Nota-se ainda pela Figura 62 a presença de pico de flúor, o que corrobora o ensaio de infravermelho que identificou o PTFE na amostra.

5.16 Análise de elementos finitos para modelo proposto – FEA

Nas Figuras 63 e 64 são apresentados os resultados da análise de elementos finitos - FEA executada na carcaça, sendo respectivamente análise de tensão Von Mises e deslocamento.

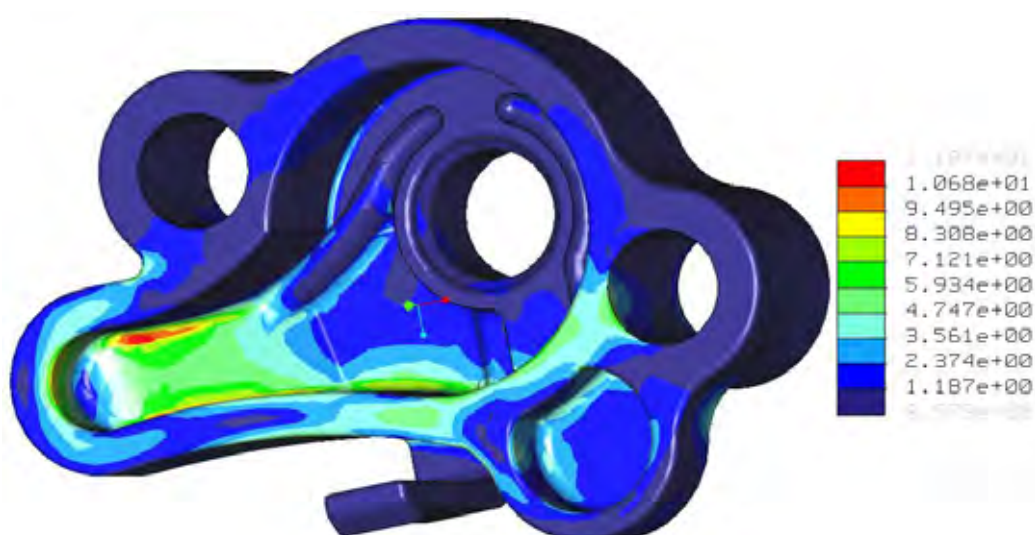


Figura 63 – Análise FEA da carcaça: Tensão de Von Mises (MPa).

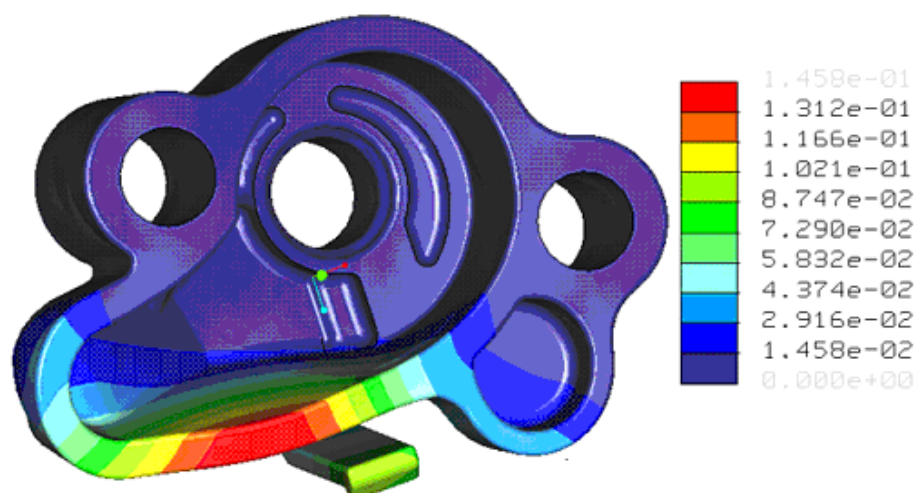


Figura 64 – Análise FEA da carcaça: deslocamento com deformação ampliada em 10% para visualização das áreas afetadas (mm)

Observa-se pelas Figuras 63 e 64 que a maior tensão de Von Mises encontrada é de cerca de 11 MPa e o maior deslocamento é de 0,14 mm (eixo azul). Para auxiliar a discussão dos resultados, na Figura 66 são apresentadas várias curvas tensão versus deformação, em diferentes temperaturas, do compósito P35, determinadas pelo fabricante dos compósitos, a Du Pont.

Conforme nota-se pela Figura 65 os níveis de tensão são baixos para uma temperatura de 150°C, ocorrendo ruptura somente com tensões acima de 60 MPa. Se consideramos que a maior temperatura de trabalho mensurada em testes experimentais ficou abaixo de 100°C (item 5.2) o valor da tensão máxima sobe a níveis no mínimo superiores a 70 MPa. Isto confere ao projeto proposto um fator de segurança de quase 7 vezes, considerando que a maior tensão avaliada na análise de FEA foi de 11 MPa (Figura 63).

Este superdimensionamento no *design* da carcaça se deve ao processo produtivo baseado num projeto no qual foi determinada a menor espessura de parede da peça de 3 mm, de modo a conferir homogeneidade nestas espessuras.

O máximo deslocamento encontrado, na região inferior da carcaça não afeta as características de funcionabilidade do projeto. Isto porque este se situa em região no qual não provocará vazamento de óleo, ou seja, os valores de deslocamento não são suficientes para prejudicar a vedação entre a face da tampa e a carcaça.

Este deslocamento seria prejudicial se estivesse em áreas e direções que propiciassem perdas de fluxo durante seu funcionamento, o que em acordo com análise não irá ocorrer, ou seja, o deslocamento é prejudicial quando cria entre a carcaça e a tampa uma folga por no qual o óleo seja capaz de passar, neste caso o deslocamento está em uma direção que ainda permite vedação (contato) entre a carcaça e a tampa.

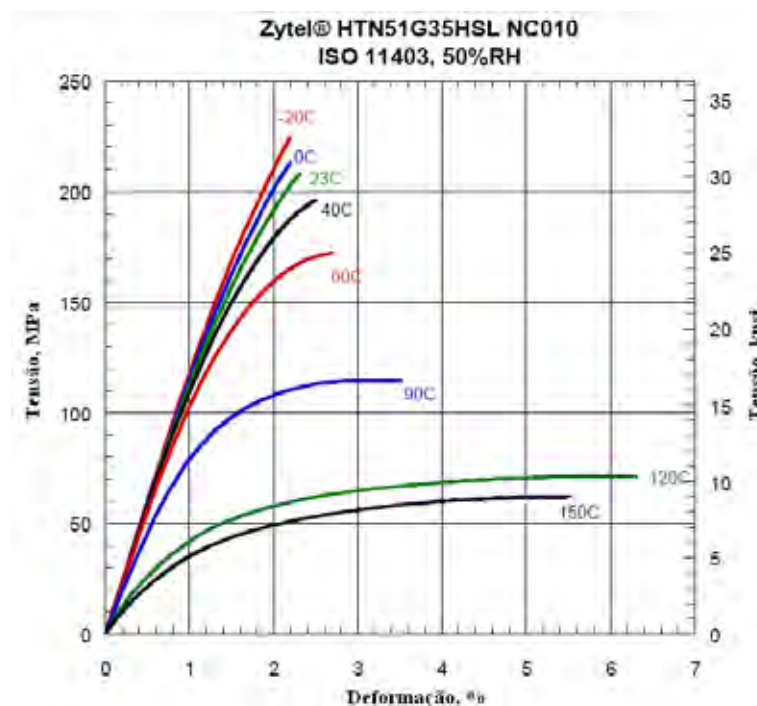


Figura 65 – Curva Tensão deformação fornecida pela Du Pont para P35 (Du Pont, 2003)

Nas Figuras 66 e 67 são apresentados os resultados da análise FEA executada no eixo integrado com rotor interno, sendo respectivamente análise de tensão Von Mises e deslocamento.

A Figura 67 está com ampliação de deformação de 20% para facilitar a visualização do sentido do deslocamento. Na Figura 68 são apresentadas as curvas de tensão-deformação do material PF30 determinadas pelo fabricante do material – Du Pont. O rotor externo e a placa não foram analisados, pois as tensões e deslocamentos são considerados desprezíveis. Isto porque as maiores preocupações são com os elementos motores (eixo e gerotor interno) e com elementos de apoio. Neste último caso enquadra-se a carcaça, que além de servir como suporte é um canal de deslocamento de fluxo.



Figura 66 – Análise FEA do eixo integrado ao rotor interno: Tensão de Von Mises (MPa)

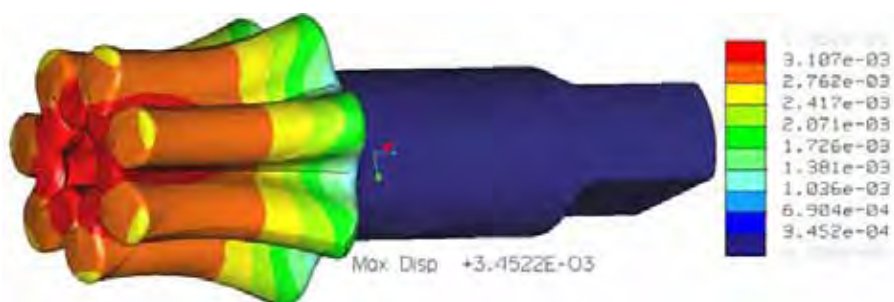


Figura 67 – Análise FEA do eixo integrado com rotor: deslocamento com deformação ampliada em 20% para visualização das áreas afetadas (mm)

Os resultados da FEA apresentados nas Figuras 66 e 67 mostram que a maior tensão de Von Mises encontrada é de 3,4 MPa e o maior deslocamento é de 0,003 mm. Em acordo a curva apresentada na Figura 69 os níveis de tensão são baixos para uma temperatura de 150°C no qual apenas deve ocorrer ruptura com tensões acima de 5 MPa.

Novamente, se consideramos que a maior temperatura de trabalho mensurada em testes experimentais ficou abaixo de 100°C, o valor da tensão máxima sobe a níveis acima de 80 MPa. Isto confere ao projeto proposto um fator de segurança de quase 23 vezes. Assim como no caso da carcaça, o *design* segue o princípio de homogeneidade nas espessuras das paredes, sendo que neste caso a menor parede adotada foi de 2 mm. O deslocamento encontrado é considerado desprezível.

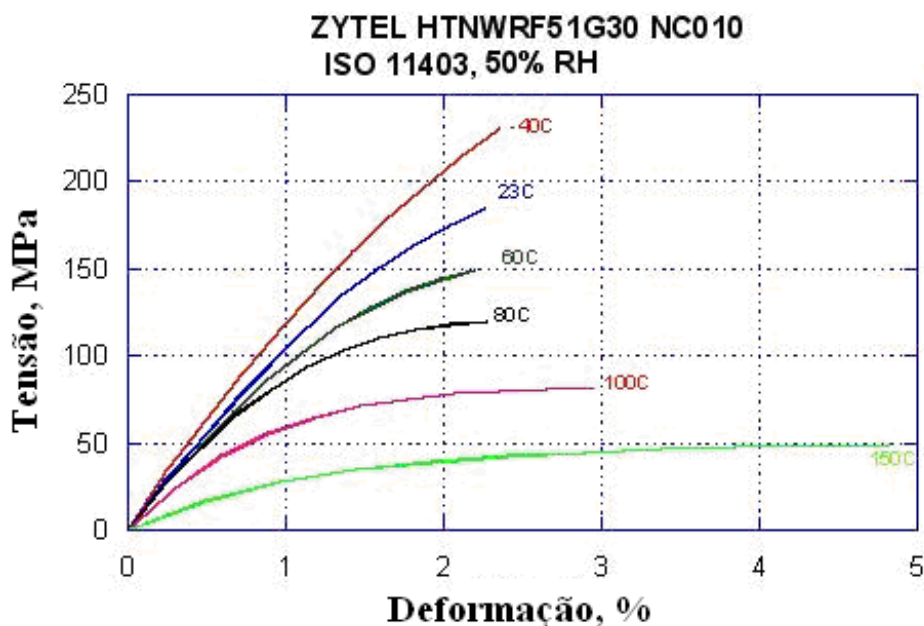


Figura 68 – Curva Tensão deformação fornecida pela Du Pont para PF30 (Du Pont, 2003)

5.17 Validação do *design* proposto

Na Figura 69 é apresentado um detalhe de topo do perfil do produto final. O parafuso atualmente empregado foi substituído por um clique mecânico desenhado no corpo da carcaça (região A). O rotor interno foi integrado ao eixo e os pinos ganharam um rasgo e tiveram seu comprimento alongado para evitar o fenômeno de fluência (creep) na área do aparafusamento.

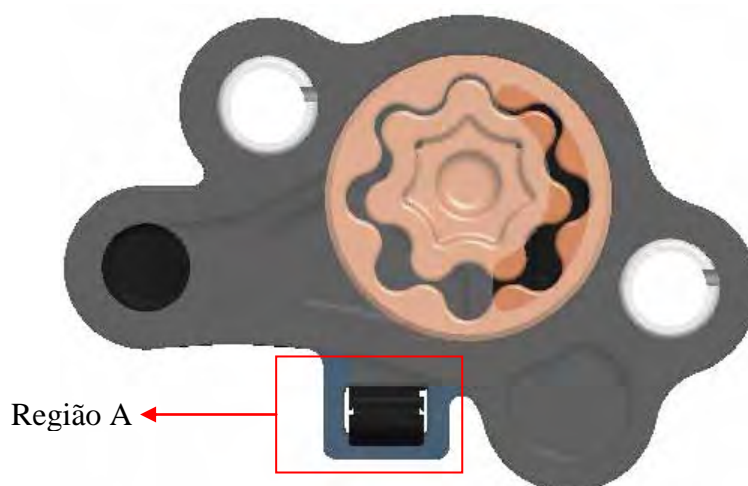
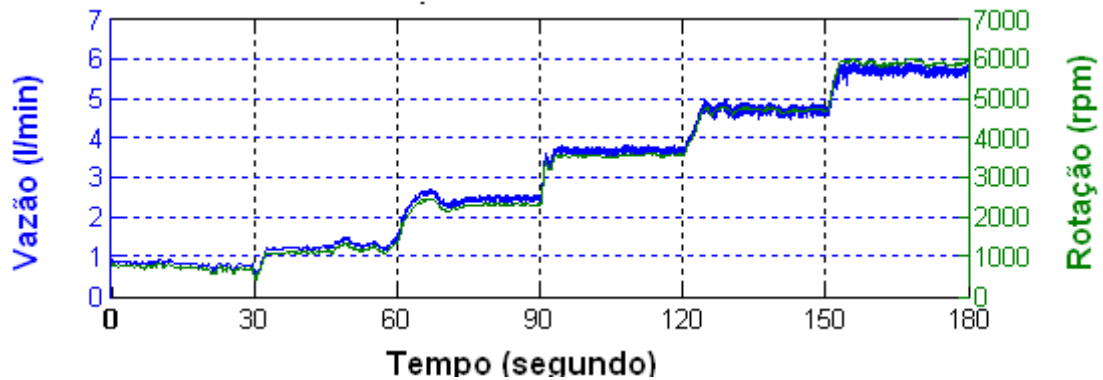


Figura 69 – Vista de topo do conjunto proposto montado

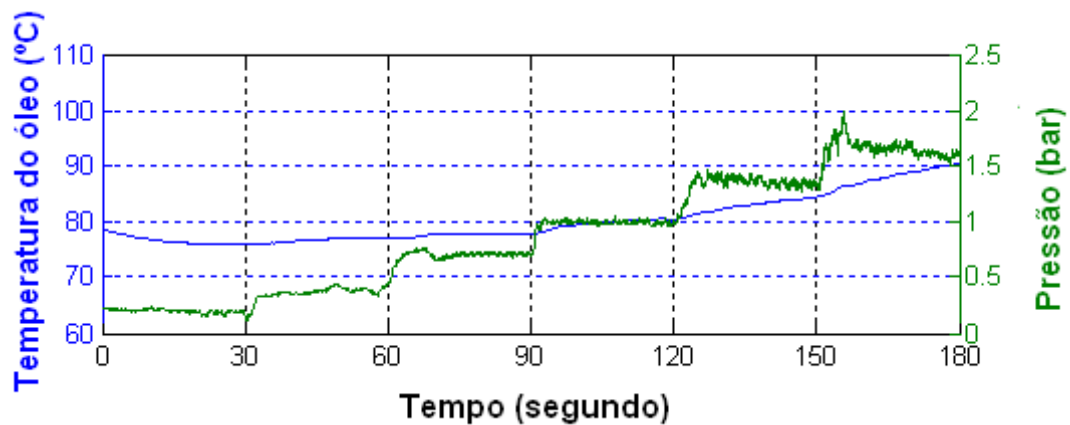
Na Figura 70 é apresentado detalhe dos rotores utilizados para monitoramento de desempenho e na Figura 71 é visualizada o desempenho do perfil proposto para os materiais adotados, porém com as peças fabricadas em aço.



Figura 70 – Rotor externo e rotor interno integrado ao eixo no design proposto, conforme projetado para a eventual peça em compósito, porém fabricadas em aço 100Cr6.



a) Vazão e rotação em função do tempo



b) Temperatura de trabalho e pressão atingida em função do tempo

Figura 71 – Desempenho da bomba de óleo proposta em função da (a) quantidade de óleo bombeada por minuto e velocidade de bombeamento e (b) da temperatura do óleo e pressão atingida

Com os dados do monitoramento é possível identificar que a pressão de trabalho estabilizou-se em torno de 1,5 bar com pico de 2,0 bar, ou seja, não houve alterações significativas nas pressões de trabalho.

Já a temperatura de trabalho ficou em um patamar inferior a 90°C, o que reforça as discussões feitas no item anterior, relativa à análise de elementos finitos. No que tange a resposta na relação rotação-vazão em altas rotações este perfil obteve melhores resultados do que no perfil atual, em especial na zona acima de 5000 rpm.

A vazão atingida foi de 5,8 L/min a 5700 rpm. Em relação às demais áreas de rotação a desempenho foi similar a uma bomba atual nova. O comportamento, inclusive dos valores de pressão de trabalho, temperatura e vazão máxima são bastante parecidos com os da bomba atual nova, apresentado na Figura 34.

Nas Figuras 72 e 73 são apresentados respectivamente o gráfico rotação-vazão e o gráfico de perdas.

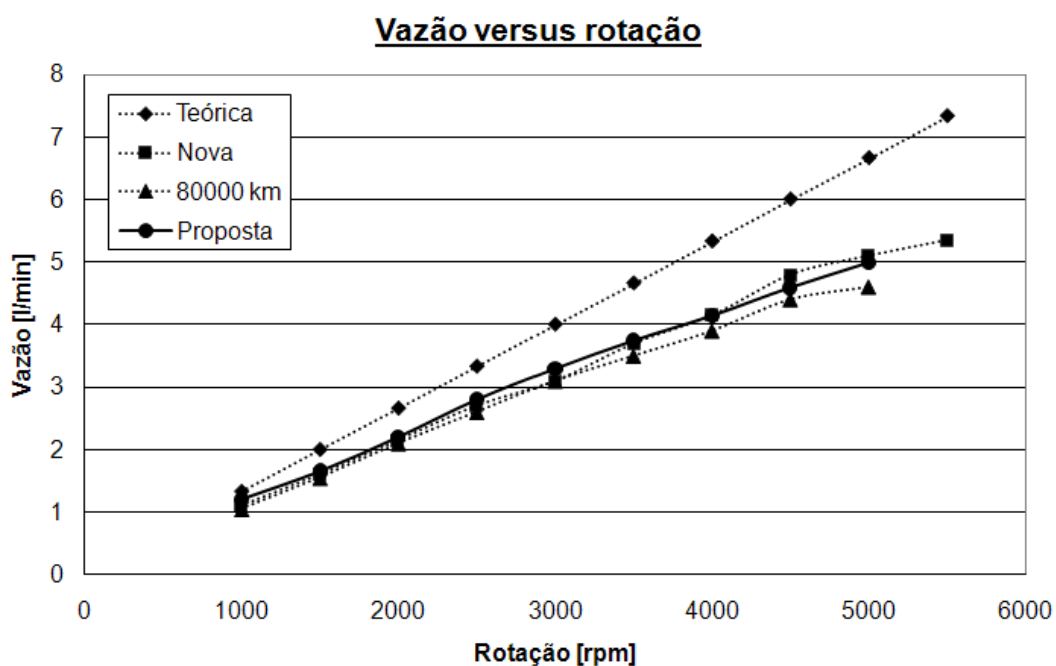


Figura 72 – Curva comparativa de vazão entre uma bomba teórica sem perdas, uma nova, uma com 80000 km de uso e a proposta

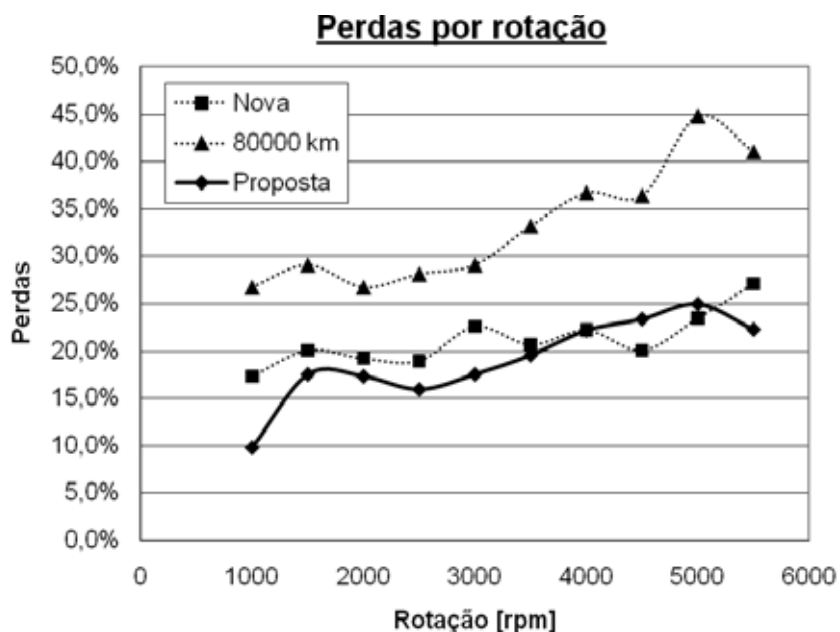


Figura 73 – Curva de perdas por rotação de uma bomba nova, outra com 80000 km de uso e a proposta

Observa-se pela Figura 72 que para rotações mais baixas a bomba proposta tem uma leve ampliação nos níveis de vazão, e em rotações mais altas este comportamento se inverte. Porém, em condições gerais de desempenho o comportamento pode ser considerado o mesmo.

Este pode ser mais bem observado através da Figura 73, pois é monitorado através das perdas em relação a uma bomba teórica, ou seja, em baixas rotações, até 4000 rpm, as perdas são menores na bomba proposta, e a partir deste nível os comportamentos se invertem, e ao atingirem 5000 rpm há outra inversão.

As perdas médias da bomba proposta ficaram em 19,0% contra 21,1% de uma bomba atual nova e 33,1% de uma bomba atual com 80000 km de uso.

6. Conclusões

A utilização do FMEA para o projeto foi extremamente válida, pois através deste ficaram claras as linhas de delimitação da atuação de caracterização de materiais e monitoramento geral, sobretudo quais os pontos críticos a serem atacados reduzindo custo de desenvolvimento e o *lead time* do mesmo.

Os resultados de caracterização e monitoramento do produto atual mostram que é imprescindível a utilização de outras fontes de informações além dos fabricantes de peças originais e dos materiais candidatos à aplicação. Ficou claro que o estudo de campo, no qual as peças são utilizadas no dia a dia é valiosa fonte de informação principalmente no que tange a dimensionamento acima do que as aplicações realmente exigem.

A caracterização dos materiais atuais empregados na bomba de óleo para motocicletas revelou detalhes que permitiram ao longo do processo estabelecer critérios mais abertos de tolerâncias e perfil, levando a otimização de processo e produto.

Os resultados de ensaios mecânicos e demais ensaios comparativos entre compósitos virgens e envelhecidos em óleo comprovam que, para médios intervalos (240h) de envelhecimento, o material se apresenta estável e com interferências mínimas nos valores de suas características mecânicas. Isto foi observado tanto para impacto, com perdas de 0,9% para P35 e aumento de 3,5% para PF30, quanto para tração, com perda de 2,8% no módulo para P35 e aumento no módulo de 0,9% para PF30. Isto se deve a sua estrutura química, no qual as ligações com alta energia e a introdução de um anel benzeno entre as carbonilas reforçam esta estrutura e mantém condições importantes como alta temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão em aplicações que envolvam média temperatura.

Os estudos tribológicos comparativos desta Dissertação demonstraram o bom comportamento do material em relação aos materiais metálicos empregados atualmente: alumínio e aço sinterizado. Este bom comportamento em relação ao desgaste do tipo adesivo abre uma gama de novas aplicações. Cada uma estudada especificamente (condições de pressão e velocidade), como nesta Dissertação, pode se tornar viável devido ao desempenho aceitável e a uma série de reduções de etapas no processo produtivo. Estas podem reduzir a extração de recursos naturais (como água, energia, minérios, etc.) bem como diminuir custo e peso. Este comportamento pode ser melhorado com a introdução de aditivos anti-desgaste

como o PTFE ou ainda numa melhor avaliação de novos pares tribológicos como alumínio – poliftalamida.

Os resultados indicaram que é possível a fabricação de uma bomba de óleo em material compósito. Os estudos demonstraram viabilidade da aplicação de um compósito de poliftalamida com 35% de fibra de vidro na carcaça e outro de 30% de fibra de vidro com PTFE (cerca de 15%) para a fabricação do gerotor externos e eixo integrado (gerotor interno e eixo).

7. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, identificadas ao longo da realização deste projeto, pode listar-se:

- 1 – Realizar o ensaio de envelhecimento com tempo mais amplo entre 2400h (10x) e 3600h (15x) e comparar os resultados;
- 2 – Com as amostras envelhecidas neste tempo mais amplo monitorar a degradação;
- 3 – Realizar os ensaios de impacto e tração com maior número de amostras;
- 4 – Realizar o ensaio de análise termo dinâmico-mecânica – DMA, comparando os resultados entre amostras virgem e envelhecidas com tempo mais amplo, monitorando a evolução de desempenho do material conforme tempo de envelhecimento sob variação de temperatura e frequência;
- 5 – Realizar os ensaios tribológicos comparando os resultados entre amostras virgens e envelhecidas com tempo mais amplo;
- 6 – Avaliar com os mesmos critérios mecânicos de validação de design, o material com as novas informações dos ensaios após envelhecimento em tempo mais amplo;
- 7 – Avaliar novos perfis de design com base em materiais compósitos, visando melhor vedação de câmaras e comparar os resultados;
- 8 – Produzir os componentes nos materiais estudados e verificar sua aplicação.

8. DIVULGAÇÕES

Durante a execução deste projeto ocorreram as seguintes publicações:

I) Trabalhos completos em anais de eventos:

1) 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. Anais em CD. Apresentado oralmente pelo aluno.

2) 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. Anais em CD. Apresentado oralmente pelo co-autor.

3) SANTOS NETO, A.O.; MANCINI, S. D. Caracterização tribológica da poliftalamida para substituição de alumínio em aplicações automotivas, navais e linha branca. In: Congresso Internacional Plastshow. São Paulo-SP, 2010. Anais em CD. Apresentado oralmente pelo aluno.

4) SANTOS NETO, A.O.; MANCINI, S. D. Substituição de materiais metálicos por grades de poliamida 6.6 em motores a combustão interna - peças estruturais. In: Congresso Internacional Plastshow. São Paulo-SP, 2010. Anais em CD. Apresentado oralmente pelo aluno.

II) Texto em Jornais:

- 1) SANTOS NETO, A. O., MANCINI, S. D.. Mudar para melhorar. Jornal Cruzeiro do Sul. Sorocaba-SP, 07/out 2008, Caderno A, p.2 - 2.

III) Artigo Completo em Periódico (em avaliação):

- 1) SANTOS NETO, A.O.; MANCINI, S. D. & SIRBONE, F.R.C Production of an axial piston: impacts resulting from the substitution of steel for a polymer-based material. Journal of cleaner Production, 2010.

9. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE MOTOCICLETAS, CICLOMOTORES, MOTONETAS, BICICLETAS E SIMILARES, **Estatísticas**, acessado em 07/01/2010 disponível em www.abraccio.com.br

AGUIAR, D.C; SALOMON, V.A.P.; **Avaliação da prevenção de falhas em processos utilizando métodos de tomada de decisão**. Produção, v. 17, n.3, p. 502-519, 2007.

AIAG - INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA; **Potential Failure Mode and Effects Analysis – FMEA**, Reference Manual; 3º Ed., 2001, QS-9000

AKCELRUD, L. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**, Barueri: Manole, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness / ASTM D 2240**. Estados Unidos, 2005, 13 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry / ASTM D3418**, Estados Unidos, 2008, 7 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear / ASTM G133**. Estados Unidos, 2005, 9 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard terminology relating to wear and erosion / ASTM G40**. Estados Unidos. 2010, 8 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus / ASTM G99**. Estados Unidos. 2005, 5 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard test method for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastics / ASTM D6110**. Estados Unidos, 2006, 15 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement / ASTM D792**, Estados Unidos, 2008, 6 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard Specification for Polyphthalamide (PPA) Injection Molding Materials / ASTM D5336**. Estados Unidos, 2003, 5 p.

AMODEL® polyphthalamide Design guide – version 3.0”, **Solvay Advanced polymers**, São Paulo, 2006.

AMODEL® polyphthalamide Moldin guide – version 1.1”, **Solvay Advanced polymers**, São Paulo, 2003.

ASHBY, M.F. **Materials selection in mechanical design**. Oxford: Pergamon Press, 1992. 311p.

ASHBY, M.F. **The engineering properties of materials**. Acta metallurgica, v.37,n.5, p.1271-1293. 1985.

ASHBY, M.F.;JOHNSON,K. **The art of materials selection**. Materials Today, v.6,n.12, p.24-35,2003

ASHBY, M.F.;JONES,R.H. **Engineering materials. An introduction to their properties and applications**. Pergamon Press, Londres. 1981

ASM Handbook Volume 18: **Friction, lubrication, and wear technology**, 1992, pg. 1684

AUTODATA: **Em 10 anos, frota de motos poluirá mais que a de carros**. Boletim Autodata de 11/09/2008, nr. 1961, São Paulo, Ano 8.

BASSANI, A.; PESSAN, L.A.; HAGE, E. **Propriedades mecânicas de blendas de Nylon-6/Acrilonitrila-EPDM-Estireno (AES) compatibilizadas com copolímero acrílico reativo (MMA-MA)**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 12, nº. 2, pg. 102-108, 2002

BASSHUYSEN, R. V.; SCHAFFER, F. **Internal Combustion Engine – Handbook**. SAE International and Professional Engineering Publishing. 2004.

BISSOTO,I. **Substituição de materiais poliméricos através de seletores de materiais e fornecedores: um estudo de caso**, dissertação, Universidade Federal do Paraná, 2005

CREMONEZI, A. et al. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, São Paulo: Metallum Eventos Técnicos e Científicos, 2009.

CALLISTER JR., W.D. **Ciência e Engenharia de materiais – Uma introdução**. 6a. Edição, John Wiley & Sons, Inc.,2003

CANEVAROLO JR.,S. V. **Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Ed. ArtLiber, 2002

CANEVAROLO, S.V.Jr.; **Técnicas de Caracterização de Polímeros**, São Paulo: Ed. ArtLiber, 2003.

CASSU,S.N.; FELISBERTI,M.I. **Comportamento dinâmico-mecânico em polímeros e blendas poliméricas**. Química Nova, Vol. 28, N.º 2, pg. 255-263, 2005

COATES, J. **Interpretation of infrared spectra, a practical approach**. Encyclopedia of analytical chemistry. John Wiley & Sons, Chichester, 2000.

CONAMA, Resolução 297 **Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos**, 2002.

CONAMA, Resolução 342 **Estabelece novos limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, em observância à Resolução no 297, de 26 de fevereiro de 2002, e dá outras providências**, 2003

CORREA, C.A. et al. **Compósitos termoplásticos com madeira**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.13, nº.3, pg. 154-165, 2003

CZICHOS, H. **Influence os adhesive and abrasive mechanisms on the tribological behaviour of thermoplastic polymers**. Wear, Amsterdam, v.88 ,nº.1, p. 27-43, 1983.

DA SILVA, R.C.L. **Mecanismos de desgaste de poliuretano em ensaios de microabrasão**. 2006. 126f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

DARBELLO, S.M. **A Reciclagem Mecânica do Poli (cloreto de vinila) – PVC – proveniente dos resíduos da Construção Civil**.2008. 144f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais), UNESP, Sorocaba, 2008.

DE PAOLI, M.A. **Degradação e estabilização de polímeros**, 2º Ed. On line, Ed. Chemkeys, 2008

DU PONT: Design Guide – Module II: Zytel® and Minlon® - **Du Pont H-58636**, 2003

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Plastics mouldings: Tolerances and acceptance conditions for linear dimensions / DIN 16901**, Alemanha, 1982.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Testing of petroleum products and related products- Analysis by infrared spectrometry – General working principles / DIN 51451**, Alemanha, 2004.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Determining residual contamination in fresh oil / DIN 51524**. Alemanha, 2006.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Metallic materials: Conversion of hardness values / DIN EN ISO 18265**. Europa, 2004.

EIDENBOCK,T. et al. **Zylinderkopf in vierventiltechnik fur den BMW DI-Dieselmotor**. MTZ, Berlim, 1998.

FEDERAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE - FEEMA, acessado em 18/03/2009 disponível em www.feema.rj.gov.br/proconve-promot.asp

FERNANDES, J.M.R., REBELATO, M.G.; **Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA**. Gestão e Produção, v. 13, n.2, p.245-259, 2006.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. 2º Ed. São Carlos: EDUFScar, 2002.

FERRETO, H.F.R.; LIMA, L.F.C.P.; PARRA, D.F.; LUGÃO, A.B. **Caracterização por ftir e tg/dtg do copolímero politetrafluoroetileno-g-1,3 butadieno**. 17º CBECIMat, Foz do Iguaçu, 2006.

FEYZULLAHOGLU, E. ,SAFFAK, Z. **The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction condicions**. Materials and Design, v.29, 205-211, 2008.

GAMEZ-MONTERO, P.J. Caracterización Fluidodinâmica de uma Bomba Oleohidráulica de Engranajes Internos Generados por Perfiles Trocoidales. 2004. 231f. Tese (Doutor em Engenharia Industrial). Universidade Politécnica da Cataluña, Terramassa, Espanha, 2004.

GAMEZ-MONTERO, P.J.; CODINA MACIÁ, E. Fluid dynamic behaviour of na internal Rotary pump generated by trochoidal profiles. Paper 1° FPNI-PhD Symp. Hamburg 2000, PP. 33-47 of Department of Fluid Mechanics, Campus Terrasa. C/ Colon n 7-11.08228, Barcelona-Espanha.

GEE, M.G. et al. Progress towards standardisation of ball cratering. Wear 255, 2003, pg. 1-13

GLASSCOCK, D. et al. High performance polyamides fulfill demanding requirements for automotive thermal management components. Du Pont, Estados Unidos, 2008

HEMAIS, C.A. Polímeros e a indústria automobilística, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.13, nº 2, p. 107-114, 2003

HEMPY, B.E.; LYONS, J.S. Comparison of measured and empirically predicted creep of reinforced polyphthalamide. 1999. Polymer Testing 18 (439-447)

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

INA – SCHAEFFLER KG, Valvetrains for internal combustion engines, development, manufacture, applications, Munique, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation / ISO 1302. Estados Unidos, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – rules and procedures for the assessment of surface texture / ISO 4288. Estados Unidos, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Determination of tensile properties, Part 1: General principles / ISO 527-1. Estados Unidos, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Determination of tensile properties, Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics / ISO 527-2. Estados Unidos, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Metallic materials: Brinell hardness test. Part 1: Test method / ISO 6506-1. Estados Unidos, 1999.

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, 1999.

IUDICELLO,F.;MITCHELL,D. **CFD modelling of the flow in a gerotor pump**. PTMC 2002, Bath University, Setembro 2002.

KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. **Introduction to ceramics**. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1976.

LECHNER,G.;NAUHERIMER,H. **Automotive transmissions Fundamentals: selection, designer and application**. Ed. Springer, 2º Ed. 1999.

LINSINGEN, I. V. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. Ed. UFSC, Florianópolis, 2001.

LYONS,J.S. **Time and temperature effects on the mechanical properties of glass-filled amide-based thermoplastics**. Polymer Testing 17 (237-245), 1998.

LOPES, W.A.; FASCIO, M. **Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho**. Química Nova, Vol. 27, Nº 4, 670-673, 2004.

MANO, E. B. e MENDES, L. C. **Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher. 2000.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. Rio de Janeiro: Ed. Edgard Blucher. Rio de Janeiro, 1991.

MANO, E.B. **Introdução a polímeros**, São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1985.

Manual de Serviços. CG 150 Titan – Honda, Lubrificação, 2004.

MARK, H.F.;et al. **Encyclopedia of polymer science and engineering**, 2º Ed.,vol.4, John Wiley & Sons, 1986.

MONTEIRO, S.N.; D'ALMEIDA,J.R. **Ensaio de pullout em fibra lignocelulósicas – uma metodologia de análise**. Revista Matéria, vol. 11, nº 3, 2006

NASCIMENTO, M. **Mercado de motos mantém crescimento**. Boletim Autodata de 08/10/2008, nr. 1980, São Paulo. Ano 9.

PICCOLI, R. et al. **Características das principais técnicas analíticas aplicadas a caracterização de materiais**. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.

PINI,N. et al. **Perspectives for Reactive Molding of PPA as Matrix for High-desempenho Composite Materials**. Journal of Thermoplastic Composite Materials, vol.19; 207-216, 2006.

Polímeros do Futuro – Tendências e oportunidades: Palestras Técnicas (II); Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 12, nº 4, 2002

RANGEL, R.C.C. **Aplicação da eletrocapilaridade na manipulação de microgotas**. 2008. 87f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) - UNESP, Sorocaba, 2008.

REICH, L.; STIVALA, S.S.; **Elements of polymer degradation**, Ed. McGraw Hill, 1971.

REINICKE, R., HAUPERT, F., FRIEDRICH, K. **On the tribological behaviour of selected, injection moulded thermoplastic composites**. Composites Part A 29A, 763-771, 1998. **Revista Lubes em Foco**, Ed. Fev/Mar 08, Ano I, nr. 5, publicado pela Agencia Virtual Ltda.

REZENDE, M.C. **Fractografia de compósitos estruturais**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 43, 2007

RHODIA: **Moldagem por injeção e concepção de peças em poliamidas**, Rhodia Plásticos, São Paulo, 2006.

RODRIGUES, A.A. **Investigação das características tribológicas e ambientais de termoplásticos de engenharia especiais para uso em materiais de atrito**. 2007. 195f. Tese (Doutora em Engenharia de Materiais), USP, São Paulo, 2007.

ROSA, D.S. **Correlação entre envelhecimentos acelerado e natural do polipropileno isotático (PPI)**. 1996. 262f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS, I.M. **A micro abrasive wear test, with particular application to coated systems**. Surface and coatings technology, vol.79, 1996.

SANT'ANNA, J.A.P e WIEBECK, H. **Ferramentas para seleção de materiais poliméricos buscando substituir materiais metálicos**, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.

SANTOS NETO, A.O.; MANCINI, S.D. **Mudar para melhorar**. Jornal Cruzeiro do Sul, Sorocaba - São Paulo, p. 2 - 2, 07 out. 2008.

SANTOS, M.C.B. **O método de extensão visual da trinca na fadiga por contato do tipo "spalling"**. 2004. 133f. Dissertação (Mestre em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SILVA, C.H.; SINATORA, A. **Development of severity parameter for wear study of thermoplastics**. Wear 263, 2007, pg. 957-964.

SIRBONE, F.R.C.; FREITAS, T.C.; **Determination of oil outflow and pressure in a lubrication pump of low capacity motorcycles through experimental analysis**, 18º SAE Internacional, São Paulo, 2009.

SOARES. B.M.C.; SARON, E.S. **Microanálise elementar de materiais: aplicações do sistema MEV – EDX**. Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens, vol. 22, nº 1, 2010.

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

SUAREZ, J.C.M.; COUTINHO, F.M.B.; SYDENSTRICKER, T.H. **Analysis of the fractures behavior of polypropylene – sawdust composites**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 2, 2005

TREZONA, R.I.; ALLSOPP, D.N.; HUTCHINGS, I.M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.** *Wear* 225-229, pg. 205 – 214, 1999.

TREZONA, R.I.; HUTCHINGS, I.M. **Three-body abrasive wear testing of soft materials.** *Wear* 233-235, pg. 209-221, 1999.

VAN VLACK, L.H.; **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1984.

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

ZIMMERMANN, M.A. **Sistema especialista protótipo para auxílio na seleção de bombas hidrostáticas.** 2003. 108f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção), UFSC, Florianópolis, 2003.