

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

ANDERSON ANTONIOLI

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS SISTEMAS POM/AI6063 T5 E PA6 20% FIBRA
DE VIDRO/AI6063 T5**

PORTO ALEGRE

2021

ANDERSON ANTONIOLI

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS SISTEMAS POM/AI6063 T5 E PA6 20% FIBRA
DE VIDRO/AI6063 T5**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Célia de Fraga Malfatti

Porto Alegre

2021

ANDERSON ANTONIOLI

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS SISTEMAS POM/Al6063 T5 E PA6 20% FIBRA
DE VIDRO/Al6063 T5**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Célia de Fraga Malfatti

Coordenador PPGEM: Prof. Dr. Afonso Reguly

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Alberto Ludwig – FSG

Dr. Leonardo Marasca Antonini – DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Pedro Carlos Hernandez Junior – IFSUL

*È necessario ricordare i nostri antenati
perché grazie a loro siamo qui oggi*

É preciso lembrar-se dos nossos antepassados
pois graças a eles hoje nós estamos aqui!

(Letra da música Recordarsi dei Nostri Italiani, que retrata a história de prosperidade e vitória dos Imigrantes Italianos)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por proporcionar a vida e a força de vontade.

Aos meus pais, Carlos Antonioli e Terezinha Zanella Antonioli, pelo esforço em proporcionar as bases da educação e princípios que são a base da educação.

A minha esposa, Naara Canci Cunico, pela compreensão nos momentos em que a dedicação exclusiva ao trabalho era necessária e pelo incentivo constante.

A minha orientadora Prof. Dr. Célia, de Fraga Malfatti pelo apoio, por compartilhar o conhecimento e pela paciência na elaboração deste trabalho, e também por abrir as portas do laboratório LAPEC onde os principais testes do trabalho foram realizados.

Ao Prof. Dr. Leonardo Marasca Antonini, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho de detalhamento dos resultados.

A todos os professores (as) do PPGE3M pelos momentos de aprendizado neste período.

Aos colegas Jonas Tedesco, Vagner do Nascimento, Carina Longo e Jones de Borba pela companhia durante as longas viagens no andamento do trabalho.

Aos colegas Engenheiros Rudimar Mazzochi e Cesar Gonçalves dos Reis pela amizade e pela ajuda durante a execução do trabalho.

Ao Prof. Dr. Leandro Luis Corso da UCS, por incentivar o primeiro passo desde trabalho.

Ao senhor Gaston Henrique Rossa, técnico do laboratório da UCS, pela ajuda com as imagens obtidas neste trabalho.

A empresa Rometal Componentes pelo apoio, e oportunidade de realizar os testes para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O crescente desenvolvimento dos polímeros viabilizou a aplicação em inúmeras situações que a algumas décadas não eram viáveis. A indústria do segmento de móveis e acessórios está ligada ao uso de polímeros em boa parte de seus produtos, é dentro deste contexto de aprimoramento que este trabalho está inserido. Este trabalho tem por objetivo avaliar a resistência ao desgaste de dois materiais polioximetileno (POM) e PA6 com 20% de fibra de vidro, contra uma superfície da liga Al 6063 T5, utilizando tribômetro na configuração *ball-on-plate*. Além disso, será realizado um teste em escala real que simula as condições reais de aplicação (teste funcional), visando determinar o desempenho de cada par tribológico. O teste constitui na utilização de esferas de POM e PA6 20% de fibra de vidro obtidas pelo processo de injeção e de placas de Al 6063 T5 obtidas pelo processo de extrusão. Os ensaios de desgaste foram realizados com cargas de 1N, 3N, 5N e 8N e percurso de 20 mm na modalidade *ball-on-plate*. Para a execução do teste foi utilizada uma triplicata de amostras em cada carga, com a utilização do tribômetro foi avaliada a variação do coeficiente de atrito das amostras durante o percurso do teste, a avaliação do desgaste das esferas foi realizada por microscopia óptica e perfilometria. Foi realizado um teste funcional para a comparação dos resultados com o ensaio *ball-on-plate*. Para a avaliação do comportamento ao desgaste das amostras em função dos parâmetros apresentados, foi proposta a utilização da teoria de Hertz a fim de obter a tensão de contato aproximada entre a esfera e o corpo de prova. Utilizou-se a equação da norma G133-05 para a estimar a perda de material por desgaste em cada carga. Os resultados indicaram uma tendência de desgaste maior para o material POM quando comparado com o PA6 20% de fibra de vidro. Esse comportamento pode estar associado a resistência inferior das propriedades mecânicas do POM comparativamente ao PA6, contendo fibras de vidro em sua estrutura, as quais conferem elevada resistência ao desgaste ao último.

Palavras-chave: POM; PA6 , Al6063T5, coeficiente de atrito, desgaste.

ABSTRACT

The growing development of polymers made it possible to apply it in countless situations that were not feasible a few decades ago. The furniture and accessories industry is linked to the use of polymers in a good part of its products, it is within this context of improvement that this work is inserted. This work aims to evaluate the wear resistance of two polyoxymethylene (POM) and PA6 materials with 20% glass fiber, against an Al 6063 T5 alloy surface, using a tribometer in the ball-on-plate configuration. In addition, a full-scale test will be carried out that simulates the real application conditions (functional test), in order to determine the performance of each tribological pair. The test consists of using POM and PA6 spheres 20% fiberglass obtained by the injection process and 6063 T5 plates obtained by the extrusion process. The wear tests were carried out with loads of 1N, 3N, 5N and 8N and a 20 mm course in ball-on-plate mode. For the execution of the test, a triplicate of samples was used in each load, with the use of the tribometer it was evaluated the variation of the coefficient of friction of the samples during the course of the test, the evaluation of the wear of the balls was performed by optical microscopy and profilometer. A functional test was performed to compare the results with the ball-on-plate test. For the evaluation of the wear behavior of the samples as a function of the presented parameters, it was proposed to use the Hertz theory in order to obtain the approximate contact voltage between the sphere and the specimen. The G133-05 standard equation was used to estimate the material loss due to wear on each load. The results indicated a greater wear tendency for the POM material when compared to PA6 20% fiberglass. This behavior may be associated with the lower resistance of the mechanical properties of POM compared to PA6, containing glass fibers in its structure, which give high resistance to wear to the latter.

Keywords: POM; PA6, Al6063 T5, Wear coefficient, Wear.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – UM DOS PRIMEIROS “TRIBOLOGISTAS”, LUBRIFICANDO UMA ESTÁTUA EM APROXIMADAMENTE 2400 AC (ADAPTADO DE BUSHAN [1].	19
FIGURA 2 – EGÍPCIOS UTILIZANDO “LUBRIFICANTE” PARA FACILITAR O MOVIMENTO DE UM COLOSSO SOBRE TRENÓ EM APROXIMADAMENTE 1800 AC (ADAPTADO DE BHUSHAN [1].	20
FIGURA 3 – FATORES QUE INFLUENCIAM O DESGASTE (ADAPTADO DE NOTAS DE AULA EESC-USP (2016)[60].	20
FIGURA 4 – (A) DUAS ESFERAS EM CONTATO PELA FORÇA F, (B) DISTRIBUIÇÃO DE CONTATO HEMISFÉRICA AO LONGO DO DIÂMETRO 2A DA ÁREA DE CONTATO (ADAPTADO DE BUDYNAS E NISBETT [6]).	22
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CONTATO EM UM CORPO ESFÉRICO EM CONTATO COM UMA SUPERFÍCIE PLANA, (ADAPTADO DE NORTON [8]).	22
FIGURA 6 – MAGNITUDE DAS COMPONENTES DE TENSÃO ABAIXO DA SUPERFÍCIE COMO FUNÇÃO DA PRESSÃO MÁXIMA PARA CILINDROS EM CONTATO. O MAIOR VALORE DE τ_{max} OCORRE EM $z/b = 0,786$. SEU VALOR MÁXIMO É DE $0,30 P_{max}$ (ADAPTADO DE BUDYAS E NISBETT [6]).	23
FIGURA 7 – TENSÕES NA REGIÃO DE CONTATO ENTRE DOIS CORPOS DEVIDAS AS DISTRIBUIÇÕES TANGENCIAL E NORMAL, CONFORME JOHNSON (1987) (ADAPTADO DE DUARTE [7]).	24
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DA ZONA AFETADA EM UM POLÍMERO SOB CARREGAMENTO DE UM CORPO COM DUREZA SUPERIOR (ADAPTADO DE METALS HANDBOOK [4]).	25
FIGURA 9 – FORMAÇÃO DO MICROFISSURAMENTO SUPERFICIAL EM UMA REGIÃO DE CONTATO. A FIGURA (A) APRESENTA UMA PARTÍCULA COM DUREZA MAIOR DO QUE A SUPERFÍCIE DE CONTATO. A FIGURA (B) APRESENTA UMA PARTÍCULA COM DUREZA MENOR QUE A SUPERFÍCIE DE CONTATO (ADAPTADO DE METALS HANDBOOK [4]).	25
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA SITUAÇÃO DE ESFORÇOS NA FRICÇÃO (ADAPTADO DE HUTCHIGNS [11]).	26
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DESGASTE (ADAPTADO DE ZUM GAHR [21]).	29
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS MECANISMOS DE DESGASTE (ADAPTADO DE METALS HANDBOOK [4]).	29
FIGURA 13 – MECANISMOS DE DESGASTE ORIGINADOS PELA ABRASÃO. A FIGURA (A) APRESENTA A FORMAÇÃO DE PEQUENAS REMOÇÕES DE MATERIAL. A FIGURA (B)	

APRESENTA A FORMAÇÃO DE FISSURAS DEVIDO AO CONTATO POR FADIGA. A FIGURA (C) APRESENTA A REMOÇÃO DE MATERIAL DEVIDO AO ACUMULO DE PEQUENAS CAMADAS NA SUPERFÍCIE. A FIGURA (D) APRESENTA O CORTE A DA SUPERFÍCIE POR UMA PARTÍCULA DE DUREZA ELEVADA. (ADAPTADO DE MACHADO ET AL. [22]).	30
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE REAL E A SUPERFÍCIE CAPTADA POR UM APALPADOR (ADAPTADO DE BUSHAN [1]).	33
FIGURA 15 – MÓDULOS ELÁSTICOS TANGENTE E SECANTE (ADAPTADO DE ASTM D638 [33]).	35
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO (ADAPTADO DE ASTM D790 [34]).	36
FIGURA 17 – LOCAL ONDE A CARGA É APLICADA PARA O ENSAIO DO MÓDULO ELÁSTICO (ADAPTADO DE ASTM D790 [34]).	36
FIGURA 18 – FORMA DO CORPO DE PROVA PARA O ENSAIO DE IMPACTO COM ENTALHO (ADAPTADO DE ASTM D256 [35]).	37
FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO DE COMO É O TESTE DE DUREZA ROCKWELL (ADAPTADO DE ASTM D785 [36]).	37
FIGURA 20 – ESCALA DE DUREZA ROCKWELL (ADAPTADO DE ASTM D785 [36]).	38
FIGURA 21 – GRÁFICO DO TEMPO VERSUS TEMPERATURA PARA ALCANÇAR 80% DO ALONGAMENTO INICIAL (ADAPTADO DE WIEBECK [37]).	39
FIGURA 22 – GRÁFICO DO TEMPO VERSUS TEMPERATURA PARA ALCANÇAR 80% DA TENSÃO INICIAL (ADAPTADO DE WIEBECK [37]).	39
FIGURA 23 – ADAPTADO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA 6063 (ALCOA) [44] .	42
FIGURA 24 – ADAPTADO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA 6063 – T5 (ALCOA) [44].	42
FIGURA 25 – PROCESSO DE EXTRUSÃO DO ALUMÍNIO ABAL [45].	43
FIGURA 26 – INVENTOR E O ESQUEMA DO PRIMEIRO EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO (HTTP://FATECZL.EDU.BR/TCC/2009-1/TCC-113.PDF [46]).	44
FIGURA 27 – INJETORA PNEUMÁTICA (HTTP://WWW.ARBURG.COM [47])	45
FIGURA 28 – ESQUEMA DE UMA INJETORA DE PLÁSTICOS (HTTPS://WWW.TUDOSOBREPLASTICOS.COM/PROCESSO/INJECÃO.ASP [48]).	45
FIGURA 29 – PERFILÔMETRO UTILIZADO NESTE TRABALHO.	48
FIGURA 30 – INJETORA UTILIZADA PARA FABRICAÇÃO DAS ESFERAS	48
FIGURA 31 – MOLDE UTILIZADO PARA INJEÇÃO DAS ESFERAS DOS POLÍMEROS UTILIZADAS NO ENSAIO DE DESGASTE <i>BALL-ON-PLATE</i> .	49
FIGURA 32 – TRIBÔMETRO UTILIZADO NESTE TRABALHO.	51

FIGURA 33 – PLACA QUADRADA DE AL 6063 T5, UTILIZADA NO ENSAIO DE DESGASTE <i>BALL-ON-PLATE</i> PARA TESTE COM AS ESFERAS DE POM E PA6 20% FIBRA DE VIDRO.	52
FIGURA 34 – MODO QUE OS TESTES FORAM REALIZADOS NO TRIBÔMETRO CONFIGURAÇÃO <i>BALL-ON-PLATE</i>	52
FIGURA 35 – ESTRUTURA ONDE FORAM REALIZADOS OS TESTES DE DURABILIDADE.	53
FIGURA 36 – REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO TESTE DE BANCADA SOB TRILHO.	54
FIGURA 37 – IMAGEM (A) REPRESENTA AS PLACAS DE AL E A IMAGEM (B), REPRESENTA A ESFERA UTILIZADA NO ENSAIO DE DESGASTE <i>BALL-ON-PLATE</i>	55
FIGURA 38 – IMAGEM OBTIDA POR PERFILOMETRIA DE CONTATO NO PERFILÔMETRO CETR-PRO5003D, APRESENTA A TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA PLACA DE AL 6035 – T5, ANTES DO TESTE DO ENSAIO DE DESGASTE <i>BALL-ON-PLATE</i>	56
FIGURA 39 – COEFICIENTE DE ATRITO (μ) DAS AMOSTRAS AVALIADAS COM CARGA DE 1, 3, 5 E 8N PARA O MATERIAL PA6 20% FIBRA DE VIDRO.	57
FIGURA 40 – IMAGEM OBTIDAS POR INTERFEROMETRIA DO DESGASTE DA SUPERFÍCIE DAS ESFERAS DE PA6 20% FIBRA DE VIDRO (PARA AS CARGAS DE 1, 3, 5, E 8N).	58
FIGURA 41 – IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓPTICA DA REGIÃO DE DESGASTE ESFERAS PA6 20% FIBRA DE VIDRO (ENSAIO DE DESGASTE NO TRIBÔMETRO A CONFIGURAÇÃO <i>BALL-ON-PLATE</i> , CARGAS 1, 3, 5, E 8N).	60
FIGURA 42 – COEFICIENTE DE ATRITO (μ) DAS AMOSTRAS AVALIADAS COM CARGA DE 1, 3, 5 E 8N PARA O MATERIAL POM.	62
FIGURA 43 – IMAGEM OBTIDA POR INTERFEROMETRIA DO DESGASTE DA SUPERFÍCIE DAS ESFERAS DE POM (PARA AS CARGAS DE 1, 3, 5, E 8N).	63
FIGURA 44 – IMAGEM DA REGIÃO DE DESGASTE DAS ESFERAS DO MATERIAL POM PARA O TESTE <i>BALL-ON-PLATE</i> , CARGAS 1, 3, 5, E 8N.	65
FIGURA 45 – COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA DO DIÂMETRO DA REGIÃO DE DESGASTE DAS ESFERAS PA6 20% FIBRA DE VIDRO E POM PARA O TESTE <i>BALL-ON-PLATE</i>	67
FIGURA 46 – IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA DA SUPERFÍCIE DA ESFERA DESGASTADA PARA O PA6 20% FIBRA DE VIDRO E O POM, CARGA DE 8 N.	68
FIGURA 47 – COMPARATIVO DA P_{max} DE CONTATO DE HERTZ PARA POM E PA6 20% FIBRA DE VIDRO.	70
FIGURA 48 – COMPARATIVO V_p (MM ³) ENTRE OS MATERIAIS POM E PA6 20% FIBRA DE VIDRO PARA AS CARGAS DE 1, 3, 5 E 8 N.	70
FIGURA 49 – ÁREA DE CONTATO ENTRE O RODÍZIO E O TRILHO PARA O TESTE DE BANCADA. A FIGURA (A) REPRESENTA O SISTEMA UTILIZADO NO TESTE, A FIGURA (B) REPRESENTA A	

VISTA LATERAL COM O SISTEMA E TRILHO UTILIZADO, A FIGURA (C) APRESENTA A IMAGEM DETALHADA DA REGIÃO DE CONTATO ENTRE RODÍZIO E TRILHO.....	73
FIGURA 50 – COMPARATIVO DE DESGASTE SUPERFICIAL ENTRE OS TESTES DE CICLAGEM COM CARGAS DE 20 E 40 KG PARA O PA6 20% FIBRA DE VIDRO COM UM AUMENTO DE 50 VEZES.	74
FIGURA 51 – COMPARATIVO DE DESGASTE SUPERFICIAL ENTRE OS TESTES DE CICLAGEM COM CARGAS DE 20 E 40 KG PARA O PA6 20% FIBRA DE VIDRO COM UM AUMENTO DE 100 VEZES.	75
FIGURA 52 – IMAGEM OBTIDA POR MICROSCÓPIO ÓPTICO COM 100X, DIFERENÇA ENTRE A SUPERFÍCIE USINADA E A ÁREA DE CONTATO DURANTE O TESTE DE BANCADA.	75
FIGURA 53 – μ ENTRE UMA SUPERFÍCIE USINADA (A), E UMA SUPERFÍCIE POLIDA (B) (ADAPTADO DE HUTCHINGS (1992)[11]).....	76
FIGURA 54 – P_{max} DE CONTATO DE HERTZ PARA O TESTE DE BANCADA COM O MATERIAL PA6 20% FIBRA DE VIDRO.	77
FIGURA 55 – COMPARATIVO ENTRE OS TESTES DE CICLAGEM COM CARGAS DE 20 E 40 KG PARA O POM COM UM AUMENTO DE 50 VEZES.	80
FIGURA 56 – COMPARATIVO ENTRE OS TESTES DE CICLAGEM COM CARGAS DE 20 E 40 KG PARA O POM COM UM AUMENTO DE 100 VEZES.	81
FIGURA 57 – P_{max} DE CONTATO DE HERTZ PARA O TESTE DE BANCADA COM O MATERIAL POM.	82
FIGURA 58 – COMPARAÇÃO AS MICROGRAFIAS DO PA6 20% FIBRA DE VIDRO E DO POM PARA A CARGA DE 40 KG E ALGUNS MECANISMOS DE DESGASTE.	83
FIGURA 59 – COMPARAÇÃO ENTRE A PERDA DE MASSA V_p E O DIÂMETRO APROXIMADO DA ÁREA DESGASTADA NAS ESFERAS DO ENSAIO DE DESGASTE <i>BALL-ON-PLATE</i>	84
FIGURA 60 – REPRESENTAÇÃO DA REMOÇÃO DE MATERIAL DA SUPERFÍCIE DE UM POLÍMERO EM CONTATO COM UM METAL (ADAPTADO DE WIELEBA [56]).	85
FIGURA 61 – REPRESENTAÇÃO DO DESGASTE EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE PARA SUPERFÍCIES DE POLÍMEROS E METAIS (ADAPTADO DE WIELEBA (2007)).....	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS PARÂMETROS EMPREGADOS NA QUANTIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DE ACORDO COM A NORMA ABNT NBR ISO 4287 [29] (ADAPTADO DE MACHADO ET AL. [22]).	32
TABELA 2 – VALORES NECESSÁRIOS PARA A FAIXA REQUERIDA DE Rq (ADAPTADO DE MACHADO ET AL. [22]).	33
TABELA 3 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO POLIACETAL (ADAPTADO DE WIEBECK [37]).	40
TABELA 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA POLIAMIDA (ADAPTADO DE WIEBECK [37]).	41
TABELA 5 – PARÂMETROS DE INJEÇÃO PARA FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS.	49
TABELA 6 – TESTE DE CICLAGEM PARA O PA6 20% FIBRA DE VIDRO.	54
TABELA 7 – TESTE DE CICLAGEM PARA O POM.	54
TABELA 8 – VALORES DE RUGOSIDADE OBTIDOS PELO PERFILÔMETRO DA PLACA DE AL 6063 – T5, ANTES DO ENSAIO DE DESGASTE BALL-ON-PLATE.	56
TABELA 9 – PRESSÃO MÁXIMA DE CONTATO ENTRE A ESFERA DE PA6 20% FIBRA DE VIDRO E A PLACA DE AL, DE ACORDO COM A EQUAÇÃO DE HERTZ, PARA CARGAS DE 1, 3, 5 E 8N.	59
TABELA 10 – Vp , PERDA DE VOLUME PARA A ESFERA PA6 20% FIBRA DE VIDRO DE ACORDO COM A EQUAÇÃO DE HERTZ, PARA CARGA DE 1, 3, 5 E 8N, CONSIDERANDO A MÉDIA DE ESFERAS.	59
TABELA 11 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA O DIÂMETRO DA REGIÃO DE DESGASTE DA ESFERA DE PA6 20% FIBRA DE VIDRO PARA O TESTE BALL-ON-PLATE.	61
TABELA 12 – Vp , PERDA DE VOLUME PARA A ESFERA DE POM DE ACORDO COM A EQUAÇÃO DE HERTZ, COM CARGA DE 1 N, CONSIDERANDO A MÉDIA DAS ESFERAS.	63
TABELA 13 – PRESSÃO MÁXIMA DE CONTATO ENTRE A ESFERA DE POM E A PLACA DE AL, DE ACORDO COM A EQUAÇÃO DE HERTZ, PARA CARGA DE 1N.	64
TABELA 14 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA O DIÂMETRO DA REGIÃO DE DESGASTE DA ESFERA DE POM PARA O TESTE <i>BALL-ON-PLATE</i> .	66
TABELA 15 – TESTE DE CICLAGEM PARA O PA6 20% FIBRA DE VIDRO.	72
TABELA 16 – TESTE DE CICLAGEM PARA O POM.	78

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fator pré-exponencial
α	Área de contato entre as duas esferas
d_1	Diâmetro da esfera 1
d_2	Diâmetro da esfera 2
E_1	Módulo de elasticidade para esfera 1
E_2	Módulo de elasticidade para esfera 2
ν_1	Coeficiente de Poisson para esfera 1
ν_2	Coeficiente de Poisson para esfera 2
F1	Força de contato entre esferas
P_{max}	Pressão máxima de contato
l	Largura do cilindro para cálculo de contato
b	Largura onde se aplica a força sobre o cilindro
V_p	Volume de material removido da esfera
h	Altura de material removido da esfera
R	Raio original da esfera
D	Diâmetro da esfera
μ	Coeficiente de atrito
W	Massa relativa ao corpo
F	Força para movimentar o corpo
l_T	Comprimento de amostragem
R_a	Desvio aritmético médio
R_q	Desvio médio quadrático
R_t	Altura total do perfil
R_z^*	Altura máxima do perfil
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil
R_{kd}	Fator de achatamento do perfil
$g.cm^{-3}$	Gramas por centímetro cúbico
MPa	Mega Pascal
POM	Poliacetil
PA	Poliamida (nylon)
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio

MDF	Placa de madeira aglomerada
Kg	Quilograma
μm	Micrômetro
TPU	Poliuretano
PTFE	Politetrafluoretileno
PMMA	Polimetil metacrilato
PVC	Cloreto de polivinil
PE	Poliétileno
LAPEC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO GERAL	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1 ATRITO E O ESTUDO DA TRIBOLOGIA	19
3.1.1 Teoria linear elástica de Hertz	21
3.1.2 Fricção e a interação entre Polímeros	24
3.1.3 Norma G133-05 Método de ensaio de desgaste <i>Ball-on-plate</i>	28
3.1.4 Leis de Fricção	28
3.1.5 Mecanismo de desgaste	28
3.1.6 Rugosidade	31
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS.....	34
3.2.1 Densidade	34
3.2.2 Resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo elástico na tração	35
3.2.3 Módulo de flexão	36
3.2.4 Resistência ao impacto Izod e Charpy.....	36
3.2.5 Dureza superficial.....	37
3.3 TIPO DE POLÍMEROS UTILIZADOS NO TRABALHO	38
3.3.1 Poliacetal	38
3.3.2 Poliamida 6 e 6.6 (Nylon).....	40
3.4 LIGA Al 6035 – T5	42
3.5 PROCESSO DE EXTRUSÃO DO ALUMÍNIO	42
3.6 PROCESSO DE INJEÇÃO	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1 PERFILÔMETRO	47
4.2 MÁQUINA INJETORA DE PLÁSTICO	48
4.3 MOLDE DE INJEÇÃO	49
4.4 FABRICAÇÃO DOS PERFIS DE AL E ESFERAS (POM E PA6 20% FIBRA DE VIDRO)	49
4.5 ENSAIO DE DESGASTE	50
4.5.1 Ensaio de desgaste em tribômetro na configuração <i>ball-on-plate</i>	50
4.5.2 Teste funcional.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 ENSAIO DE DESGASTE REALIZADO NO TRIBÔMETRO	55
5.1.1 Resultados de desgaste para o PA6 20% fibra de vidro	57
5.1.2 Resultados para o Poliacetal (POM).....	61
5.1.3 Comparativo dos resultados ensaio de desgaste <i>ball-on-plate</i>	66
5.1.4 Resultados do ensaio de desgaste pelo teste funcional	72
5.1.5 Comparação dos testes de bancada ensaio de desgaste <i>ball-on-plate</i>	82
6 CONCLUSÕES.....	88

REFERÊNCIAS 90

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais, especificamente, na classe dos polímeros vem modificando a forma de projetar e desenvolver componentes. A possibilidade de obter geometrias complexas e com processos de fabricação otimizados, aliada a diversas outras características como: Baixo peso específico, resistência a exposição ao meio ambiente inclusive, sob atmosferas corrosivas, são algumas vantagens do uso dos polímeros.

A indústria moveleira é relativamente jovem no conceito de desenvolvimento de produtos no Brasil, onde observa-se um relativo aumento no nível de desenvolvimento e investimento em meados da década de 90 e início dos anos 2000. A utilização de componentes poliméricos seguiu um caminho ao encontro desse nicho de mercado, onde peças compactas e minimalistas são utilizadas, com requisitos específicos de desempenho como baixo ruído e ainda aliada a um aspecto visual diferenciado. Estes quesitos são a porta de entrada para a utilização de materiais poliméricos.

O acesso a componentes importados fez com que indústria nacional buscase o desenvolvimento de componentes e materiais que pudessem estar em níveis similares aos importados, é neste contexto que este trabalho surge a fim de obter informações sobre o comportamento do desgaste em compostos de polímero em superfícies de Al, combinação que é encontrada em grande parte da indústria moveleira em geral. O desgaste dos componentes poliméricos compromete a durabilidade dos sistemas deslizantes e o conforto do consumidor final.

Neste contexto o presente trabalho visa avaliar a resistência ao desgaste entre materiais POM e PA6 20% de fibra, que são materiais amplamente utilizados na indústria, em contato superfície de Al 6063 T5, utilizando tribômetro na configuração *ball-on-plate*. Além disso, será realizado um teste funcional que simula as condições reais de aplicação, visando determinar o desempenho de cada par tribológico.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o desgaste entre compostos poliméricos POM e PA6 20% de fibra de vidro em contato com a liga Al 6063 T5 com a variação da carga aplicada, buscando relacionar o teste realizado em um tribômetro *ball-on-plate* com o teste de desgaste que simula as condições reais de aplicação (teste funcional).

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento em desgaste dos materiais POM e PA6 20% de fibra em contato com Al 6063 T5, empregando-se um tribômetro na configuração *ball-on-plate*.
- Relacionar os resultados obtidos nos ensaios de desgaste que simula as condições reais de aplicação (teste funcional) desses pares mencionados, com o desgaste obtido no ensaio de desgaste *ball-on-plate*.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta de forma introdutória os conceitos de tribologia, as particularidades sobre o contato de dois materiais e apresenta uma descrição sobre os materiais utilizados no trabalho.

3.1 ATRITO E O ESTUDO DA TRIBOLOGIA

De acordo com Bushan [1], a palavra tribologia foi utilizada pela primeira vez por Jost [2], derivado da palavra grega tribos que significa fricção, então a tradução literal seria “A ciência da fricção”. A tribologia como ciência possui aproximadamente cinco décadas, mas ela faz parte da evolução do homem e das civilizações Jost [2].

Analisando-se a tribologia com um foco industrial, que é o objetivo deste trabalho, de acordo com Bushan [1], temos exemplos de atritos classificados como produtivos que são: freios, embreagens, lápis de escrever. Outros são classificados como improdutivos como: Motores, rolamentos e vedações. Ainda, complementando, Bushan [1] cita que o atrito faz parte do dia a dia, onde atividades corriqueiras são dependentes do atrito como: fazer a barba, sola de sapatos, roupas, em todos estes existem a participação da tribologia como forma de proporcionar melhores condições ao ser humano. Registros históricos de civilizações que iniciaram a percepção do fenômeno de atrito, de acordo com a Figura 1 e Figura 2.

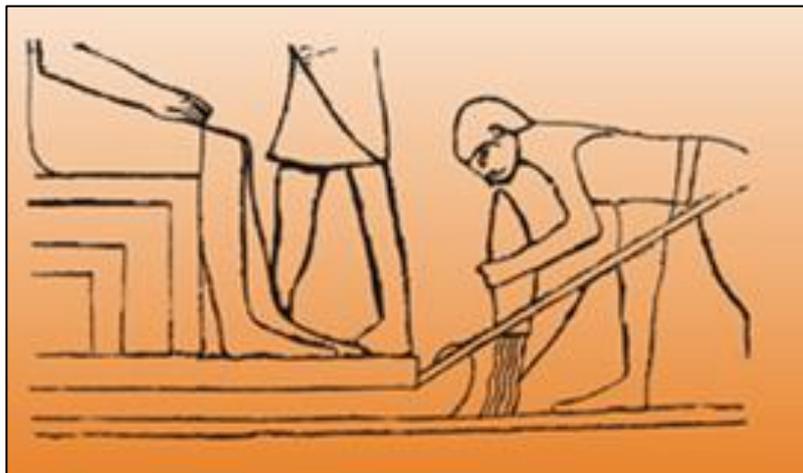


Figura 1 – Um dos primeiros “tribologistas”, lubrificando uma estátua em aproximadamente 2400 AC (adaptado de BUSHAN [1]).

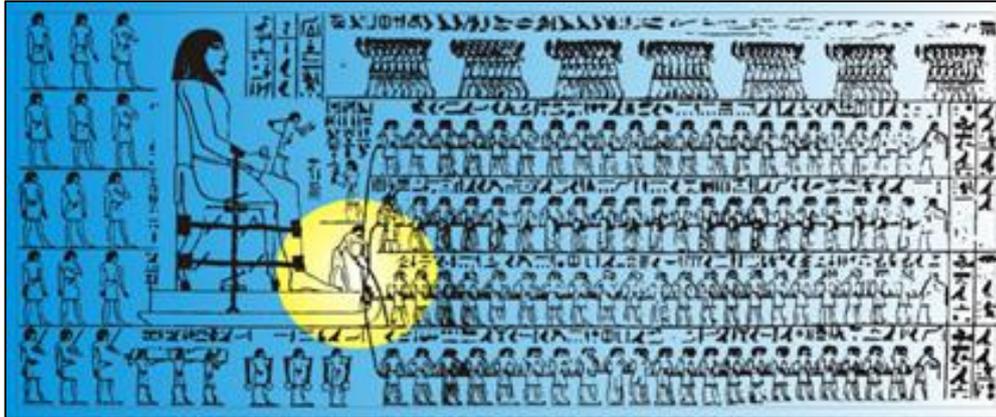


Figura 2 – Egípcios utilizando “lubrificante” para facilitar o movimento de um colosso sobre trenó em aproximadamente 1800 AC (adaptado de BHUSHAN [1]).

A tribologia se difunde por vários segmentos, porém, é possível citar um grupo de segmentos que possui uma ligação direta entre si. A grande maioria dos estudos sejam em meio acadêmico ou destinados a um produto ou processo estarão ligados aos assuntos descritos na Figura 3.

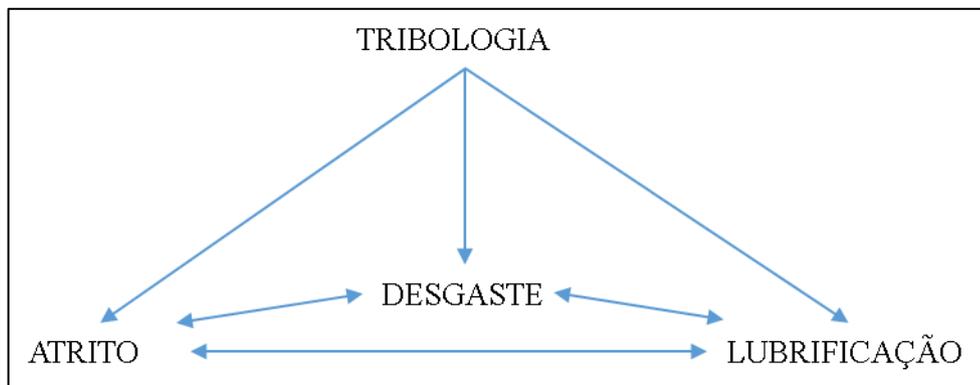


Figura 3– Fatores que influenciam o desgaste (adaptado de notas de aula EESC-USP (2016)).

A percepção do ser humano quanto ao atrito normalmente se dá pelos sentidos do tato e visão. A origem destas percepções será sempre aquilo que a superfície irá revelar, estas superfícies serão basicamente lisas ou rugosas. A questão é de forma quantitativa definir parâmetros para representar e caracterizar a superfície.

Segundo Stachowiak, G.W (apud 1993 ON THE THERMODYNAMICS OF FRICTION AND WEAR—A REVIEW) [3], o atrito de desgaste e a dissipação de energia é responsável por um terço da energia consumida no mundo.

De acordo com Metals Handbook [4], uma das invenções mais significativas do ser humano foi a descoberta que o atrito de rolamento é menor que a fricção de deslizamento, o que muitos anos depois levou a descoberta da roda.

Rymuza [5], explica o uso de aplicações que não utilizam lubrificante nos mais variados segmentos faz com que o uso de polímeros esteja crescendo.

3.1.1 Teoria linear elástica de Hertz

Budynas e Nisbett [6], citam que o contato de duas superfícies curvas deixa de ser pontual ou linear para a área de contato, e as tensões passam a ser tridimensionais.

De acordo com Duarte [7] a primeira abordagem de estudos de contato entre corpos elásticos homogêneos foi feita por Heinrich Hertz, em 1892. A teoria de Hertz está restrita a superfícies sem atrito e a sólidos perfeitamente elásticos. De acordo com a teoria de Hertz, na parte próxima ao contato entre cada corpo ocorrem as maiores tensões em comparação com as demais partes.

3.1.1.1 Contato esférico

Segundo Budynas e Nisbett [6], quando duas esferas são pressionadas uma contra a outras com uma força, uma área de contato é obtida. Esta área é definida pela Equação (1).

$$a = \sqrt[3]{\frac{3F1(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2}{8(1/d_1 + 1/d_2)}} \quad (1)$$

onde: a é a área de contato entre as duas esferas; d_1 e d_2 são os diâmetros de duas esferas sólidas; $F1$ representa a força que pressiona uma esfera na outra; E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade das esferas 1 e 2, respectivamente; e ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson das esferas 1 e 2.

Segundo Budynas e Nisbett [6], a distribuição de pressão dentro da área de contato de cada esfera é semiesférica, de acordo com a Figura 4.

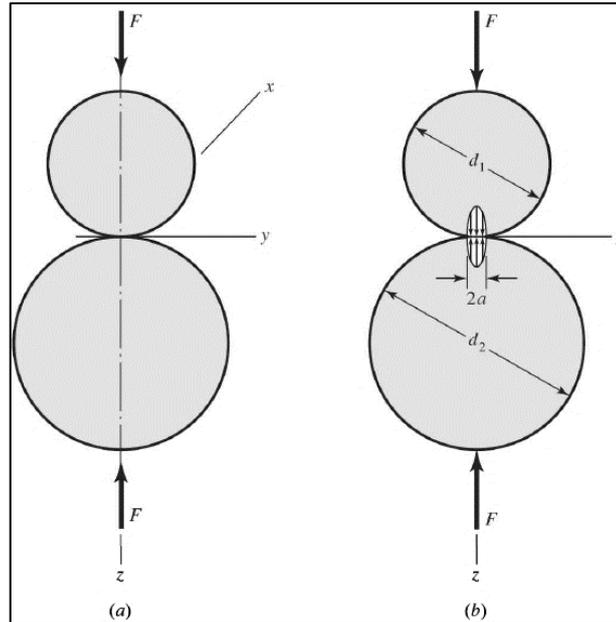


Figura 4 – (a) Duas esferas em contato pela força F , (b) Distribuição de contato hemisférica ao longo do diâmetro $2a$ da área de contato (adaptado de BUDYNAS E NISBETT [6]).

A pressão máxima ocorre no centro da área de contato, e pode ser determinada através da Equação (2).

$$P_{max} = \frac{3F1}{2\pi a^2} \quad (2)$$

onde: P_{max} representa a pressão máxima dentro da área de contato.

De acordo com Norton [8], a carga de contato entre uma esfera e o corpo é máxima na parte central e o esforço de contato em situações de cargas repetitivas é o principal causador da fadiga superficial. Isto é representado na Figura 5.

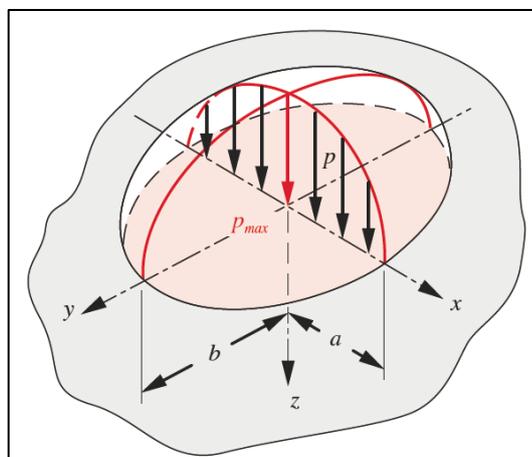


Figura 5 – Distribuição da tensão de contato em um corpo esférico em contato com uma superfície plana, (adaptado de NORTON [8]).

3.1.1.2 Contato Cilíndrico

De acordo com Budynas e Nisbett [6], o contato cilíndrico possui propriedades similares ao contato esférico, a área de contato é um retângulo estreito de largura $2b$ e comprimento l . A largura é definida conforme apresentado na Equação (3).

$$b = \sqrt{\frac{2F1(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2}{\pi l (1/d_1 + 1/d_2)}} \quad (3)$$

Onde: l é o comprimento do cilindro; e b é a largura onde se aplicada a força sobre o cilindro.

A pressão máxima para o contato cilíndrico é determinada através da Equação (4).

$$P_{max} = \frac{2F1}{\pi bl} \quad (4)$$

De acordo com Budynas e Nisbett [6], Hertz forneceu modelos matemáticos que são relevantes para situações descritas neste trabalho que é a tensão na linha de contato com fricção, mostrado na Figura 6.

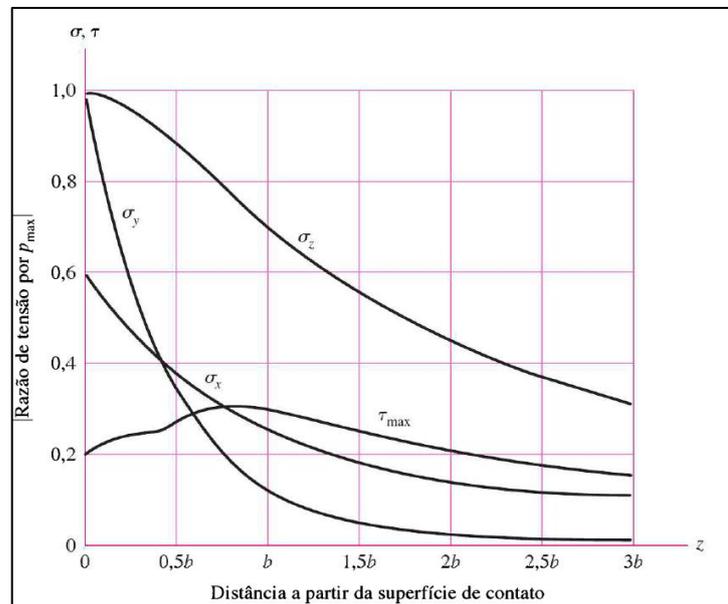


Figura 6 – Magnitude das componentes de tensão abaixo da superfície como função da pressão máxima para cilindros em contato. O maior valor de τ_{max} ocorre em $z/b = 0,786$. Seu valor máximo é de $0,30 P_{max}$ (Adaptado de BUDYAS E NISBETT [6]).

3.1.1.3 Carregamento normal e tangencial

Duarte [7], aborda em seu trabalho a questão que existem duas situações envolvidas, a primeira é tratada como o movimento deslizante que consiste em uma velocidade periférica relativa entre as superfícies nos pontos de contato e a segunda como movimento com rolamento onde envolve uma velocidade angular relativa entre dois corpos com respeito aos eixos paralelos entre essas superfícies. Isto é representado na Figura 7.

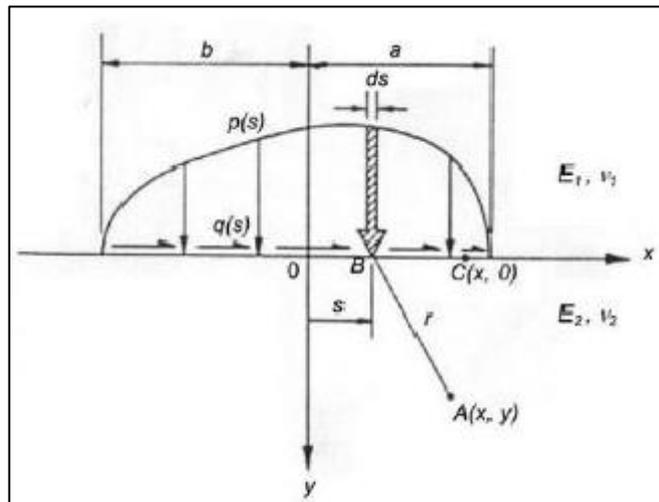


Figura 7 – Tensões na região de contato entre dois corpos devidas as distribuições tangencial e normal, conforme Johnson (1987) (adaptado de DUARTE [7]).

De acordo com Duarte [7] se não houver deslizamento entre os corpos em contato como um todo, deve haver um ponto na interface onde as superfícies se deformam sem que haja movimento relativo.

3.1.2 Fricção e a interação entre Polímeros

O atrito entre polímeros é causado por mecanismos similares aos que ocorrem nos metais, as diferenças entre os mecanismos ocorrem devido a viscoelasticidade e a sensível taxa de deformação dos polímeros [4]. Pode-se resumir o atrito em polímeros causado pela deformação mecânica e adesão superficial, conforme representado na Figura 8.

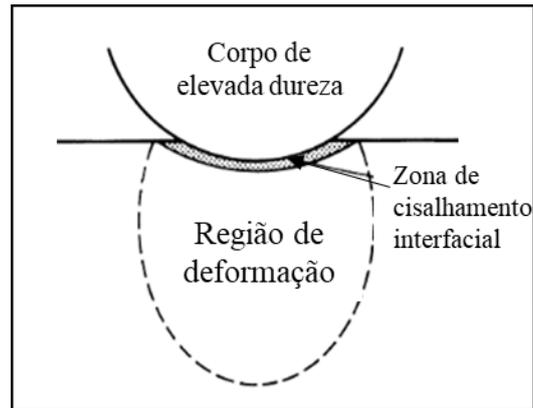


Figura 8 – Representação da zona afetada em um polímero sob carregamento de um corpo com dureza superior (adaptado de METALS HANDBOOK [4]).

O atrito na zona de deformação é causado pela dissipação de energia, na zona de deformação, os polímeros por sua vez possuem característica cuja deformação imposta é em grande parte recuperada [4]. A dissipação para polímeros vítreos possui características causada pelo microfissuramento enquanto polímeros dúcteis ocorre a deformação permanente. Os polímeros que não exibem deformação permanente possuem a energia dissipada pela histerese de deformação. Isto é exemplificado na Figura 9.

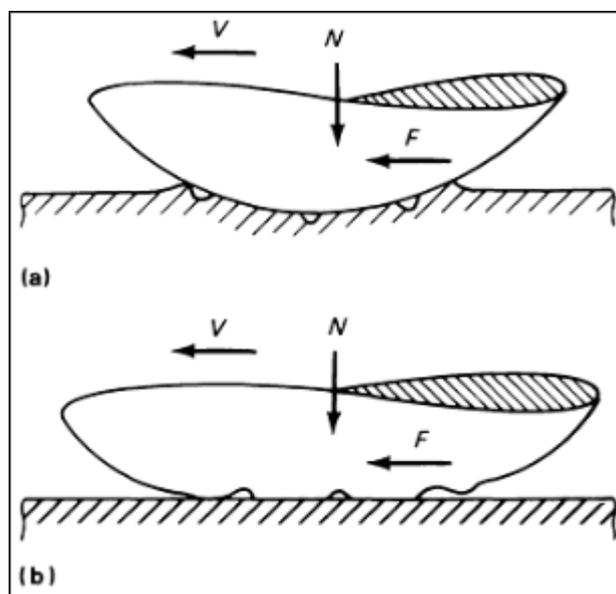


Figura 9 – Formação do microfissuramento superficial em uma região de contato. A figura (A) apresenta uma partícula com dureza maior do que a superfície de contato. A figura (B) apresenta uma partícula com dureza menor que a superfície de contato (adaptado de METALS HANDBOOK [4]).

De acordo com Lucian Capitanu [9], a utilização de compostos poliméricos com fibras, especificamente PA6 com 30% de fibras em contato com uma superfície metálica apresenta um

desgaste de adesão inicialmente, com a remoção de material polimérico, após essa quantidade de material estar na superfície, a presença de fibras na superfície esse desgaste passa a ser abrasivo com maior intensidade, também é relacionada uma proporcionalidade da remoção de material com a quantidade de fibras no material.

A fricção entre dois corpos gera um aumento da temperatura local, em seu trabalho Neale, J. M [10] realizou um teste pino-disco com o material polipropileno reforçado com fibras naturais, de acordo com os resultados explica-se que o aumento da temperatura pode provocar uma redução no atrito e possibilitar que a matriz de fibras do polímero se deforme. O autor ainda explica que a camada de polímero na superfície de contato também pode provocar a redução do atrito de deslizamento.

De acordo com Hutchings [11] a fricção pode ser determinada como a resistência encontrada por um corpo ao mover-se sobre uma superfície.

A Figura 10 representa exemplos da atuação dos esforços de fricção. O coeficiente de fricção pode ser determinado pelo símbolo μ .

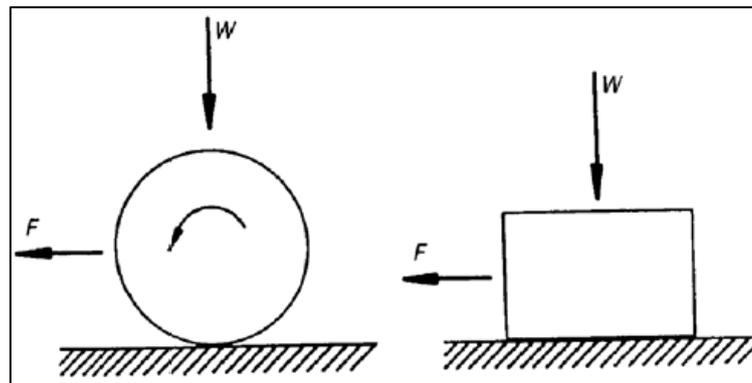


Figura 10 – Representação da situação de esforços na fricção (adaptado de Hutchings [11]).

De acordo com Hutchings [11], o coeficiente de fricção (μ) pode ser determinado pela Equação (5).

$$\mu = F/W \quad (5)$$

onde: W é a massa relativa ao corpo e F é força necessária para movimentar o corpo.

De acordo com Rymuza [5], as interações mecânicas estão localizadas nas camadas superficiais com contato de fricção e a relação dos corpos depende basicamente da contraparte.

A partir do trabalho realizado por Unal, Hakann Yetgin e Findik (2014) [12], foi realizado um teste de atrito pino disco, com o disco sendo de aço e o pino de PA6, ocorreu um

decréscimo do μ com o aumento da carga de aplicação, o autor considera a formação de um filme de polímero na superfície do disco que faz com que o contato ocorra entre polímeros.

O estudo de Unal e Mimraglu [13], também foi realizado um ensaio pino disco e os resultados são similares aos vistos em Unal, Hakann Yetgin e Findik [12], porém, testou-se combinações de PA6 com grafite e um composto de cera obtendo valores consideráveis de redução de desgaste em comparação com o PA6 puro.

De acordo com PIHTILI, H. AND TOSUN, N. [14] explicam que a carga aplicada e a velocidade de deslizamento tem um papel significativo no desgaste de polímeros, eles também comentam que a carga aplicada tem mais efeito no desgaste que a velocidade.

Existe uma dependência da temperatura na condição de desgaste explica Myshink. K [15], a proximidade da região vítrea do material polimérico causa maior dependência com a velocidade. Em seu trabalho também explica que a adesão ocorre no deslizamento de polímeros (PTFE, PMMA, PVC, PE), sobre metais, onde o resultado é a transferência de material para a superfície em formato de um filme, outra forma de desgaste citada é a fadiga que ocorre por meio do deslocamento de partes de material, o autor cita que esse fato ocorre por atrito prolongado.

Brostow et al. [16], explicam que é apresentado de forma errônea que superfícies com elevadas taxas de fricção apresentam elevados valores de desgaste, onde isso normalmente não ocorre, e que o teste para avaliação e validação do μ de cada material deve ser determinado.

Rymuza [5], explica que a carga e a velocidade influenciam o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste, apresenta também que a temperatura de contato também possui forte relação entre o desgaste e o μ , mas esta relação é consideravelmente mais complexa.

O trabalho realizado por Malik y. et al [17] onde foram realizados testes de fricção sobre uma barra de aço, obtendo a conclusão que as principais alterações no coeficiente de atrito foram observadas no momento de transição vítrea do material, o que ocorre devido a temperatura, nestes momentos observou-se redução no desgaste.

De acordo com Svahin e Csillag [18], onde testes de laboratório em uma superfície de aço com a presença de um lubrificante sólido aditivado com óleo, nesta situação observou-se redução do desgaste, como possíveis ocorrências os autores mencionam o aprisionamento das partículas próximas ao contato ou o preenchimento de microirregularidades por conta das partículas presente no lubrificante.

3.1.3 Norma G133-05 Método de ensaio de desgaste *Ball-on-plate*

A norma G133-05 [19] estabelece parâmetros e procedimentos para o ensaio de desgaste *ball-on-plate*, que representa o teste de um componente esférico sob ação de uma força normal em contato com uma superfície plana. A norma faz uso da equação de Hertz já descrita neste trabalho e também apresenta uma equação para o cálculo de volume de material removido da esfera V_p . A fórmula é apresentada nas Equações (6) e (7).

$$V_p = (\pi h/6)[3D^2/4 + h^2] \quad (6)$$

$$h = R - [D^2 - (D^2/4)]^{1/2} \quad (7)$$

onde: V_p é o volume de material removido da esfera; h é a altura do material removido da esfera; e R é o raio original da esfera, D é o diâmetro da esfera.

De acordo com F.J MARTINEZ, M.CANALES [20] atualmente ainda existe uma indefinição sobre modelos que descrevam o desgaste ou a fadiga para os polímeros, em seu estudo é realizado um ensaio para a avaliação de desgaste de TPU em um tribômetro sob uma superfície de aço, neste estudo o autor contesta algumas equações de desgaste e explica que para cada estudo de caso precisa existir uma análise específica.

3.1.4 Leis de Fricção

De acordo com Hutchings [11] podem ser descritas três leis básicas para a fricção,

- (1) A força de fricção é proporcional a carga normal;
- (2) A força de fricção é independente da área de contato visual;
- (3) A força de fricção é independente da velocidade de deslizamento.

3.1.5 Mecanismo de desgaste

De acordo com Zum Gahr [21], pode-se citar, de forma resumida, quatro principais mecanismos de desgaste, onde dentro de cada um pode-se ramificar em outros mecanismos com particularidades que se adaptam a processos e componentes específicos. Os principais

mecanismos de desgaste são: adesão, abrasão, fadiga superficial, e reação triboquímica. Os mesmos são apresentados na Figura 11.

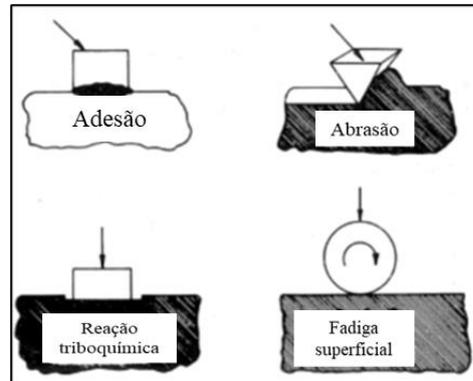


Figura 11 – Representação dos principais mecanismos de desgaste (adaptado de ZUM GAHR [21]).

Apesar de inúmeras teorias desenvolvidas para o conceito de fricção, nos últimos cem anos as leis básicas ainda são usadas como referência e adaptadas a casos específicos. Os mecanismos envolvidos, em diferentes graus na geração de atrito são: (1) adesão, (2) interação de asperezas superficiais, (3) atrito entre as asperezas das superfícies, (4) deformação ou fratura de camadas superficiais, (5) deformação plástica local [4].

Os mecanismos de desgaste também são representados por METALS HANDBOOK [4], na Figura 12.

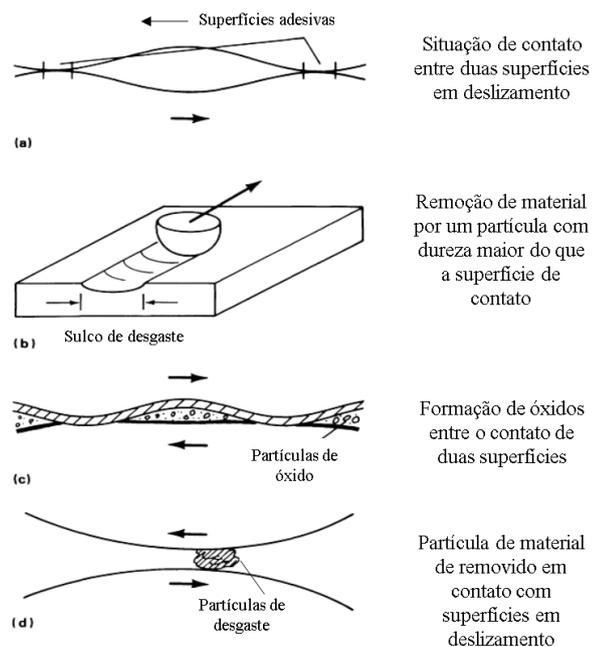


Figura 12 – Representação dos principais mecanismos de desgaste (adaptado de METALS HANDBOOK [4]).

De acordo com Brostow et al [16], um dos principais mecanismos de desgaste para polímeros é a fricção, seguido pela adesão. Materiais que possuem partículas duras podem provocar o corte da superfície. Um quesito importante citado é que não existe uma relação direta entre o desgaste do material e a sua resistência a ruptura. E quando a composição de um polímero é alterada, como é o caso deste trabalho, a energia superficial também é alterada.

3.1.5.1 Abrasão

Trata-se da remoção de material por riscamento, produzido por partículas duras ou protuberâncias duras que são forçadas e se movimentam contra uma superfície sólida, normalmente causada por cantos agudos. Isto é exemplificado na Figura 13.

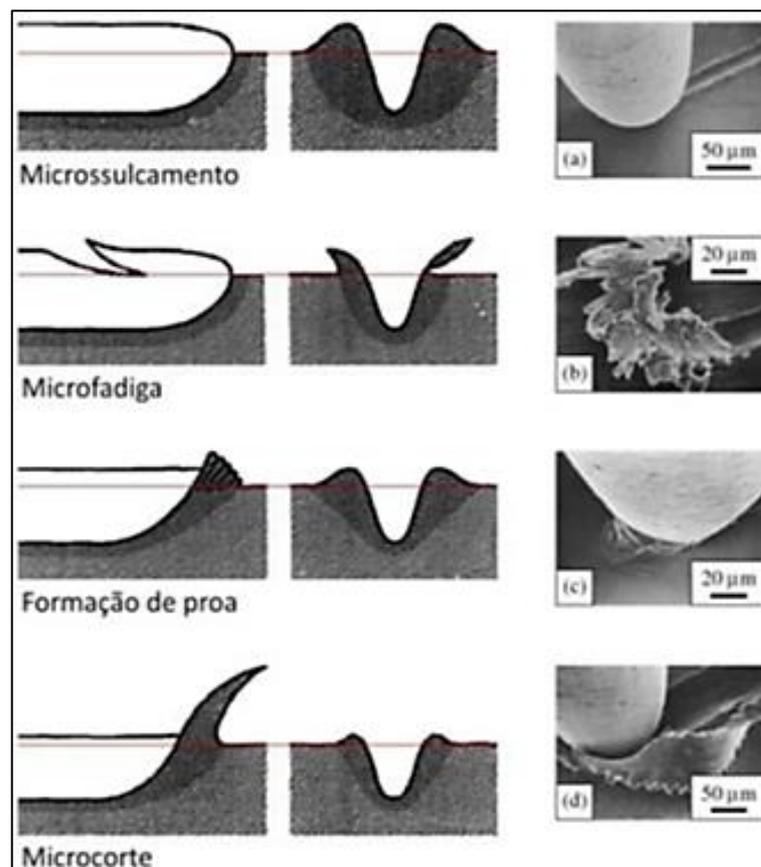


Figura 13 – Mecanismos de desgaste originados pela abrasão. A figura (A) apresenta a formação de pequenas remoções de material. A figura (B) apresenta a formação de fissuras devido ao contato por fadiga. A figura (C) apresenta a remoção de material devido ao acúmulo de pequenas camadas na superfície. A figura (D) apresenta o corte da superfície por uma partícula de dureza elevada. (adaptado de MACHADO et al. [22]).

Neale, J. M [23] cita que materiais heterogêneos compostos com diferenças de dureza são fatores significativos para a classe de desgaste e abrasão. Pode-se relacionar este quesito com o PA com fibra, em seu livro é comentada a relação que os compostos com diferenças de dureza elevadas podem causar um aumento do desgaste acima do esperado.

Low e Wong [24], avaliaram o deslizamento de PA e POM sobre um cilindro rotativo de aço, as partículas de PA que são removidas durante o teste se tornam um novo agente abrasivo influenciador no desgaste.

As ligações interfaciais entre dois corpos estão sob influência das áreas de contato, onde partículas mais duras estão gerando marcas nas superfícies, neste momento ocorre o surgimento do mecanismo de desgaste chamado abrasão [25].

Pogacnik e Kalin [26], informam que o principal mecanismo avaliado no contato de um pino de PA sobre uma superfície de aço foi a abrasão.

Srivansan V. et al [27] realizou estudos em que foram testados polímeros como resina de epóxi reforçado com fibra sobre rolos de aço inox, os resultados obtidos apresentaram que os principais mecanismos de pesquisa são o desgaste abrasivo e adesivo ou a sua combinação.

Em um estudo realizado por P.C Michael [28] com o teste pino disco foram testados vários materiais poliméricos, em temperatura ambiente e em regime criogênico, o principal mecanismo de desgaste observado foi a adesão.

3.1.6 Rugosidade

De acordo com MACHADO et al. [22] a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.). A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, que serão tratados posteriormente.

Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem. De fato, a rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, a utilização de métodos estatísticos aplicado ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um desses parâmetros, cita MACHADO et al. [22] em seu trabalho.

3.1.6.1 Rugosidade

Em geral, uma peça usinada é examinada em termos macro geométricos (dimensões, forma e orientação) e rugosidade. Ela é examinada depois da operação de usinagem, ou mesmo durante, de acordo com as tolerâncias e rugosidade especificadas no projeto. Os desvios dimensionais, de forma e de orientação, são mais fáceis de medir e de controlar e dependem principalmente da natureza da operação e da rigidez da máquina-ferramenta utilizada.

De acordo com Machado et al. [22] a rugosidade, por sua vez, é afetada por um elevado número de variáveis e pode ser avaliada por diversos parâmetros, que podem ser classificados em: Parâmetros de amplitude (determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície); Parâmetros de espaço (determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície); e Parâmetros híbridos (determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço).

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO4287 [29]

Tabela 1 – Principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 [29] (adaptado de MACHADO et al. [22]).

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z^*	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{kd}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

O comprimento de amostragem (l_T) é definido segundo a Norma ABNT NBR ISO 4287 [29], como sendo o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. Já o comprimento de avaliação (l_n) é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo X usado para estabelecer o perfil sob avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem, de forma a obter uma maior confiabilidade dos dados. A Tabela 2 apresenta esses valores de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 [29].

Tabela 2 – Valores necessários para a faixa requerida de R_q (adaptado de MACHADO et al. [22]).

Faixa de R_q (μm)	Comprimento de amostragem l_T (mm)	Comprimento de avaliação l_n (mm)
até 0,02	0,08	0,4
de 0,02 a 0,1	0,25	1,25
de 0,1 a 2	0,8	4
de 3 a 10	2,5	12,5
de 10 a 80	8	40

Entre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o R_t , amplamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo.

De acordo com Bushan [1], existem alguns erros associados a utilização de rugosímetros de caneta. Dentre os principais é possível citar a distorção de uma superfície que foi mapeada devido ao raio da ponta da caneta, em casos onde as asperezas da superfície são menores do que o raio da caneta. De acordo com a Figura 14, observa-se uma superfície e o caminho percorrido pela ponta do rugosímetro.

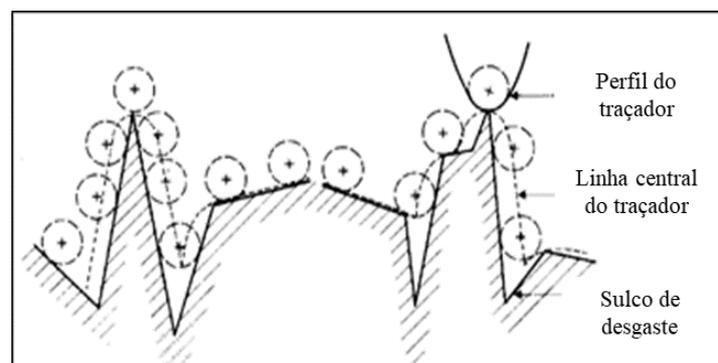


Figura 14 – Representação da variação entre a superfície real e a superfície captada por um apalpador (adaptado de BUSHAN [1]).

De acordo com Ludema, K.C [30] existe uma incerteza geral sobre a influência da rugosidade da superfície na taxa de desgaste, apresenta-se a proposta que os polímeros apresentam um estado geral de amaciamento seguido por um comportamento de desgaste linear. Em seu livro também explica a situação da formação de filmes de polímero sobre a superfície de contato, onde a formação destes filmes ocasiona posteriormente uma redução de atrito.

O estudo desenvolvido por Quaglini, virginio [31] onde foram testados polímeros para aplicação em pistas de rolamento. O trabalho desenvolveu uma equação específica para a aplicação e os resultados mostram que existe uma dependência da carga de aplicação onde a diminuição do coeficiente de atrito é reduzida devido ao crescimento da área de contato e a deformação das asperezas da superfície.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS

A constante necessidade de inovação faz com que novas aplicações que demandam novos materiais, cada vez mais resistentes, leves e de menor custo. Para isso é necessária uma gama de testes, medições e padronizações.

Com a padronização dos testes e informações é possível estabelecer relações e comparações entre os materiais, dados que nas mãos da engenharia são ferramentas úteis de seleção de materiais com o menor custo benefício para uma determinada aplicação.

Existem vários testes e para descrever as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e se tratando de polímeros é possível relacionar outros aspectos como brilho e etc.

Os polímeros obtidos neste trabalho foram obtidos por meio do processo de injeção por moldagem, seguindo os parâmetros de informados pelos fabricantes de cada material.

3.2.1 Densidade

A densidade é um dos principais fatores usados na seleção de qualquer material para um projeto, em algumas aplicações torna-se ainda mais importante como na indústria aeronáutica e automotiva. É comum tratar a relação custo/volume para selecionar um polímero em um projeto.

Densidade é descrita como a razão entre a massa de uma dada quantidade de material a 23°C e o volume de água deslocado por esta massa.

A densidade é uma propriedade essencial que pode ser utilizada na identificação de um material, ou na percepção de sua alteração física.

A norma ASTM D792 [32] descreve a realização desse ensaio, cujo resultado em geral é expresso em g.cm^{-3} .

3.2.2 Resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo elástico na tração

De acordo com a norma ASTM D-638 [33], dentre as propriedades mais importantes para projetistas e engenheiros podemos citar a resistência a tração, alongamento na ruptura e módulo elástico na tração.

O termo de resistência à tração é um termo amplo. Na realidade deve-se distinguir três diferentes fenômenos, sendo estes: (i) Tensão de escoamento (N.mm^{-2} ou MPa); (ii) Tensão no ponto de ruptura para o caso de fratura na zona plástica (tenacidade); (iii) Máxima tensão para o caso de fratura instantânea.

O módulo elástico ou módulo de tração é a relação entre a tensão aplicada e a consequente deformação na região em que ela ocorre linearmente e proporcional à tensão, exemplificado na Figura 15. Ainda, este parâmetro é uma importante informação da rigidez do material, sendo muito importante para escolher um polímero que tenha rigidez mecânica.

As propriedades de tração são descritas pela norma ASTM D638 [33], importante ferramenta para a caracterização das propriedades de polímeros e plásticos de engenharia.

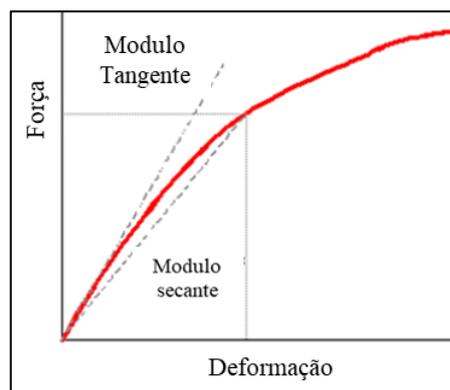


Figura 15 – Módulos elásticos tangente e secante (adaptado de ASTM D638 [33]).

3.2.3 Módulo de flexão

Se um componente automotivo plástico ou metálico, na maioria das vezes de secção transversal retangular, sofre uma deflexão entre dois apoios, imediatamente se percebe que uma superfície do material se deforma em tração, enquanto a superfície oposta sofre compressão. Este comportamento ocorre, até que se alcance a linha entre as duas superfícies, chamada de linha de tensão zero ou do eixo neutro. O módulo elástico na flexão ou módulo de flexão Figura 16, é reportado usualmente como o módulo inicial na deflexão da curva de carga. Como a maior parte dos componentes automotivos são, na prática, submetidos a esforços de flexão Figura 17, os resultados obtidos nos ensaios de flexão conduzirão a valores de engenharia mais confiáveis num estudo de seleção de plásticos de engenharia.

A norma ASTM D790 [34], descreve o procedimento deste ensaio, particularmente importantes para plásticos como Poliacetais (sem carga), PA e Poliésteres reforçados.

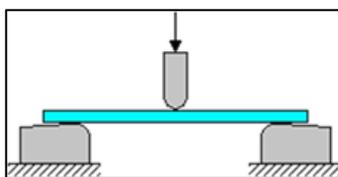


Figura 16 – Representação do ensaio para determinação do módulo elástico (adaptado de ASTM D790 [34]).

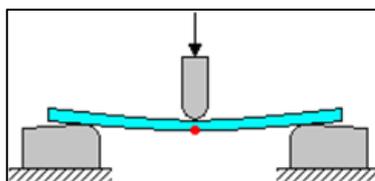


Figura 17 – Local onde a carga é aplicada para o ensaio do módulo elástico (adaptado de ASTM D790 [34]).

3.2.4 Resistência ao impacto Izod e Charpy

O teste de resistência ao impacto método Izod, visa medir a energia necessária para romper um corpo de prova injetado e entalhado sob condições padronizadas, utiliza-se a unidade $J.m^{-1}$.

O teste de resistência ao impacto é basicamente comparativo, e é útil para desenvolver uma base de teste comparativa para seleção de materiais. É válido ressaltar que muitas vezes o teste de impacto é relacionado com a tenacidade, em metais esta premissa pode ser aplicada com maior assertividade, porém, para polímeros exige um cuidado maior. Existem polímeros que apresentam uma sensibilidade maior ao entalhe, apresentando uma elevada concentração

de tensão na área do entalhe e devido a isso apresentarem valores de baixa resistência ao impacto.

A resistência ao impacto Charpy, é na prática, idêntico ao Izod, com exceção do posicionamento do corpo de prova, que é colocado deitado, enquanto no método Izod, este é posicionado na vertical.

A ASTM D256 [35] descreve os procedimentos para estes dois tipos de ensaios de impacto. A Figura 18 representa o corpo de prova para estes ensaios.

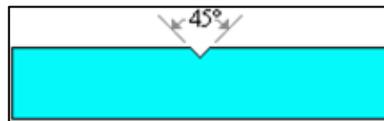


Figura 18 – Forma do corpo de prova para o ensaio de impacto com entalhe (adaptado de ASTM D256 [35]).

3.2.5 Dureza superficial

Em geral, mede a dureza Rockwell, e pode ser utilizada para diferenciar as durezas relativas de diferentes tipos de um dado plástico de engenharia.

De acordo com a norma ASTM D785 [36], o valor da dureza Rockwell de um plástico advém da profundidade de penetração de um corpo esférico no material, sob ação de uma carga. O valor da Dureza Rockwell de um material é sempre apresentado com uma “letra” que indica os diâmetros, da esfera utilizada no penetrador, a carga e a escala adotada. A dureza Rockwell está diretamente relacionada à dificuldade de perfurar o corpo de prova, quanto maior o valor na escala do equipamento, maior será a dureza do material e conseqüentemente resistência a risco.

A Figura 19 e Figura 20 representam como é feito o teste de dureza e a escala de dureza Rockwell, respectivamente.

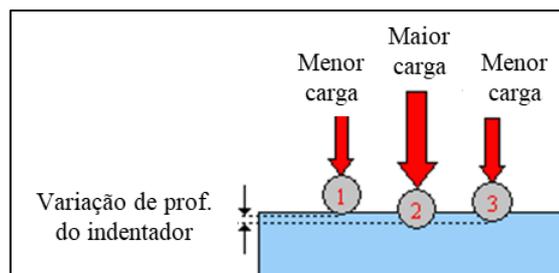


Figura 19 – Ilustração de como é o teste de dureza Rockwell (adaptado de ASTM D785 [36]).

Os tipos de poliacetal são normalmente aditivados com antioxidantes do tipo fenol-alcano, e compostos nitrogenados ou sais básicos que servem para neutralizar traços de ácidos minerais que atacam a união acetálica.

O Poliacetal possui uma elevada temperatura de fusão, ficando na ordem de 85 °C para uso contínuo. A faixa de utilização e o tempo de exposição são fatores que tem significativa influência no comportamento do material, sendo isto mostrado nas Figura 21 e Figura 22. A sua composição também possui interferência imediata.

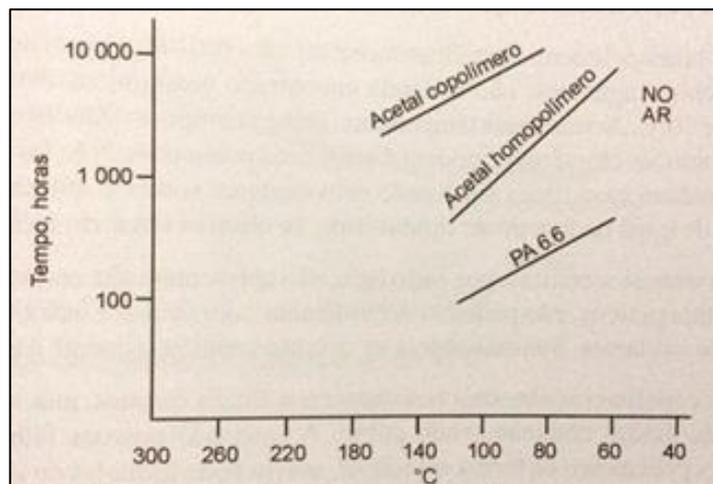


Figura 21 – Gráfico do tempo versus temperatura para alcançar 80% do alongamento inicial (adaptado de WIEBECK [37]).

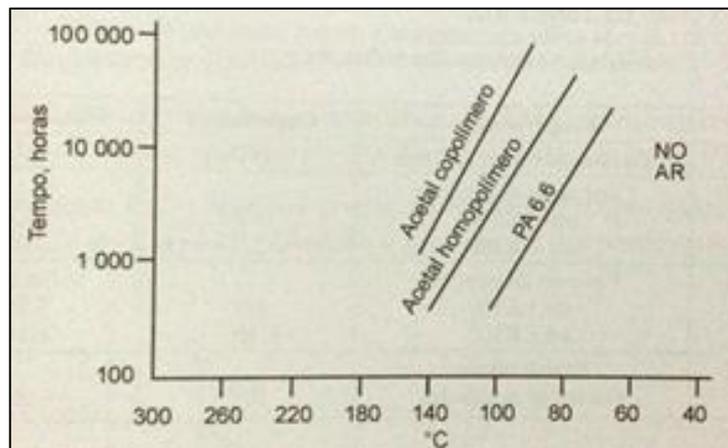


Figura 22 – Gráfico do tempo versus temperatura para alcançar 80% da tensão inicial (adaptado de WIEBECK [37]).

O poliacetal tem propriedades similares as do PA. Possuem elevada resistência a fadiga, fluência, rigidez e resistência a água, destacam-se por uma grande resistência a solventes, éteres, óleos, graxas e gasolina. Algumas propriedades do mesmo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físicas do poliacetal (adaptado de WIEBECK [37]).

Propriedades	Método	Acetal Homo	Acetal Copo
Resistência a tração (MPa)	ASTM D638	70	60
Alongamento na ruptura (%)	ASTM D638	40	70
Módulo de flexão (GPa)	ASTM D638	2,8	2,6
Resistencia ao impacto Izod com entalhe (J.m ⁻¹)	ASTM D638	75	65
Dureza Rockwell (R)	ASTM D638	120	115
Densidade (g.cm ⁻³)	ASTM D638	1,42	1,41

3.3.2 Poliamida 6 e 6.6 (Nylon)

De acordo com Wiebeck [37], a poliamida se destaca como um dos principais plásticos de engenharia por suas propriedades mecânicas, resistência ao tempo, baixo coeficiente de atrito e boa resistência ao impacto. Ela vem se destacando como uma opção para substituir metais, atualmente pode-se citar coletores de admissão de gases e a tampa de válvulas para motores de veículos. A aplicação da poliamida é amplamente diversificada sendo utilizada na indústria eletrônica, construção, móveis, engenharia.

Segundo WIEBECK [37], o desenvolvimento da poliamida ocorreu em meados de 1935 por W. H. Carothers nos EUA, que sintetizaram a primeira poliamida Nylon, a partir da policondensação de hexametileno diamina com ácido adípico.

De acordo com Lates [38] o desenvolvimento das poliamidas oferece novas possibilidades de uso aplicações para menor atrito. Poliamidas em modificadas são utilizadas na construção de engrenagens e componentes mecânicos.

As resinas de poliamidas podem ser divididas em dois grupos distintos e caracterizadas pela matéria que foram originadas. As poliamidas 6.6, 6.10 e etc. encontram-se polimerizadas a partir de uma diamina e de um diácido. As poliamidas 6, 11, 12 etc. são polimerizadas a partir de um aminoácido.

As principais propriedades de interesse das poliamidas comerciais são listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas da poliamida (adaptado de WIEBECK [37]).

Propriedades	PA 6	PA 11	PA 12	PA 6.6	PA 6.10	PA 6.12
Temperatura de fusão (°C)	215	185	177	252	215	210
Densidade (g.cm ⁻³)	1,14	1,04	1,02	1,15	1,08	1M07
Resistência a tração (MPa)	83	55	52	83	62	59
Módulo de flexão (MPa)	2758	1241	1172	2826	2413	1999

Uma das suas principais características térmicas é que a poliamida, até o seu ponto de fusão, permanece sólida e acima deste ponto ela se torna líquido. De forma geral as poliamidas podem trabalhar em temperaturas relativamente altas.

De acordo com BAHADUR [39] o desempenho tribológico dos polímeros pode ser consideravelmente melhorado com o reforço de fibras. Em seu trabalho K.D Dearn [40] também salienta a importância do uso de fibras na matriz de composição do polímero e que a sua adição modifica o módulo de resistência que é importante para o desgaste, o autor também cita que com a presença de fibras o desgaste do material mais predominante era o abrasivo.

De forma geral a poliamida está presente em uma ampla gama de aplicação, que cresce a cada dia. Pode-se observar a utilização da poliamida em equipamentos elétricos, isolamentos, compostos antichama, conectores e até aplicações como engrenagens, mancais e componentes que recebem uma demanda elevada de carga.

O tamanho e a orientação das fibras possuem impacto significativo no comportamento do polímero, onde fibras curtas podem reduzir a capacidade de carga e fibras demasiadamente longas podem aumentar a taxa de desgaste [41].

De acordo com Muhammad Nuruzzaman, Asaduzzaman Chowdhury e Luftar Rahaman [42], a orientação das fibras no componente a ser testado possui importante papel da condução do calor na região de contato, em alguns casos possui atuação mais importante que a própria quantidade de fibras. Este trabalho não considera a orientação das fibras no componente.

Tsukizoe e Ohmae [43], em seu trabalho relacionaram o reforço de fibra ou carga melhora significativamente o comportamento tribológico do material polimérico, mas esse comportamento não se aplica a todos os casos.

3.4 LIGA Al 6035 – T5

De acordo com ligas de tempera e extrusão ALCOA, a liga 6063 é uma das ligas mais populares da classe 60XX, com boas propriedades de extrusão e qualidade superficial. A liga 6063 é utilizada em aplicações de arquitetura e trocadores de calor. A liga 6063 possui resistência a corrosão e corrosão por tensão. A liga 6063 utilizada neste trabalho possui composição química de acordo com a Figura 23 e dureza específica T5 de acordo com a Figura 24.

Análise Química da Liga 6063				Temperatura Líquidus: 655°C				Temperatura Solidus: 615°C				Densidade: 2,69 g/cm ³		
Porcentagem em peso	Elementos													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Outro S Cada	Outro S Total	Alumínio
Mínimo	0,2	...	...	...	0,45	...	...	...	...	...	...	...	...
Máximo	0,6	0,35	0,1	0,1	0,9	0,1	...	0,1	0,1	...	...	0,05	0,15	Restante

Coeficiente Médio de Expansão Térmica (20 a 100°C) = 23,4 µm/m.K

Figura 23 – Adaptado de composição química da liga 6063 (ALCOA) [44].

Liga 6063: Limites de Propriedades Mecânicas						
Tempera	Seção específica ou Espessura de Parede	Resistência a Tração (Mpa)				Alongamento
		Limite de Resistência a Tensão		Limite de escoamento		Porcentagem Min. Em 50mm ou 4D ⁴
		Min.	Max.	Min.	Max.	
Tempera Padrão						
0	Todas	...	130	...	...	16
T4	Até 12,5	130	...	70	...	12
	12,5 - 25,00	125	...	60	...	10
T5	Até 12,5	175	...	130	...	6
	12,5 - 25,00	160	...	110	...	5
T6	Até 3,2	215	...	170	...	6
	3,2 - 25,00	195	...	160	...	6

Figura 24 – Adaptado de propriedades mecânicas da liga 6063 – T5 (ALCOA) [44].

De acordo com ABAL [45], a liga 6063 é considerada de fácil extrusão, devido a essa propriedade e a sua posterior capacidade de endurecimento é largamente utilizada na fabricação de perfis de geometrias complexas.

3.5 PROCESSO DE EXTRUSÃO DO ALUMÍNIO

De acordo com ABAL [45], extrusão é um processo de transformação termomecânica no qual um tarugo de metal é reduzido em sua seção transversal quando forçado a fluir através do orifício de uma matriz (ferramenta), sob o efeito de altas pressões e temperaturas.

Em vista das grandes forças envolvidas, a maior parte do metal é extrudada a quente, isto é, quando a resistência à deformação é baixa e a temperatura é superior à de recristalização do metal.

O processo de extrusão é utilizado comercialmente desde o final do século XIX. O primeiro grande incremento de utilização de perfis extrudados ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial. O desenvolvimento de ligas tratáveis termicamente na própria prensa de extrusão e de boa extrudabilidade, permitiu uma rápida expansão dessa indústria no pós-guerra.

Prensas hidráulicas horizontais com capacidade de força entre 1200 – 2400 toneladas são usadas para produzir a maior parte dos extrudados de alumínio utilizados no mundo. Prensas com capacidade de até 15000 toneladas são utilizadas para empurrar perfis de grande dimensão ou complexidade geométrica, bem como, perfis produzidos com alta resistência mecânica. A Figura 25 apresenta alguns componentes de uma extrusora de Al bem como uma breve descrição do processo.

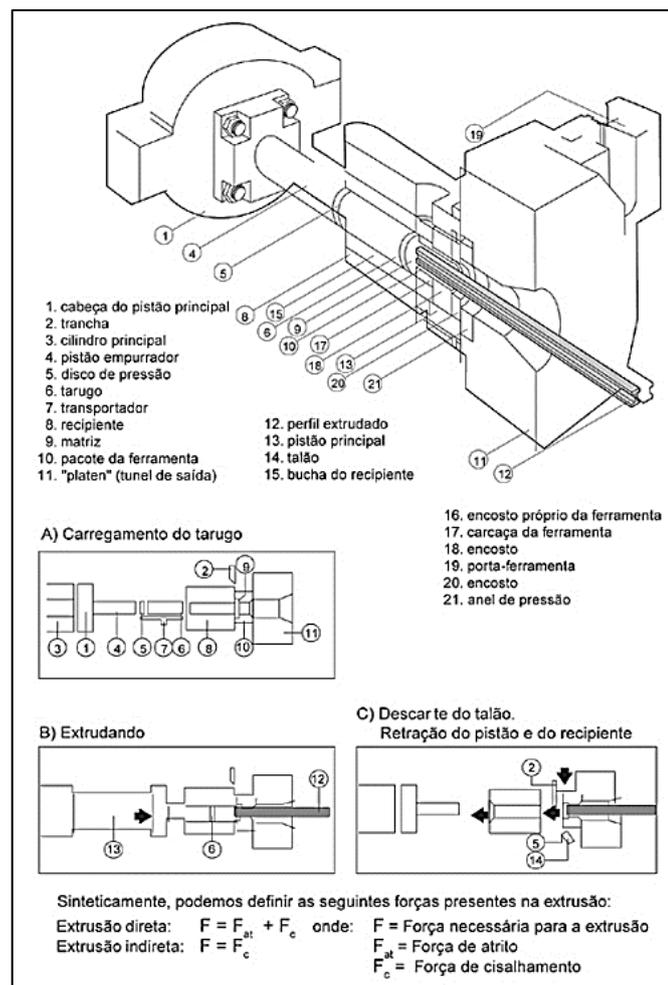


Figura 25 – Processo de extrusão do alumínio ABAL [45].

3.6 PROCESSO DE INJEÇÃO

De acordo com Vieira e Luiz [46], em 1872 foi patenteado o que seria o processo de moldagem por injeção, idealizada pelos irmãos Hyatt. Em 1878 John Wesley Hyatt criou um dos primeiros equipamentos para injeção. O equipamento é formado por um cilindro de aquecimento com câmaras aquecida a vapor, um bico para descarregar o material de um embolo acionado hidráulicamente para pressionar o material fundido. Ao lado do equipamento constava uma prensa hidráulica onde era despejado o material fundido com o molde fechado, era preciso devido à instabilidade do material de trabalho que é o nitrato de celulose, este desenvolvido pelo próprio Hyatt. A Figura 26 apresenta um esquema do primeiro equipamento para injeção.

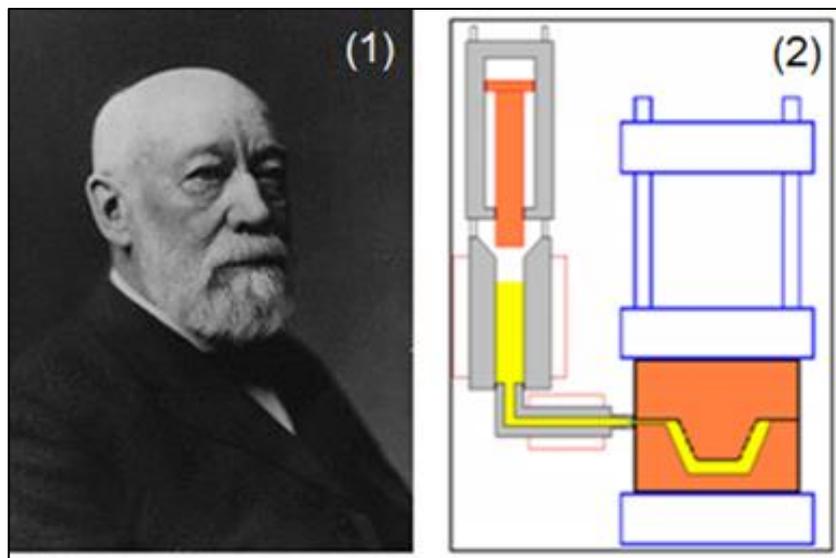


Figura 26 – Inventor e o esquema do primeiro equipamento de injeção (<http://fateczl.edu.br/TCC/2009-1/tcc-113.pdf> [46]).

As máquinas injetoras evoluíram de forma rápida, até que em 1972 surgiu a primeira injetora pneumática, como mostrado na Figura 27.

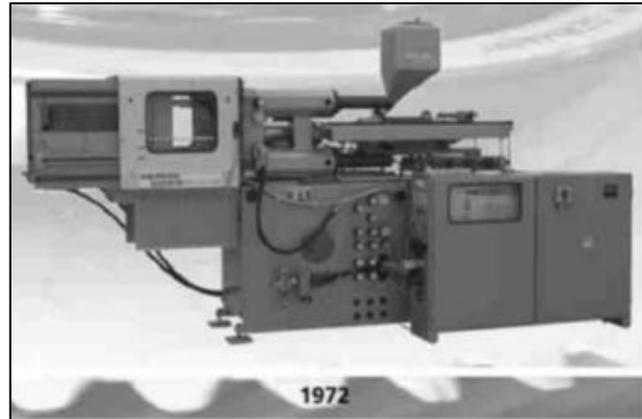


Figura 27 – Injetora pneumática (<http://www.arburg.com> [47])

De acordo com Vieira e Luiz [46], as injetoras possuem dois componentes básicos: a unidade de injeção e a unidade de fechamento. A unidade de injeção também é conhecida como unidade plastificadora, é onde através de cisalhamento, atrito e calor plastifica e homogeneiza o material termoplástico e através da unidade de injeção ocorre à transferência deste material para o interior do molde que fica alojado entre as placas fixa e móvel da máquina na unidade de fechamento. A unidade de fechamento garante o travamento do molde no momento da injeção e também faz a abertura do molde após a solidificação da peça para ser extraída. Isto é exemplificado na Figura 28.

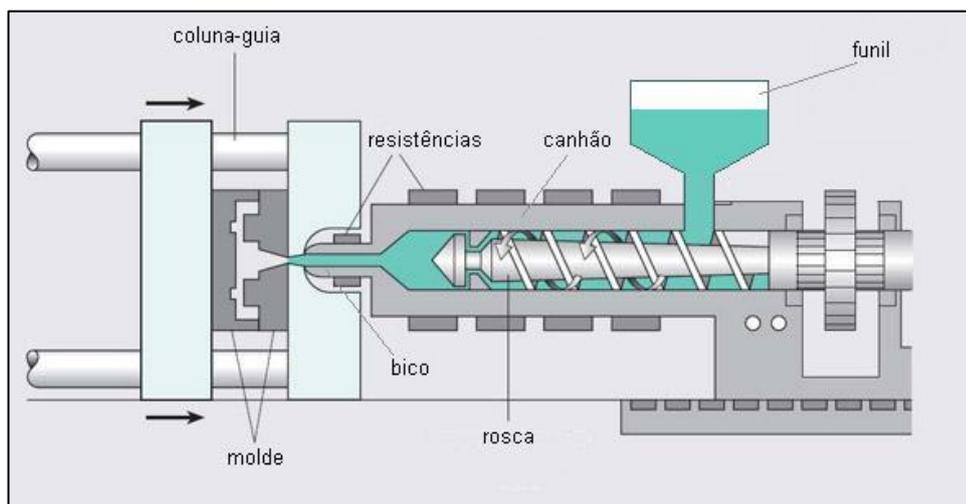


Figura 28 – Esquema de uma injetora de plásticos (<https://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp> [48]).

As máquinas injetoras podem ser hidráulicas, elétricas ou híbridas, ter fechamento do molde na horizontal ou na vertical, podendo ser hidráulico, hidráulico-mecânico ou elétrico-mecânico, ter pistão ou rosca para efetuar a injeção do material plastificado e ter um a vários

cilindros de injeção, estas são conhecidas como máquinas especiais bi componentes ou multicomponentes.

As máquinas injetoras possuem três modos de operações: (i) Automático – Todas as etapas do ciclo de moldagem são realizadas automaticamente, havendo o início de um novo ciclo sem a necessidade de comando do operador. O equipamento só paralisa a operação se houver uma intervenção ou condição de alarme no processo; (ii) Semiautomático – Neste modo a máquina realiza toda etapa de um ciclo de moldagem e somente inicia a repetição do ciclo com o comando do operador; Manual – Este é o modo de operação em que cada função e tempo de cada função da máquina são controlados manualmente pelo operador.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos: Tribômetro, Perfilômetro, Interferômetro, Microscópio óptico, Injetora ROMI 130, molde de injeção, dispositivo de teste especial e software de desenho 2D *Draftsight*.

O trabalho constituiu-se das seguintes etapas:

- 1- Fabricação da cavidade de injeção das esferas.
- 2- Extrusão do perfil de Al
- 3- Injeção das esferas de POM e PA6
- 4- Corte das placas de Al
- 5- Avaliação da rugosidade das placas de Al
- 6- Ensaio de desgaste no tribômetro com a modalidade *ball-on-plate*
- 7- Obtenção do coeficiente de atrito do material POM e PA6.
- 8- Captura de imagens por interferometria óptica do desgaste das esferas.
- 9- Fabricação dos rodízios com material POM e PA6 para o teste de laboratório
- 10- Teste de durabilidade prático em bancada de laboratório
- 11- Captura de imagens com microscópio óptico
- 12- Avaliação do desgaste e dos resultados

4.1 PERFILÔMETRO

O perfilômetro foi utilizado para avaliação da rugosidade das amostras das placas de Al que foram utilizadas no teste *ball-on-plate*. Foi usado um perfilômetro de contato (CETR-PRO5003D – CETR) localizado no laboratório LAPEC da UFRGS, Figura 29, para determinar a rugosidade superficial do substrato por medidas de perfilometria. Cinco medidas por amostra foram registradas para determinar a rugosidade média (R_a), que corresponde à quantificação dos desvios verticais de uma superfície real de uma superfície ideal; a rugosidade pico a pico (R_y), associada à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais baixo, e a rugosidade R_z , que corresponde à média dos valores absolutos dos 5 picos mais altos e dos 5 vales mais baixos.

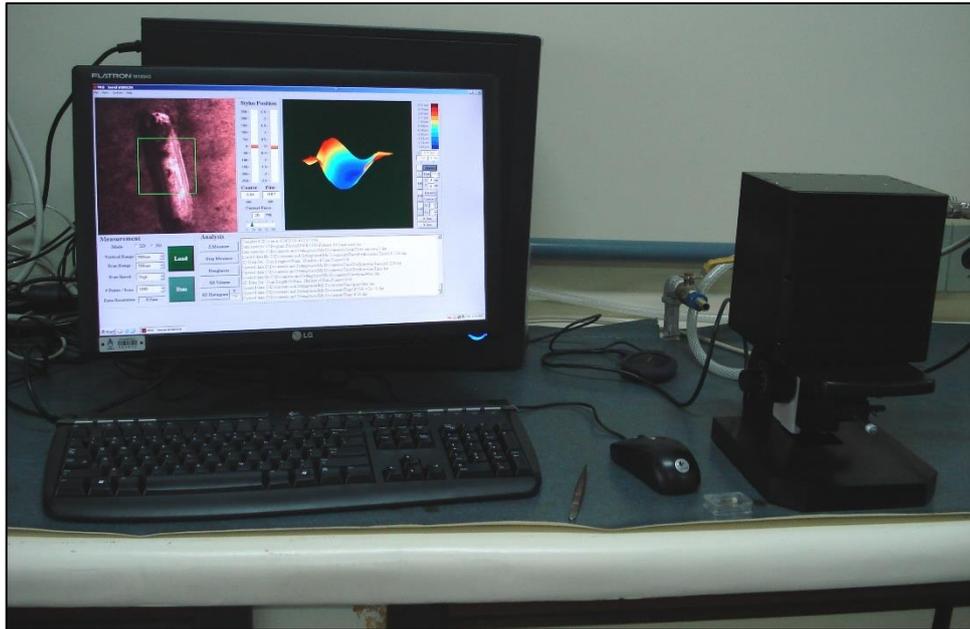


Figura 29 – Perfilômetro utilizado neste trabalho.

4.2 MÁQUINA INJETORA DE PLÁSTICO

A injetora utilizada na injeção das amostras foi o modelo Romi P130. A mesma é representada na Figura 30.

Informações técnicas		
Força de fechamento:	130	ton
Curso máximo abertura:	420	mm
Volume max. Injeção:	326	cm ³
Pressão máx. injeção:	175	bar
Diâmetro máx. do bico:	22	mm
Tamanho mín. do molde:	300x300	mm
Tamanho máx. do molde:	640x420	mm
Força de extração:	3,5	ton
Razão de injeção:	117	cm/s
Peso máximo de injeção:	306	g
Curso máx. injeção:	205	mm

Figura 30 – Injetora utilizada para fabricação das esferas

Os parâmetros utilizados para a fabricação das amostras injetadas estão descritos na Tabela 5, os parâmetros são originados da folha de especificação indicada pelo fabricante Petropol.

Parametos Injeção		
Maquina de injeção Plástica	POM	PA6 (Nylon) 20% fibra vidro
Temp. molde - (°C)	220	285
Velo.injeção - (m/s)	80	60
Pressão de fechamento - (Ton)	90	80
Tempo de inje. - (s)	3,5	4
Recalque. - (Ton)	80	90

Tabela 5 – Parâmetros de injeção para fabricação das amostras.

4.3 MOLDE DE INJEÇÃO

A injeção das peças foi realizada com um molde em escala real de produção, ou seja, este molde possui dimensões e capacidade produtiva real de produção. A Figura 31 apresenta o molde utilizado na injeção das esferas dos polímeros empregados no ensaio de desgaste no tribômetro.

As esferas utilizadas nos ensaios foram obtidas pelo processo de injeção descrito no capítulo 3.6.



Figura 31 – Molde utilizado para injeção das esferas dos polímeros utilizadas no ensaio de desgaste *ball-on-plate*.

4.4 FABRICAÇÃO DOS PERFIS DE Al E ESFERAS (POM E PA6 20% FIBRA DE VIDRO)

A fabricação das amostras teve como principal objetivo manter o máximo de relação com as peças do teste de laboratório os quais serão analisadas no comparativo entre as amostras do capítulo dos resultados, ou seja, as mesmas máquinas injetoras e o mesmo material foram usados para as amostras.

O perfil de alumínio utilizado no ensaio de desgaste *ball-on-plate* possui a mesma liga Al 6063 com tempera T5 do perfil que foi utilizado no teste prático de deslizamento em laboratório. A amostra utilizada no ensaio de desgaste *ball-on-plate* foi removida de um trilho, portanto possui exatamente a mesma composição e característica da superfície.

A esfera de POM e PA6 20% fibra de vidro foi fabricada por meio de um molde de injeção, com o mesmo padrão do molde que injetou os rodízios do teste de durabilidade, devido ao tamanho ser de dimensões extremamente reduzidas exclui-se qualquer tipo de falha de injeção como bolhas e rechupes na esfera. As peças do teste foram fabricadas com parâmetros de máquina de injeção similares aos dos produtos testados no teste prático, utilizando exatamente os mesmos materiais das peças utilizadas no teste prático, portanto pode-se dizer as peças utilizadas no teste prático e as esferas utilizados no ensaio de desgaste *ball-on-plate* possuem materiais e processos idênticos.

4.5 ENSAIO DE DESGASTE

O objetivo principal já mencionado anteriormente é a comparação entre o comportamento em desgaste dos materiais POM e PA6 20% fibra de vidro utilizando contra uma superfície da liga de Al 6063 T5, empregando um tribômetro na configuração *ball-on-plate*. Além disso também será avaliado o desgaste em escala de bancada sob trilho (teste funcional) empregando-se roda composta pelos materiais poliméricos citados sobre um perfil de Al 6063 T5.

4.5.1 Ensaio de desgaste em tribômetro na configuração *ball-on-plate*

O Tribômetro é um equipamento destinado a obtenção do coeficiente de atrito entre dois materiais. O Tribômetro utilizado nos ensaios possui marca CETR, disponível no Laboratório de Ensaio de Corrosão (LAPEC), UFRGS Campus do Vale.

Os parâmetros utilizados e que serão apresentados de forma detalhada no decorrer do trabalho são: Carga de 1 N, 3 N, 5 N e 8 N com percurso de 20 mm de trilha em 30 min.

A Figura 32 apresenta o equipamento utilizado.



Figura 32 – Tribômetro utilizado neste trabalho.

O ensaio de desgaste em tribômetro na configuração *ball-on-plate* teve como objetivo principal a obtenção do coeficiente de atrito do par tribológico POM e PA6 fibra de vidro com a liga de Al 6063 T5. O teste constituiu-se da fixação de uma placa quadrada de Al 6063 T5 de 30 mm x 30 mm x 1 mm fixada ao tribômetro, a esfera de diâmetro 5mm foi adequadamente fixa ao suporte na parte central do tribômetro. O equipamento possui um processo de referenciamento e ajuste automático, onde o suporte da esfera se desloca automaticamente no eixo "Z" até encontrar o corpo de prova. O teste constituiu-se da movimentação da placa de Al 6063 T5, no eixo "X", estando em contato com a esfera, o teste foi realizado com uma frequência de 1Hz por um percurso de 20 mm por 30 min, a carga utilizada teve a variação conforme será descrito posteriormente. A Figura 33 apresenta a placa quadrada de Al 6063 T5.

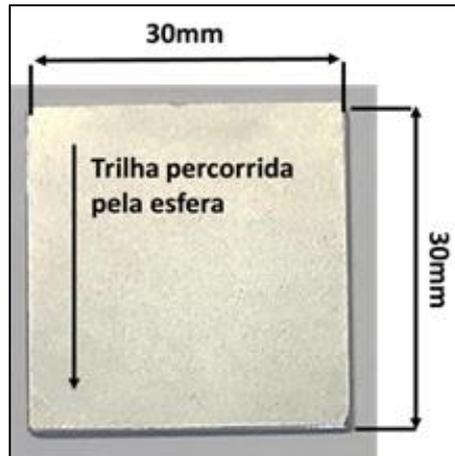


Figura 33 – Placa quadrada de Al 6063 T5, utilizada no ensaio de desgaste *ball-on-plate* para teste com as esferas de POM e PA6 20% fibra de vidro.

Para o teste do par tribológico, teve como parâmetro de variação a carga verticalmente aplicada pelo equipamento na esfera. Foram utilizadas as cargas máximas disponíveis no equipamento, sendo 1N, 3N, 5N e 8N, para cada carga foram realizados 3 testes. A Figura 34 apresenta o teste *ball-on-plate*, a figura apresenta um detalhe com aumento para visualizar a região de contato da esfera com a placa de Al 6063 T5.

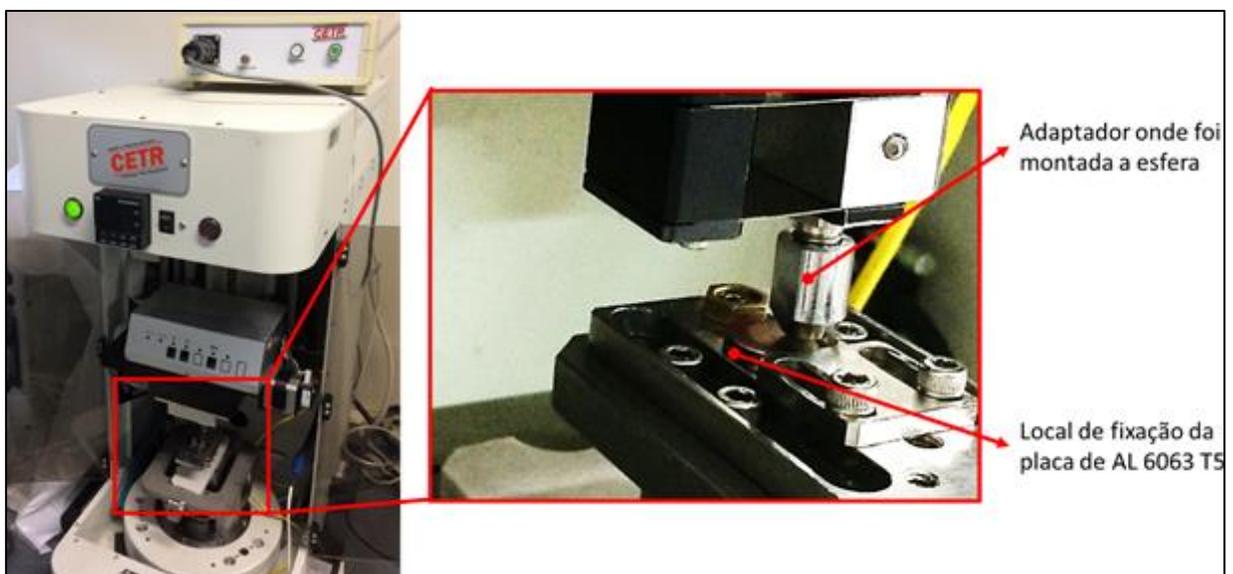


Figura 34 – Modo que os testes foram realizados no tribômetro configuração *ball-on-plate*.

4.5.2 Teste funcional

O teste funcional representa a aplicação real de uma roda com diâmetro de 25 mm e espessura de 5 mm composta por amostras dos dois materiais a serem analisados, POM e PA6

20% fibra de vidro, neste teste considera-se o deslizamento de duas rodas fixas em uma porta de MDF sobre um trilho de Al 6063 T5.

O teste tem como objetivo percorrer uma distância padrão de 1 m, variando-se a carga adicionada à porta de MDF. A porta é movimentada por meio de um cilindro pneumático que é acionado por sensores nas extremidades da medida de 1 m, o cilindro percorre o trajeto com velocidade de 0,2 a 0,25 m.s⁻¹, controlada por uma controladora. Para o teste deste trabalho as rodas foram fixadas em uma porta de material MDF por meio de parafusos adequados para madeira, nesta porta as cargas são fixadas por meio de parafusos, conforme a Figura 35. Foram utilizadas as cargas de 20, 30 e 40 kg, sendo 4 amostras para cada carga, foram realizados 15.000 ciclos dentro do trajeto e especificado, considera-se 1 ciclo o percurso de ida e volta até o acionamento de 1 sensor. No teste ficam excluídas situações como sobrecarga, variação da velocidade, deslocamento da peça parafusada na porta e na Figura 36 é representado um esquema de funcionamento da porta, onde apresenta-se o deslizamento da porta para a esquerda e direita limitando-se pelos sensores que acionam o cilindro pneumático.

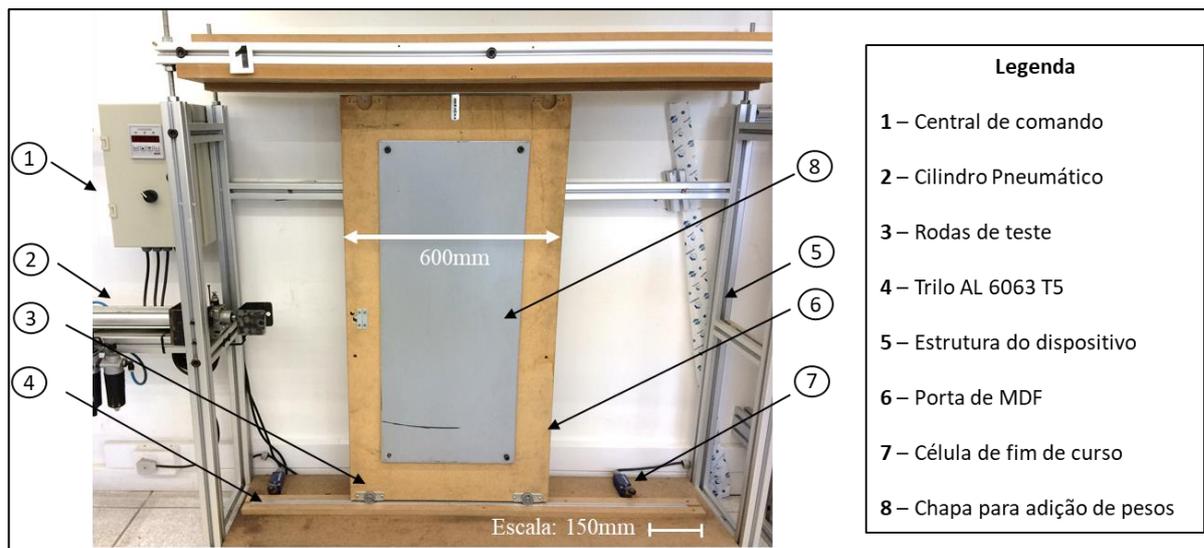


Figura 35 – Estrutura onde foram realizados os testes de durabilidade.

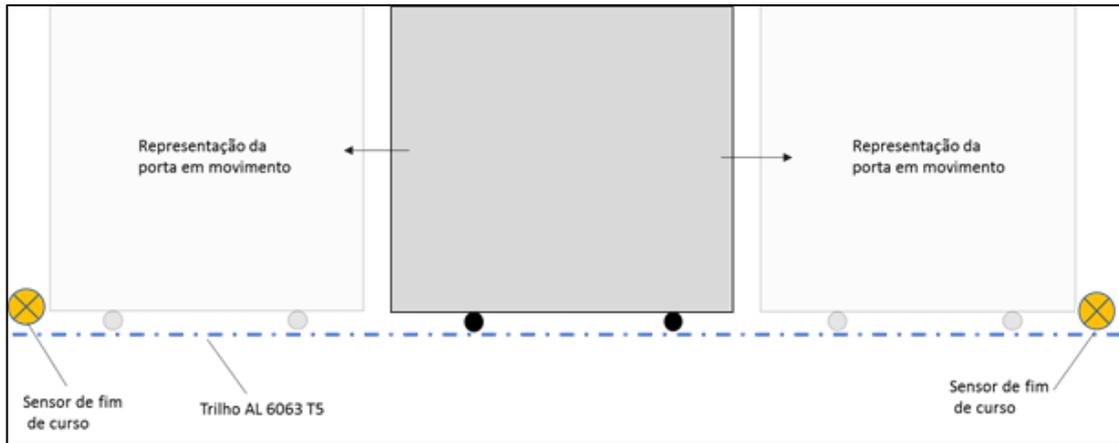


Figura 36 – Representação do funcionamento do teste de bancada sob trilho.

O teste de bancada foi desenvolvido com as amostras descritas na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 – Teste de ciclagem para o PA6 20% fibra de vidro.

Teste de ciclagem 15.000 ciclos - NYLON	
ID.:	Peso da porta (kg):
A1	40
A2	40
B1	40
B2	40
C1	30
C2	30
D1	30
D2	30
E1	20
E2	20
F1	20
F2	20

Tabela 7 – Teste de ciclagem para o POM.

Teste de ciclagem 15.000 ciclos - POM	
ID.:	Peso da porta (kg):
A1	20
A2	20
B1	20
B2	20
C1	30
C2	30
D1	30
D2	30
E1	40
E2	40
F1	40
F2	40

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliação dos resultados com base no comparativo entre os resultados obtidos para o desgaste realizado no tribômetro e no teste funcional, inicialmente serão apresentados os resultados obtidos para o desgaste realizado no tribômetro, em seguida o resultado do teste funcional e após uma comparação.

5.1 ENSAIO DE DESGASTE REALIZADO NO TRIBÔMETRO

O teste de laboratório possui algumas limitações em função da carga máxima disponível no tribômetro ser de 8 N, comparada a carga mínima aplicada em um rodízio do teste de bancada ser de aproximadamente 98 N. Esta limitação não reduz a validade dos resultados, mas foi mencionada para fins de registro e comparação. O teste ensaio de desgaste *ball-on-plate* teve como principal objetivo a avaliação do coeficiente entre os materiais POM e PA6 20% fibra de vidro. Para o desenvolvimento do trabalho foram realizadas 3 amostras de cada carga para ambos materiais.

A Figura 37 apresenta imagem dos componentes antes do teste. Sendo que na Figura 38 está sendo mostrado o perfil de rugosidade da placa de Al 6035 – T5.

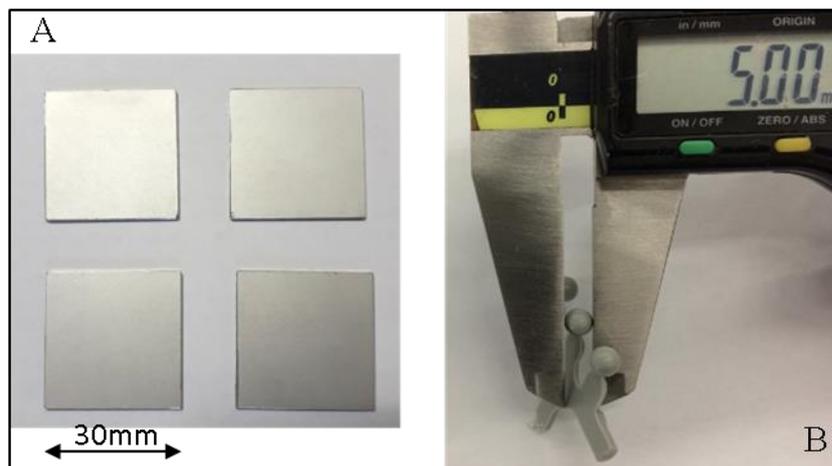


Figura 37 – Imagem (A) representa as placas de Al e a imagem (B), representa a esfera utilizada no ensaio de desgaste *ball-on-plate*.

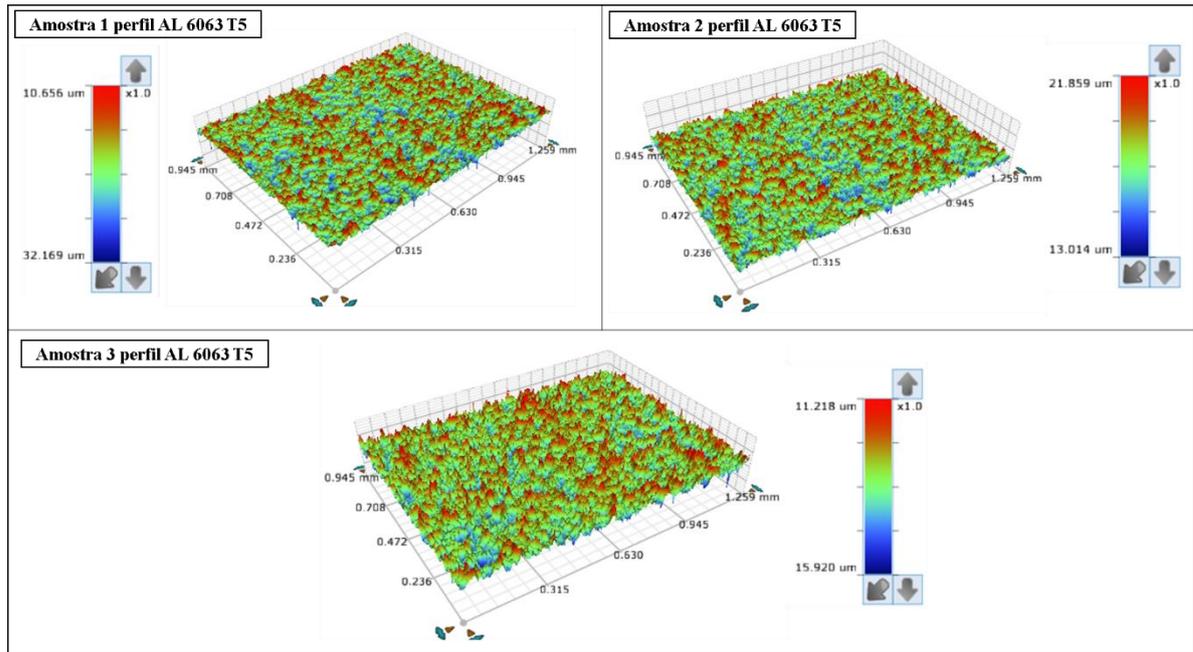


Figura 38 – Imagem obtida por perfilometria de contato no perfilômetro CETR-PRO5003D, apresenta a topografia da superfície da placa de Al 6035 – T5, antes do teste do ensaio de desgaste ball-on-plate.

A rugosidade das amostras da Figura 38 foi obtida através de um perfilômetro, os valores obtidos se referem a aproximação matemática do *software* do equipamento. Os valores apresentados na Tabela 8 foram obtidos na parte central da peça.

Tabela 8 – Valores de rugosidade obtidos pelo perfilômetro da placa de Al 6063 – T5, antes do ensaio de desgaste ball-on-plate.

Perfilômetro CETR-PRO5003D		
Experimento	Rz	Ra
1 (a)		
Rmédia	6,17	0,98
Desvio	2,73	0,44
Experimento	Rz	Ra
1 (b)		
Rmédia	7,35	1,11
Desvio	0,30	0,09
Experimento	Rz	Ra
1 (c)		
Rmédia	7,51	1,05
Desvio	0,70	0,06
Unidades em μm		

5.1.1 Resultados de desgaste para o PA6 20% fibra de vidro

A Figura 39 apresenta os gráficos do coeficiente de atrito (μ) em função da distância percorrida (mm) para a amostra de PA6 com 20% fibra de vidro realizado no tribômetro na configuração *ball-on-plate*.

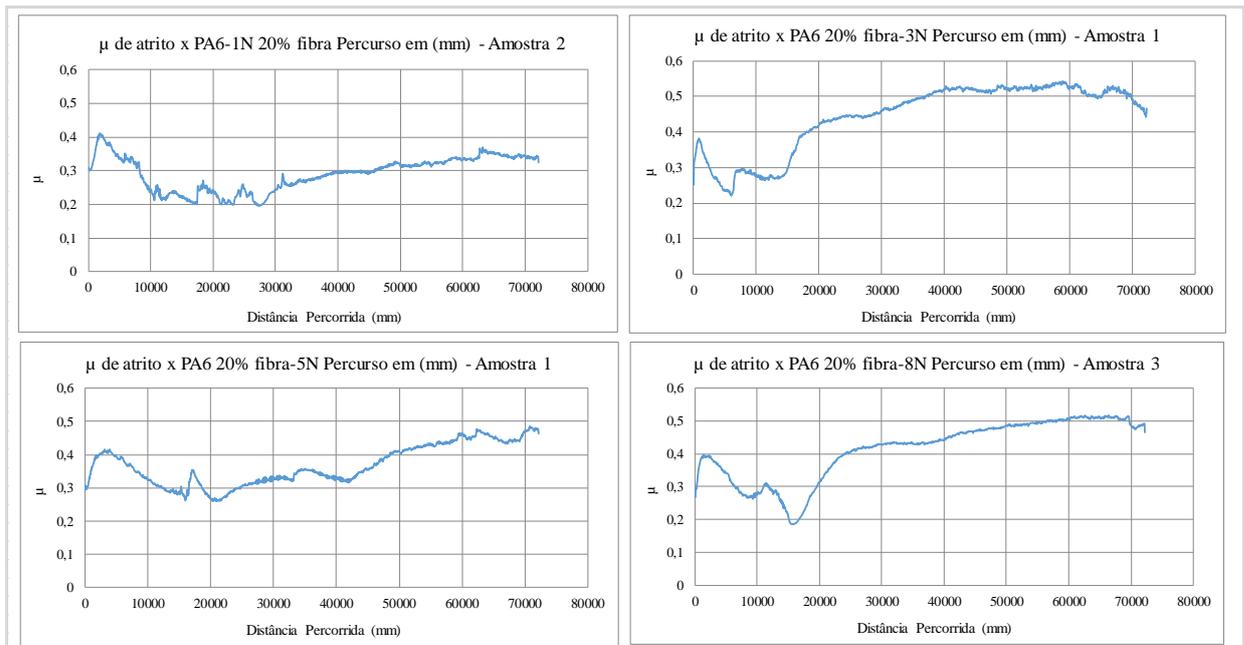


Figura 39 – Coeficiente de atrito (μ) das amostras avaliadas com carga de 1, 3, 5 e 8N para o material PA6 20% fibra de vidro.

A partir da Figura 39 é possível observar que a esfera passa por um acréscimo superior do valor do μ e após ocorre um decréscimo aproximadamente em 2000mm de percurso, onde durante o teste se observa novamente um pequeno aumento do valor do μ , esta situação pode ser explicada por inúmeros fatores, dentre eles podemos citar a atuação dos mecanismos de desgaste, onde na parte inicial do teste além da acomodação da esfera é onde os mecanismos de desgaste começam a atuar, podendo ter o acúmulo de pequenas partículas removidas do material da esfera soltando-se e aderindo-se a superfície de Al, neste momento o par tribológico possui significativa variação que se reflete no μ .

A Figura 40 apresenta as imagens de interferometria das esferas após o teste no tribômetro.

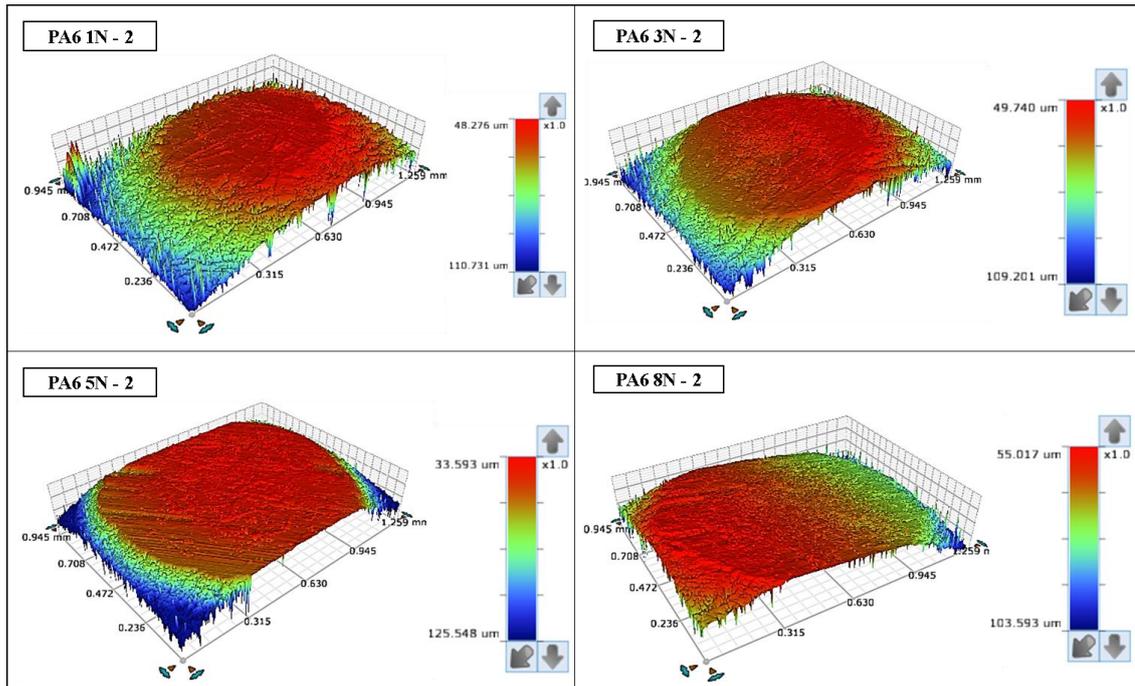


Figura 40 – Imagem obtidas por interferometria do desgaste da superfície das esferas de PA6 20% fibra de vidro (para as cargas de 1, 3, 5, e 8N).

Um fator que pode ter interferência na variação do μ é o desgaste da esfera e a consequente diminuição da área de contato, ou seja, a área inicial (em mm^2) é menor que a final, ocasionado uma redução na σ (tensão) na área de contato entre a esfera e a placa de Al.

Comparando-se a carga e a pressão da máxima de contato da Tabela 9, com o valor do limite de escoamento do material que é aproximadamente 80 MPa fica evidente a magnitude elevada da tensão que ultrapassou mais de 1000 vezes o limite de resistência do material. É possível assumir que a carga de 1 N provoca ruptura e remoção do material na região de contato, o que se comprova pelo desgaste e pelas imagens. A face desgastada é facilmente visível pela Figura 40 e Figura 41, bem como, a presença das fibras no material.

A Tabela 9 apresenta a equação de Hertz para a pressão máxima de contato entre a esfera e a placa de Al, a equação de Hertz está descrita no capítulo 3.1.1.

Tabela 9 – Pressão máxima de contato entre a esfera de PA6 20% fibra de vidro e a placa de Al, de acordo com a equação de Hertz, para cargas de 1, 3, 5 e 8N.

PA6	Força tribômetro	Pmax - GPa
	1N	11,71
	3N	16,94
	5N	20,67
	8N	23,51

A Tabela 10 apresenta a variação de volume da esfera, esta variação é obtida através da Equação (6) da norma G133 [49] descrita no item 2.1.3.

Tabela 10 – V_p , perda de volume para a esfera PA6 20% fibra de vidro de acordo com a equação de Hertz, para carga de 1, 3, 5 e 8N, considerando a média de esferas.

PA6	$V_p(\text{mm}^3)$	Desvio Padrão
1 N	0,0013	0,007
3 N	0,0130	0,001
5 N	0,0261	0,005
8 N	0,0314	0,006

Conforme pode-se observar na Figura 41, com o material PA6 20% fibra de vidro é visível a região da superfície desgastada e a presença das fibras na composição do material, observa-se que a orientação das fibras é aleatória pois devido a geometria e dimensão bem como a composição onde durante o processo de injeção e devido a geometria da peça ocorre a quebra das fibras no momento de entrada na peça. É possível obter fibras longas bem como alinhar as fibras melhorando as propriedades mecânicas em casos específicos. As imagens do microscópio óptico da Figura 41 representam a média do desgaste das três esferas de cada carga.

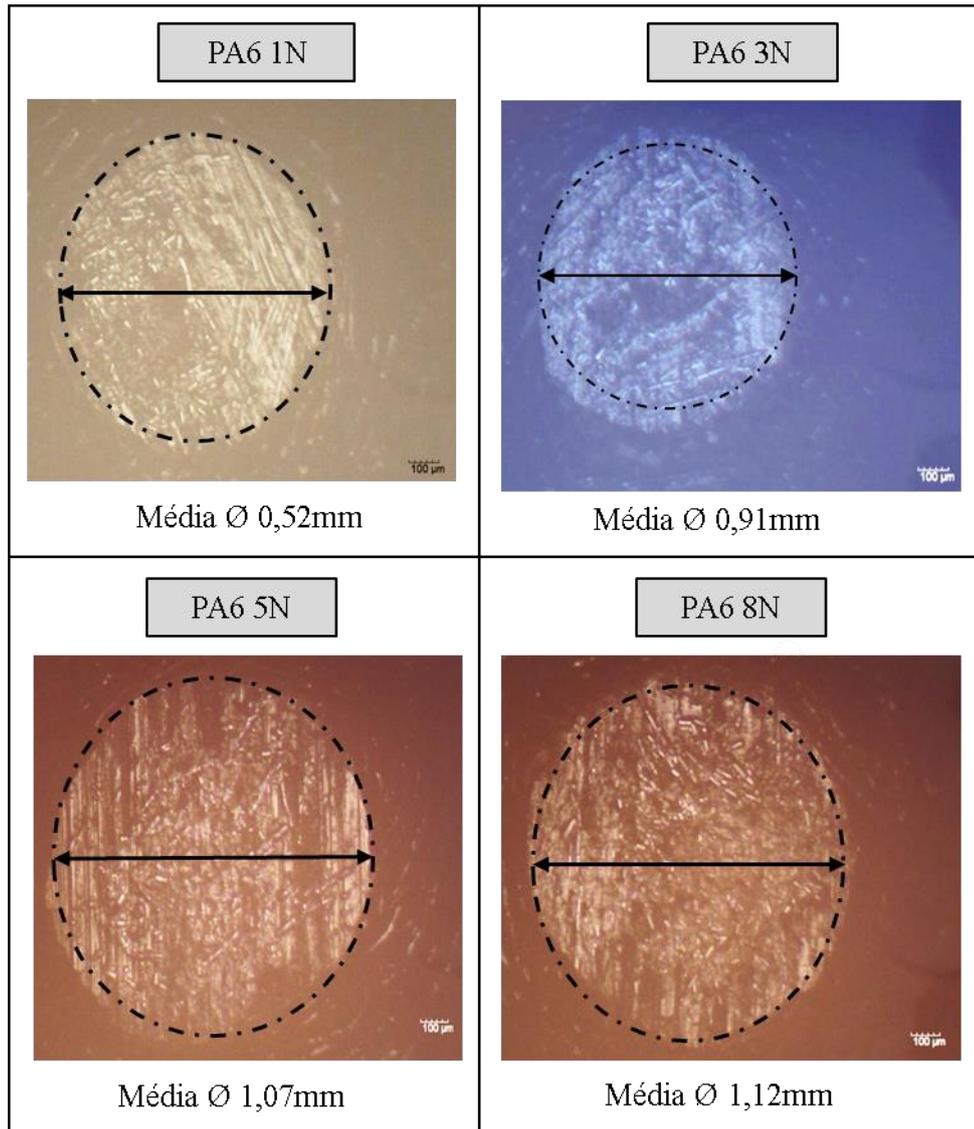


Figura 41 – Imagem obtida por microscopia óptica da região de desgaste esferas PA6 20% fibra de vidro (ensaio de desgaste no tribômetro a configuração *ball-on-plate*, cargas 1, 3, 5, e 8N).

A Tabela 11 apresenta a média e o desvio padrão do diâmetro de desgaste de todas as esferas para o teste *ball-on-plate* do material PA6 20% fibra de vidro. Para a obtenção dos valores foi utilizado o software de desenho 2D *Draftsight* onde pela escala contida em cada imagem foi desenhada um círculo simulando a região de desgaste, conforme representação na Figura 41.

Tabela 11 – Média e desvio padrão para o diâmetro da região de desgaste da esfera de PA6 20% fibra de vidro para o teste ball-on-plate.

PA6					
	Amostra	Ø da região de desgaste			
1 N	1.1	0,311	}	Media	0,520
	1.2	0,942		Desvio Padrão	0,298
	1.3	0,308			
3 N	3.1	0,913	}	Media	0,908
	3.2	0,881		Desvio Padrão	0,020
	3.3	0,930			
5 N	5.1	1,022	}	Media	1,077
	5.2	1,144		Desvio Padrão	0,051
	5.3	1,064			
8 N	8.1	1,066	}	Media	1,127
	8.2	1,126		Desvio Padrão	0,050
	8.3	1,188			

5.1.2 Resultados para o Poliacetal (POM)

A Figura 42 apresenta os gráficos do coeficiente de atrito em função do percurso em (mm) para a amostra de POM realizado no tribômetro na configuração *ball-on-plate*.

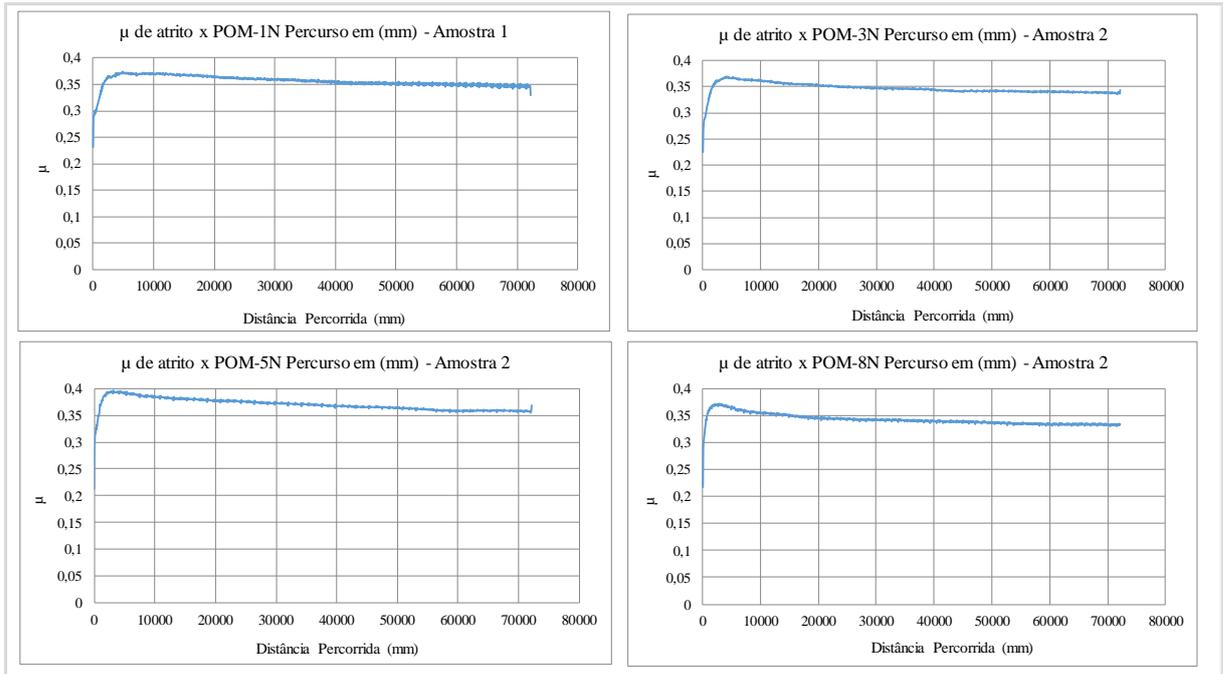


Figura 42 – Coeficiente de atrito (μ) das amostras avaliadas com carga de 1, 3, 5 e 8N para o material POM.

A partir da Figura 42 é possível observar que a esfera ao iniciar o teste apresenta um valor de μ superior e que em seguida este valor diminui para uma região estável, esta situação pode ser explicada por inúmeros fatores, dentre eles podemos citar a atuação dos mecanismos de desgaste, onde na parte inicial do teste além da acomodação da esfera é onde os mecanismos de desgaste começam a atuar, podendo ter o acúmulo de pequenas partículas removidas do material da esfera soltando-se e aderindo-se a superfície de Al.

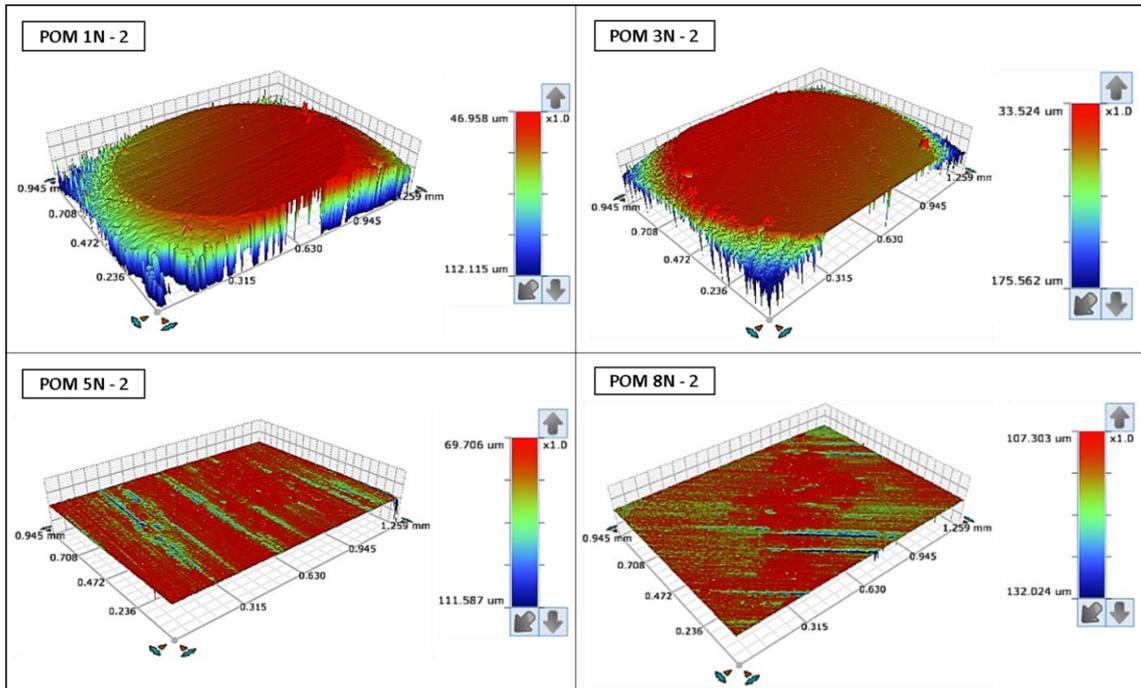


Figura 43 – Imagem obtida por interferometria do desgaste da superfície das esferas de POM (para as cargas de 1, 3, 5, e 8N).

Um fator que pode ter interferência na variação do μ é o desgaste da esfera e a consequente diminuição da área de contato, ou seja, a área inicial (em mm^2) é menor que a final, ocasionado uma redução na σ (tensão) na área de contato entre a esfera e a placa de Al. A Tabela 12 apresenta a variação de volume V_p da esfera, esta variação é obtida através da Equação (6) da norma G133 [49] descrita no item 2.1.3.

O comportamento do gráfico de desgaste mostra-se nitidamente estável ao longo do teste, e se repete com similaridade entre as amostras, este comportamento representa a característica do material POM onde pela sua composição apresenta uma característica de contato com deslizamento suave e menos agressivo do que materiais com fibra em sua estrutura.

Tabela 12 – V_p , perda de volume para a esfera de POM de acordo com a equação de Hertz, com carga de 1 N, considerando a média das esferas.

POM	$V_p(\text{mm}^3)$	Desvio Padrão
1 N	0,0207	0,002
3 N	0,0314	0,003
5 N	0,1475	0,026
8 N	0,1968	0,045

Tabela 13 – Pressão máxima de contato entre a esfera de POM e a placa de Al, de acordo com a equação de Hertz, para carga de 1N.

POM	Força tribômetro	Pmax - GPa
	1N	6,91
	3N	9,99
	5N	12,19
	8N	13,87

Comparando-se o valor e a pressão da máxima de contato da Tabela 13 com o valor do limite de escoamento do material que é aproximadamente 60 MPa fica evidente a magnitude elevada da tensão que ultrapassou mais de 1000 vezes o limite de resistência do material. É possível assumir que a carga de 1 N provoca o arrancamento e ruptura do material na região de contato, o que se comprova pelo desgaste e pelas imagens. A partir da Figura 44 é possível observar a esfera após ensaio de desgaste. A face desgastada é facilmente visível, mas com uma aparência nitidamente diferente da amostra de POM, onde nesta amostra é possível visualizar o aspecto superficial similar a camadas.

De acordo com a Figura 43, o material POM é visível a diferença da superfície desgastada. Considerando a mesma região da imagem do interferômetro em uma imagem de microscópio óptico a Figura 44 apresenta a média de todas as amostras para cada carga do material POM.

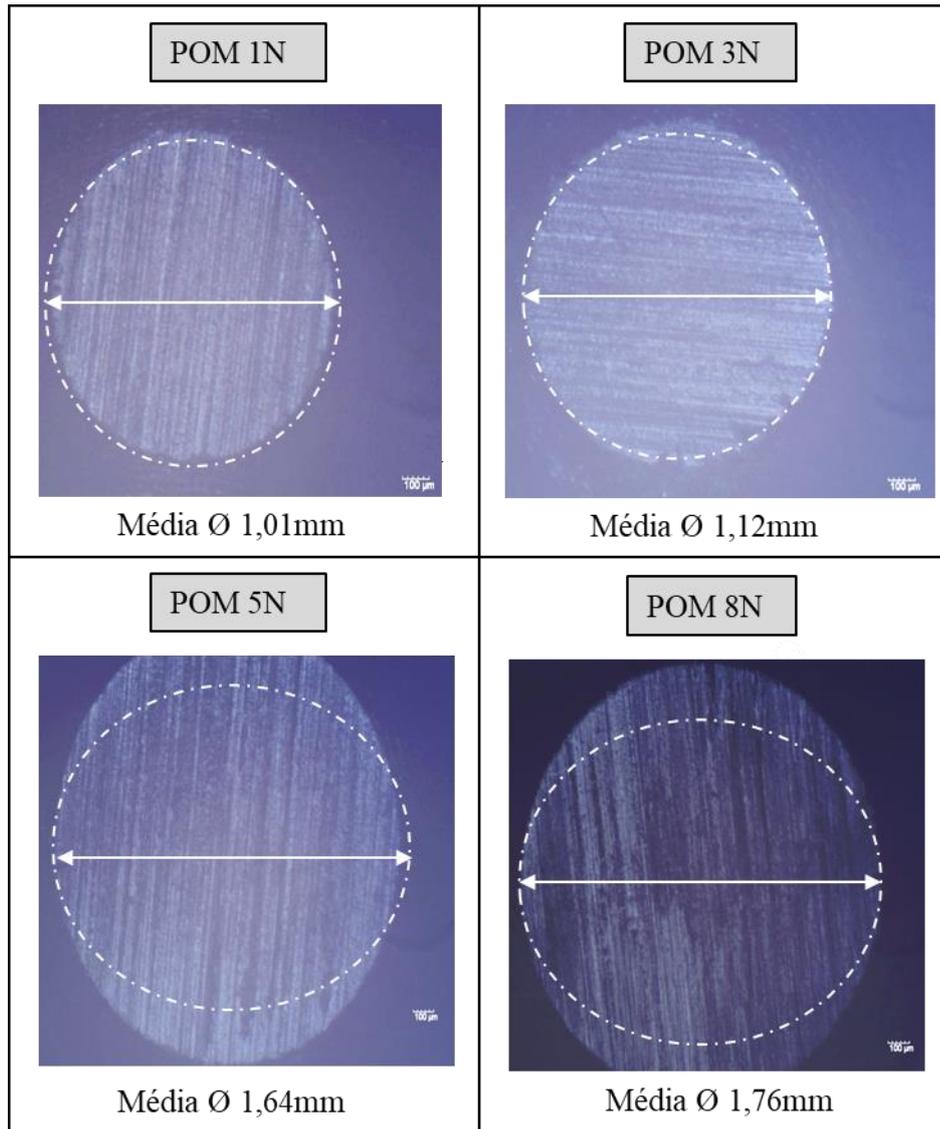


Figura 44 – Imagem da região de desgaste das esferas do material POM para o teste *ball-on-plate*, cargas 1, 3, 5, e 8N.

A Tabela 14 apresenta a média e o desvio padrão do diâmetro de desgaste de todas as esferas para o teste *ball-on-plate* do material POM. Para a obtenção dos valores foi utilizado o software de desenho 2D *Draftsight* onde pela escala contida em cada imagem foi desenhada um círculo simulando a região de desgaste, conforme representação na Figura 44, o regime de desgaste observado na amostra para as cargas de 5 e 8N não apresenta um crescimento proporcional as cargas, o que pode-se admitir que para apresentar deformações superiores precisa-se empregar o uso de cargas elevadas que não estão disponíveis no equipamento utilizado neste trabalho.

Tabela 14 – Média e desvio padrão para o diâmetro da região de desgaste da esfera de POM para o teste *ball-on-plate*.

POM					
	Amostra	Ø da região de desgaste			
1 N	1.1	1,055	}	Media	1,021
	1.2	0,990		Desvio Padrão	0,027
	1.3	1,016			
3 N	3.1	1,121	}	Media	1,113
	3.2	1,142		Desvio Padrão	0,027
	3.3	1,076			
5 N	5.1	1,715	}	Media	1,644
	5.2	1,671		Desvio Padrão	0,072
	5.3	1,546			
8 N	8.1	1,743	}	Media	1,769
	8.2	1,664		Desvio Padrão	0,097
	8.3	1,899			

5.1.3 Comparativo dos resultados ensaio de desgaste *ball-on-plate*

O teste *ball-on-plate* torna possível observar a diferença de comportamento entre os materiais de uma forma detalhada e específica, na Figura 45 apresenta-se o diâmetro da região de desgaste para a média de todas as amostras e cargas utilizadas no trabalho, para o valor da média e desvio padrão de cada amostra pode-se consultar a Tabela 11 e a Tabela 14.

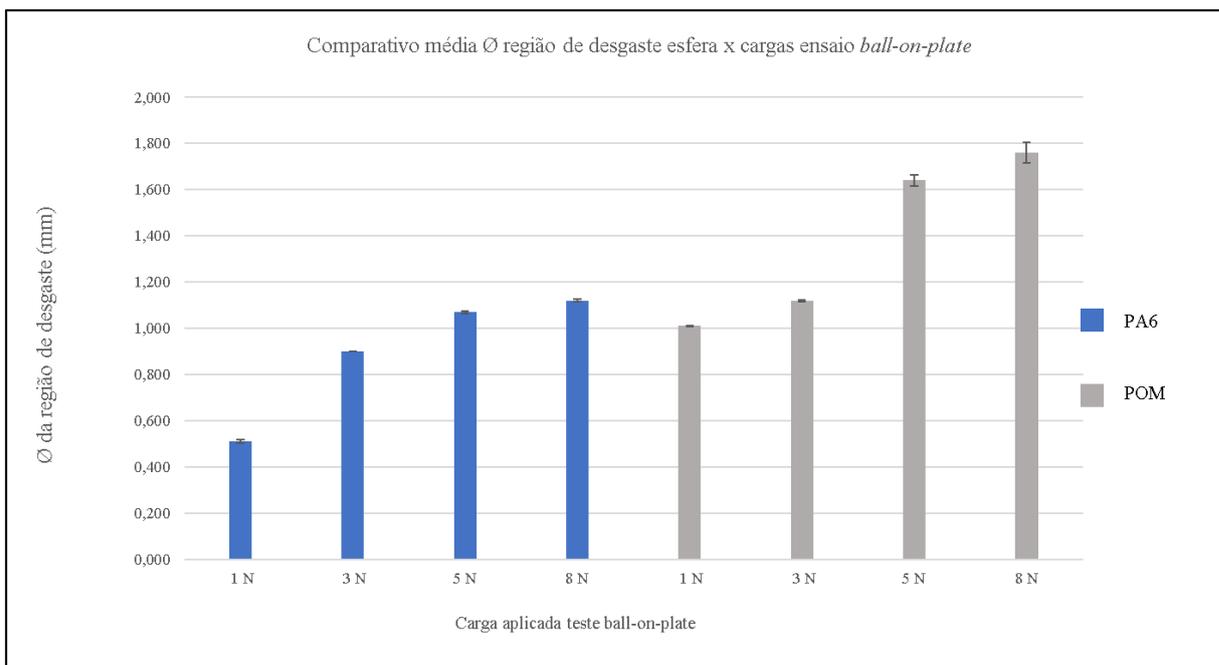


Figura 45 – Comparativo entre a média do diâmetro da região de desgaste das esferas PA6 20% fibra de vidro e POM para o teste *ball-on-plate*.

O POM possui propriedades mecânicas inferiores ao PA6 20% fibra de vidro, mas também possui uma propriedade de interesse em algumas aplicações que de acordo com o fabricante Petropol é o μ reduzido tendo um valor final na ordem de 0,35 em comparação ao PA6 com μ 0,5, característica que se faz presente pela propriedade auto lubrificante do POM. Mesmo com o μ diminuído observou-se para o POM, o aumento da área desgastada (diâmetros da região de desgaste), bem como do volume desgastado, comparativamente ao PA6 20% fibra de vidro, para todas as cargas aplicadas, isso se deve as propriedades mecânicas superiores do PA6 com a presença de fibras.

De acordo com Silva et al. [50], em um ensaio pino disco, onde o pino era de POM e o disco de Al_2O_3 e Aço Duplex, o par POM e Al_2O_3 teve um desgaste significativamente maior, o que o autor comenta como uma tendência da combinação entre o Al_2O_3 e o POM.

O PA6 20% fibra de vidro por sua vez possui propriedades mecânicas superiores ao POM, apresentando desgaste menor em todas as cargas de aplicação na Figura 45 é possível observar o comparativo das placas de Al após o teste.

Analisando-se as esferas é possível observar a diferença da superfície desgastada. A superfície de POM apresenta uma característica mais uniforme, suavizada e alinhada na região de desgaste. A superfície da esfera de PA6 20% fibra de vidro por sua vez apresenta um aspecto rugoso e imperfeito, característico da presença de fibras no material de acordo com a Figura 46.

De acordo com Lucian Capitanu [9] as fibras desgastadas presentes na superfície podem tornar o material mais abrasivo.

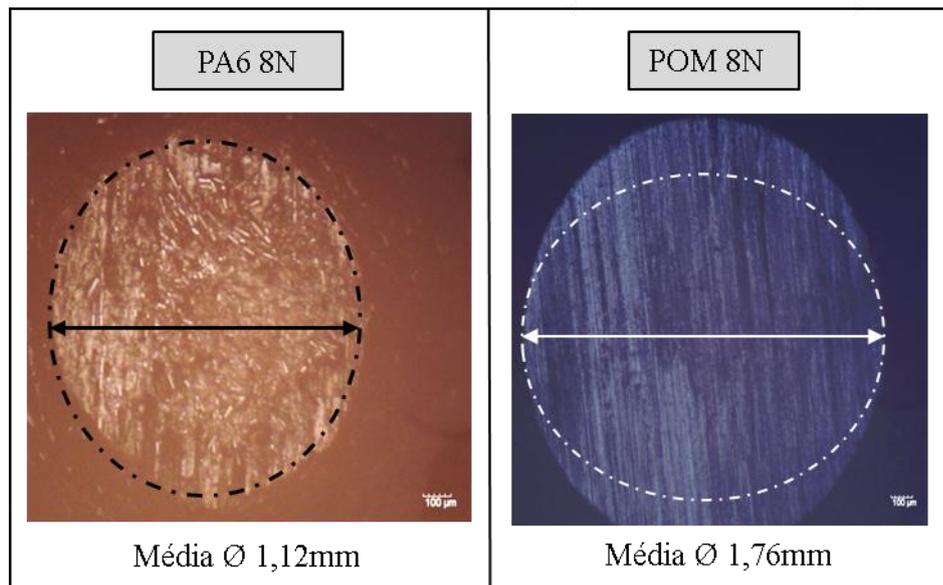


Figura 46 – Imagens obtidas por microscopia óptica da superfície da esfera desgastada para o PA6 20% fibra de vidro e o POM, carga de 8 N.

O cálculo de Hertz para P_{max} descrito na Figura 47, apresenta os valores da pressão de contato para todas as cargas e materiais do ensaio de desgaste *ball-on-plate*. Analisando-se os valores da P_{max} , conforme descrito anteriormente, ultrapassam aproximadamente 1000 vezes o valor de escoamento de cada material, situação que representa uma área pontual no contato entre os dois corpos, onde devido a magnitude deste valor fica evidente que ocorrerá desgaste nesta região. O cálculo de Hertz utiliza o módulo de elasticidade do material, por esse fator, quanto maior for o módulo de elasticidade, ou seja, quanto maior for a resistência do material maior será o valor da P_{max} de contato sob uma determinada carga.

Durante o teste *ball-on-plate* o PA6 20% fibra de vidro comportou-se de uma forma oposta ao material POM, ocorrendo picos e vales acentuados e um perfil instável de μ , além da tendência de aumento do μ no decorrer do teste. Esta situação pode ser explicada em partes, por o que tende a ser desencadeado pela presença das fibras que torna a superfície irregular, mostrado na Figura 46. Pode-se relacionar o comportamento do PA6 20% fibra de vidro a elevada resistência que as ligas que possuem fibras em sua estrutura possuem, estes materiais são mais rígidos e duros em composição ao mesmo material sem fibras ou ainda ao POM. O teste descrito por Unal, Hakann Yetgin e Findik [12] apresenta um decréscimo do μ com o aumento da carga que variou de 50 a 150N, no presente trabalho ocorre uma situação similar no material POM, mas para o PA6 ocorre o inverso, fato que pode ser relacionado a carga de

aplicação não ser suficientemente elevada para proporcionar que o material apresente transformações significativas.

O POM possui um comportamento nitidamente distinto no que diz respeito ao μ , tendo características mais uniformes e lineares, sem picos ou vales, mostrado na Figura 44. Em seu trabalho Nuruzzaman D. M [51] testou alguns polímeros na modalidade pino disco sobre uma superfície de inox 304, em seus testes o PA6 com fibra apresentou o menor coeficiente de atrito dentro da faixa de velocidade de 2 m/s.

O comportamento inicial de ambas amostras pode ter sofrido interferências de acomodações da esfera no suporte.

De acordo com Harsha [52], materiais como PA6 resultam em um desgaste inicial acelerado antes de entrarem em um regime estacionário de desgaste. O autor ainda destaca a complexidade de relacionar uma propriedade mecânica com o desgaste, atualmente existe o consenso que um grupo de propriedades pode auxiliar, mas que o teste ainda é a melhor maneira de avaliação.

O comparativo dos esforços obtidos pela equação de Hertz possui grande importância para a análise do objetivo deste trabalho, pois evidencia as características distintas dos materiais. Figura 47 apresenta as cargas para a P_{max} de contato de Hertz entre os dois materiais. De forma resumida a P_{max} para o material PA6 20% fibra de vidro é aproximadamente 70% maior em todas as cargas comparada ao material POM.

A avaliação da P_{max} apresenta a região de contato e de carregamento estático para uma situação de um corpo esférico sofrendo uma carga axial sob um plano reto, esta situação e a equação de Hertz estão descritas no item 2.1.2. O valor da pressão máxima de contato não tem uma relação direta com os demais testes de trabalho, portanto ele é uma informação adicional para completar a análise de desgaste e não será comparada diretamente com os resultados de μ .

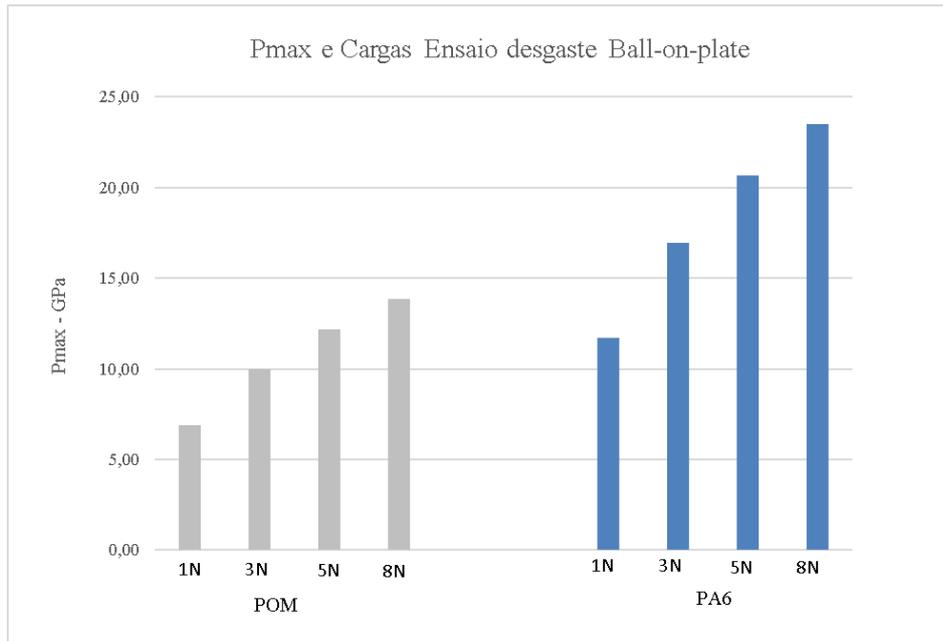


Figura 47 – Comparativo da P_{max} de contato de Hertz para POM e PA6 20% fibra de vidro

A norma ASTM G133 – 05 [49], apresenta um cálculo para o volume aproximado de material removido da esfera durante o ensaio de desgaste *ball-on-plate*. A Figura 48 apresenta o comparativo. O valor considerado para o cálculo de material removido considera o diâmetro obtido pela média das amostras de acordo com a Tabela 11 e Tabela 14.

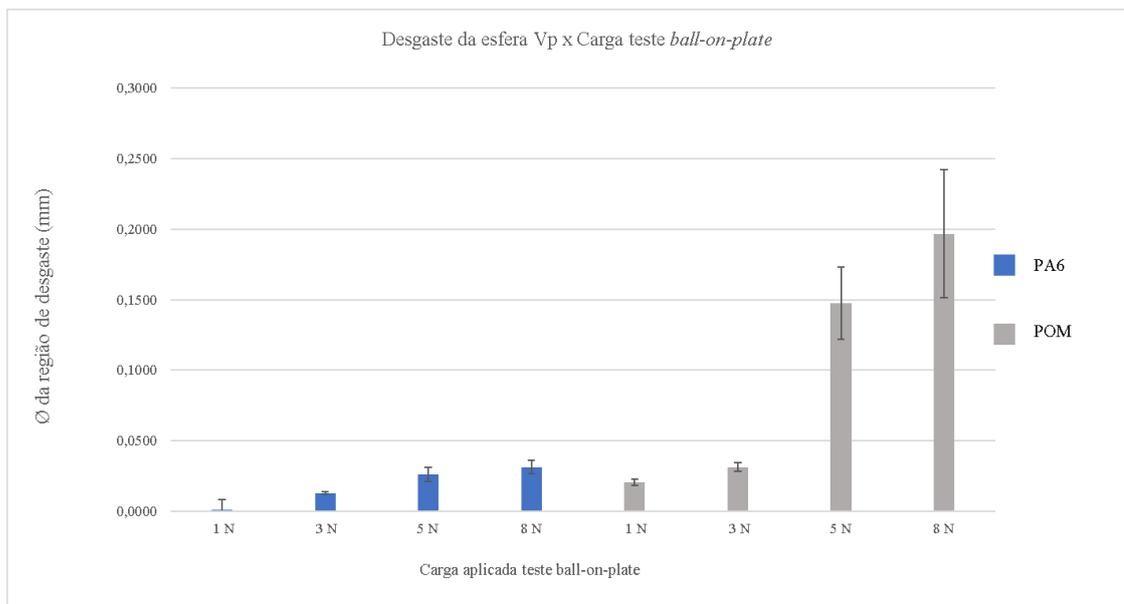


Figura 48 – Comparativo V_p (mm³) entre os materiais POM e PA6 20% fibra de vidro para as cargas de 1, 3, 5 e 8 N.

É possível avaliar que em todas as cargas do ensaio de desgaste *ball-on-plate* o volume de material removido V_p (mm³), de acordo com a Equação (6), para o material POM é superior

ao PA6 20% fibra de vidro, onde para a carga de 8N é aproximadamente 4 vezes superior, esse fator é comprovado pela Figura 48, onde o desgaste aproximado das esferas com uso de um microscópio óptico evidenciou o desgaste superior do material POM, analisando-se a carga de 8 N do material PA6 20% fibra de vidro e POM, o material POM apresentou desgaste da ordem de 43% superior ao PA6 20% fibra de vidro. De acordo com Nuruzzaman D, et al. [51] em seu trabalho conclui-se que a taxa de desgaste aumenta com o aumento da carga para todos os tipos de polímeros testados incluindo PA6 com a presença de fibra.

A relação entre a carga vertical aplicada e a taxa de desgaste envolvem uma série de fatores, em seu trabalho Pieniak, D [53] promoveu um teste modelo pino disco onde corpos de prova de polímero eram testados sobre uma superfície de aço inox, os resultados obtidos mostraram a relação entre carga e desgaste não são constantes e proporcionais, sendo que até valores de 9,81N o coeficiente de atrito está no máximo enquanto a taxa de desgaste era mínima, a partir do aumento da carga para 14,71N o coeficiente de atrito diminuiu e a taxa de desgaste diminuiu com o aumento da temperatura, este fato deve-se a deformação elástica das asperezas devido ao aumento da temperatura. Com um novo aumento da carga para 19,62N o coeficiente de atrito manteve a tendência de diminuir, porém a taxa de desgaste aumentou, fato ligado a fadiga superficial que ocasionou o arrancamento de material da superfície do polímero.

O trabalho de Konovalova O [54] vem de encontro com os conceitos relatados até o momento, o teste realizado é similar ao aplicado no presente trabalho, onde foram testadas amostras de polímeros sobre uma superfície de aço, e que o desgaste por fadiga proporciona o arrancamento de porções de material do polímero, no estudo comenta-se também da dependência da resistência com a relação à temperatura na região de contato.

Considerando-se o estudo realizado por Y. Sahin [55] em seu trabalho foram testadas as combinações do par tribológico aço e POM, neste caso, o teste desenvolvido foi com a modalidade pino-disco e concluiu-se que em situações com cargas menores o desgaste ocorreu por arrancamento de material, enquanto que para cargas maiores o desgaste principal foi aderência e deformação plástica pois em cargas elevadas ocorre um aumento da temperatura superficial.

O trabalho desenvolvido por Lates M [38] com testes pino-disco com um par tribológico de aço e POM, o coeficiente de atrito dos modelos de PA6 testados diminuiram com o aumento da pressão normal e da velocidade.

5.1.4 Resultados do ensaio de desgaste pelo teste funcional

O teste funcional tem como objetivo avaliar o componente rodízio, na aplicação real. O comparativo entre materiais visa obter as características de cada material auxiliando a seleção do material ideal para os mais variados tipos de aplicação.

O teste foi descrito na seção 3.8.2, devido a quantidade de amostras e a duração do teste foram avaliadas as seguintes variações PA6 20% fibra vidro e POM com as cargas de 20, 30 e 40 Kg.

5.1.4.1 Resultados obtidos para o PA6

A Tabela 15 apresenta os resultados para o teste de bancada para o material PA6 20% fibra de vidro. Os valores representados na planilha foram obtidos com o uso de um paquímetro digital, devidamente calibrado. Como forma de validação as peças foram avaliadas com um micrômetro devidamente calibrado, obtendo exatamente os mesmos valores o que comprova a exatidão da medida apresentada.

Tabela 15 – Teste de ciclagem para o PA6 20% fibra de vidro.

Teste de ciclagem 15.000 ciclos - PA6				
ID.:	Peso da pota (kg):	Ø inicial (mm):	Ø final (mm):	Diferença (mm):
A1	40	30,03	30	0,03
A2	40	29,97	29,96	0,01
B1	40	29,95	29,95	0
B2	40	29,9	29,9	0
C1	30	29,96	29,96	0
C2	30	30,03	30,03	0
D1	30	29,96	29,93	0,03
D2	30	29,89	29,89	0
E1	20	29,96	29,95	0,01
E2	20	30,03	30,03	0
F1	20	30,02	30,01	0,01
F2	20	29,97	29,97	0

Os valores da coluna “diferença” representam o desgaste do diâmetro do rodízio após o teste de bancada. Como forma de padronizar a medida inicial antes do teste os rodízios foram usinados, com a medida de diâmetro de 30 mm, posteriormente nas imagens de microscópio será possível observar a característica da superfície usinada.

A Figura 49 apresenta de forma detalhada a área de contato entre o rodízio e o trilho de Al, a área de apoio está representada pelas imagens pelo quadro com linhas brancas, área apoiada não sofre variação significativa pois o dispositivo possui fixações nas extremidades.

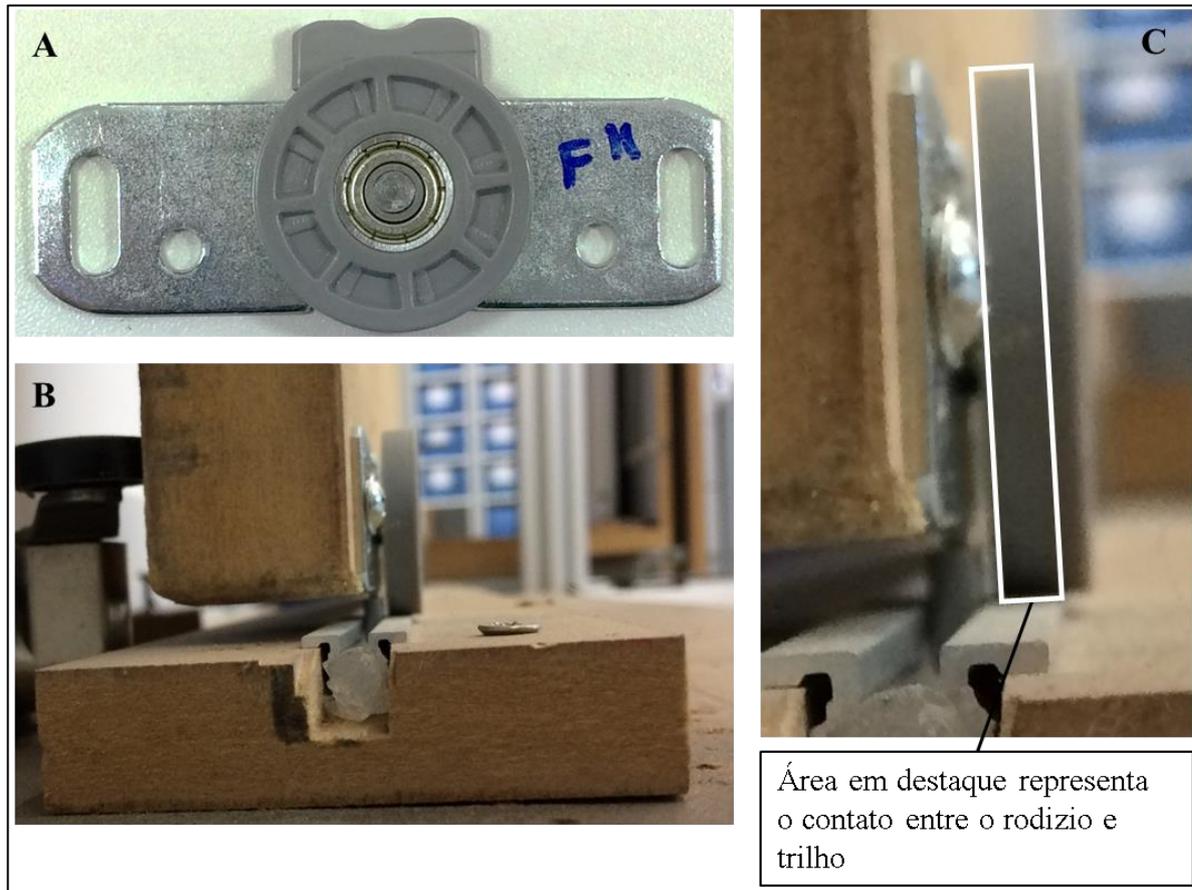


Figura 49 – Área de contato entre o rodízio e o trilho para o teste de bancada. A figura (A) representa o sistema utilizado no teste, a figura (B) representa a vista lateral com o sistema e trilho utilizado, a figura (C) apresenta a imagem detalhada da região de contato entre rodízio e trilho.

Avaliando-se os resultados da Tabela 15, o desgaste médio da amostra de 40 Kg é inconclusivo, pois não é possível concluir com clareza que o desgaste aumentou com o aumento da carga, pois mesmo com a aplicação de 40 Kg, uma peça apresentou desgaste zero.

O componente rodízio possui um rolamento na parte central, o componente possui baixa resistência a rolagem devido a presença do rolamento, essa situação aliada a um número de ciclos reduzido resultada em um desgaste quase inexistente. Para observar desgastes elevados seriam necessários testes de 50.000 ciclos e com uma carga adicional superior. Se analisarmos de forma percentual o teste que apresentou maior desgaste foi 0,03mm e representa apenas 0,001% da medida inicial, o que pode ser aceito como desgaste nulo para essa aplicação.

A Figura 50 apresenta um comparativo entre os rodízios de 20 e 40 Kg, em primeiro momento, fica evidente a característica rugosa da superfície observada nas esferas que foram

testadas no tribômetro. A avaliação da superfície com o aumento de 50 vezes não é suficiente para apresentar diferenças significativas no desgaste entre as cargas das amostras, os sinais de abrasão estão presentes em ambas imagens.

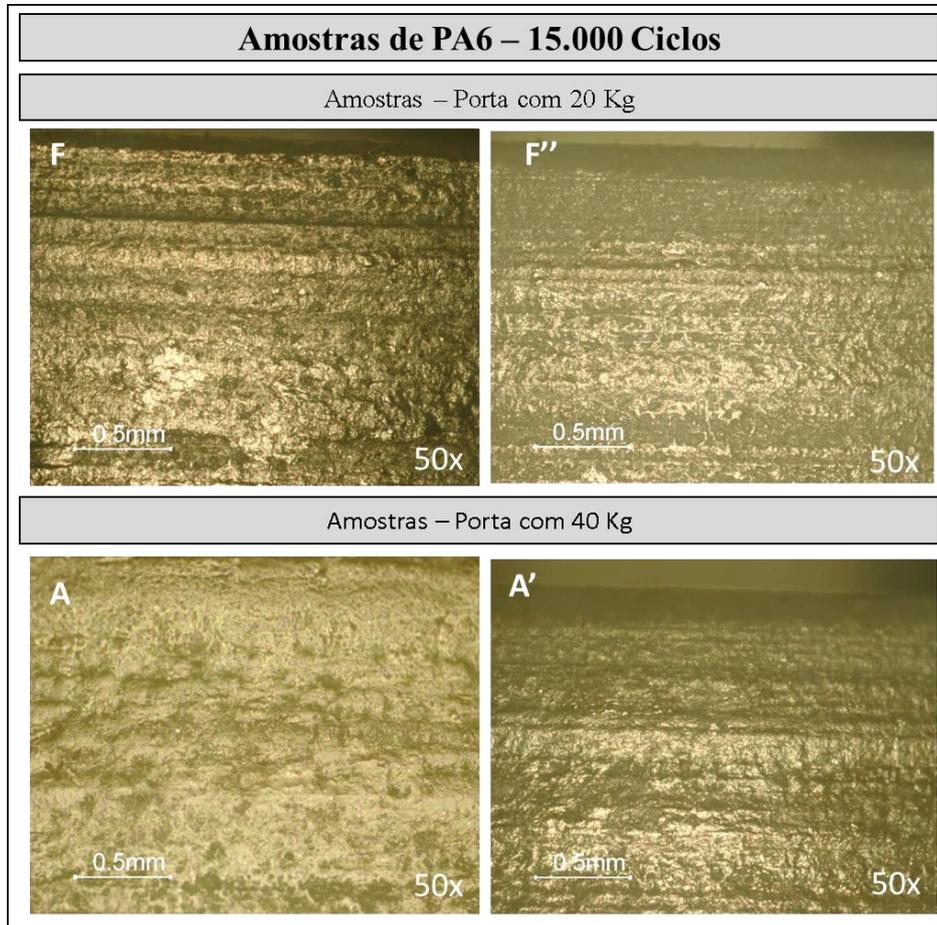


Figura 50 – Comparativo de desgaste superficial entre os testes de ciclagem com cargas de 20 e 40 Kg para o PA6 20% fibra de vidro com um aumento de 50 vezes.

A Figura 51 se refere as mesmas amostras da Figura 50, porém, com aumento de 100 vezes, com esta situação é possível observar que para a amostra de 40 Kg a superfície apresenta um aspecto irregular e um número superior de crateras possivelmente originadas pela combinação de abrasão e adesão.

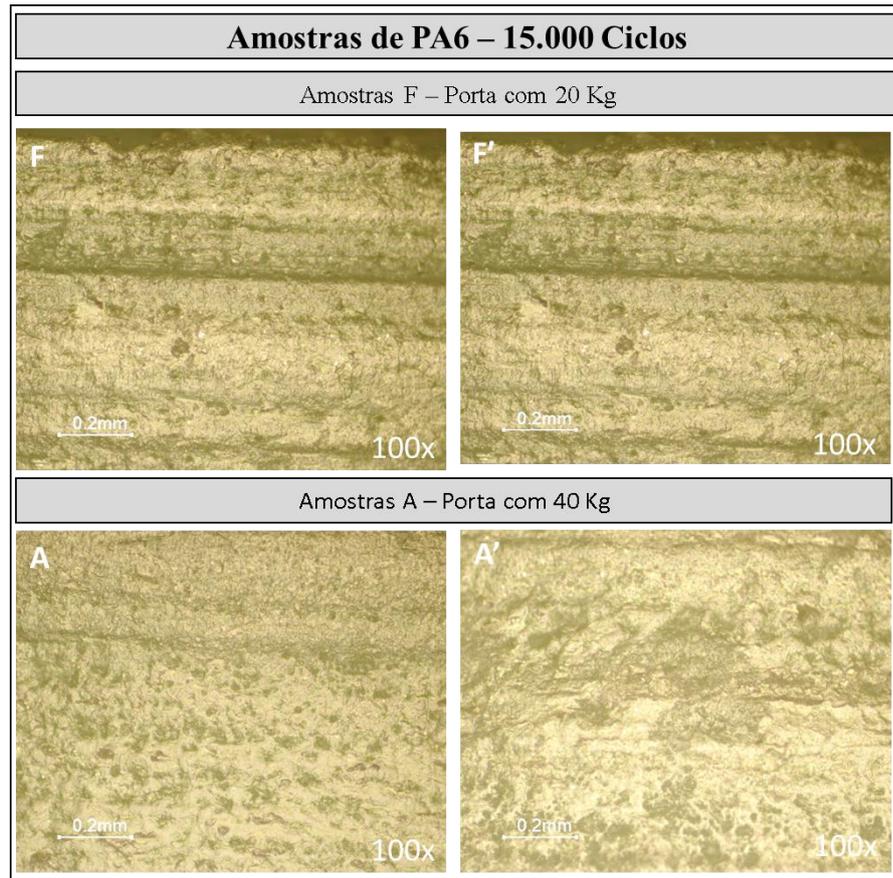


Figura 51 – Comparativo de desgaste superficial entre os testes de ciclagem com cargas de 20 e 40 Kg para o PA6 20% fibra de vidro com um aumento de 100 vezes.

A Figura 52 apresenta a diferença entre a superfície que foi usinada anteriormente ao teste e a superfície onde ocorreu o contato durante o teste. A diferença entre as superfícies mostra como a superfície é afetada pelo desgaste e modifica o seu aspecto superficial.

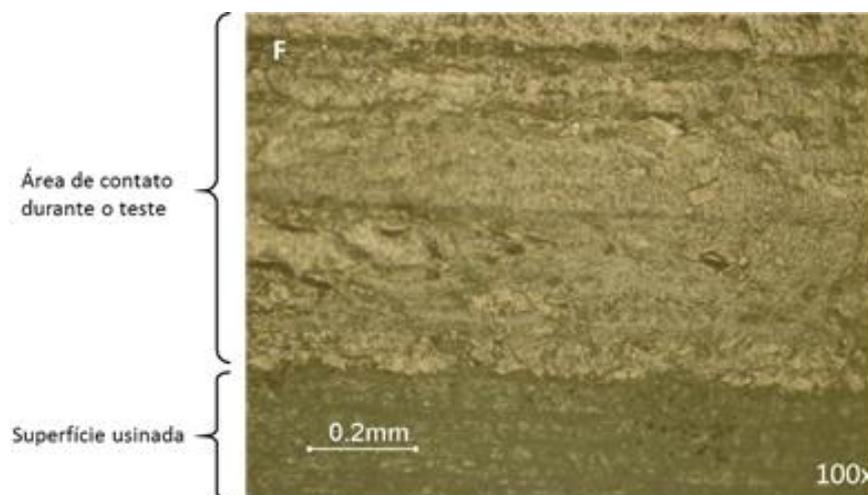


Figura 52 – Imagem obtida por microscópio óptico com 100x, diferença entre a superfície usinada e a área de contato durante o teste de bancada.

De acordo com Hutchings [11], o contato entre duas superfícies sendo uma superfície de polímero e a outra com dureza superior, que é a situação deste trabalho, neste momento o mecanismo de desgaste atuante é a adesão, e que o contato entre as duas superfícies é predominantemente elástico. Ainda de acordo com Hutchings [11] em situações de cargas moderadas e quando a área de contato é uma fração da área aparente a área de contato permanece proporcional a carga normal e o μ independem da carga normal.

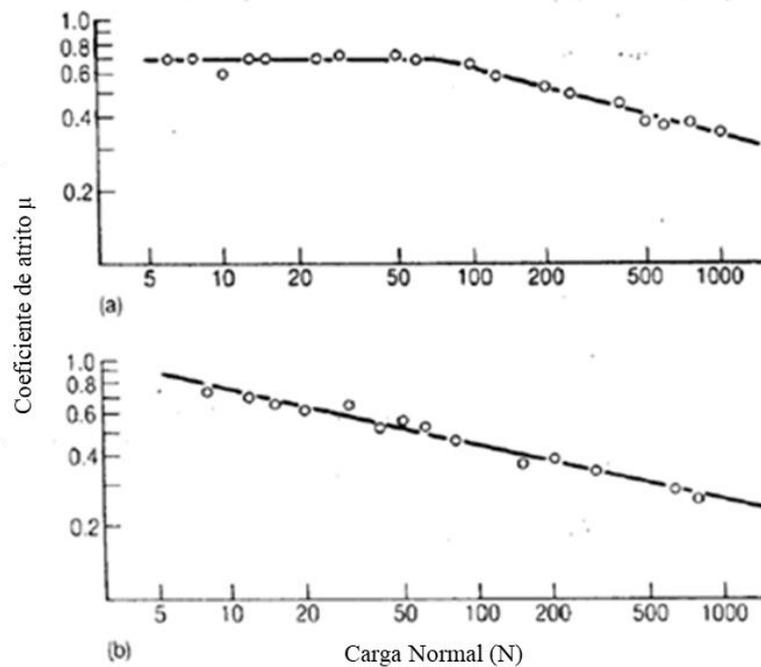


Figura 53– μ entre uma superfície usinada (a), e uma superfície polida (b) (adaptado de HUTCHINGS (1992)).

O cálculo da P_{max} de contato de Hertz para o teste funcional para o material PA6 20% fibra de vidro é apresentado na Figura 54, para esse gráfico não temos desvio padrão visto que o cálculo é baseado em apenas uma situação específica.

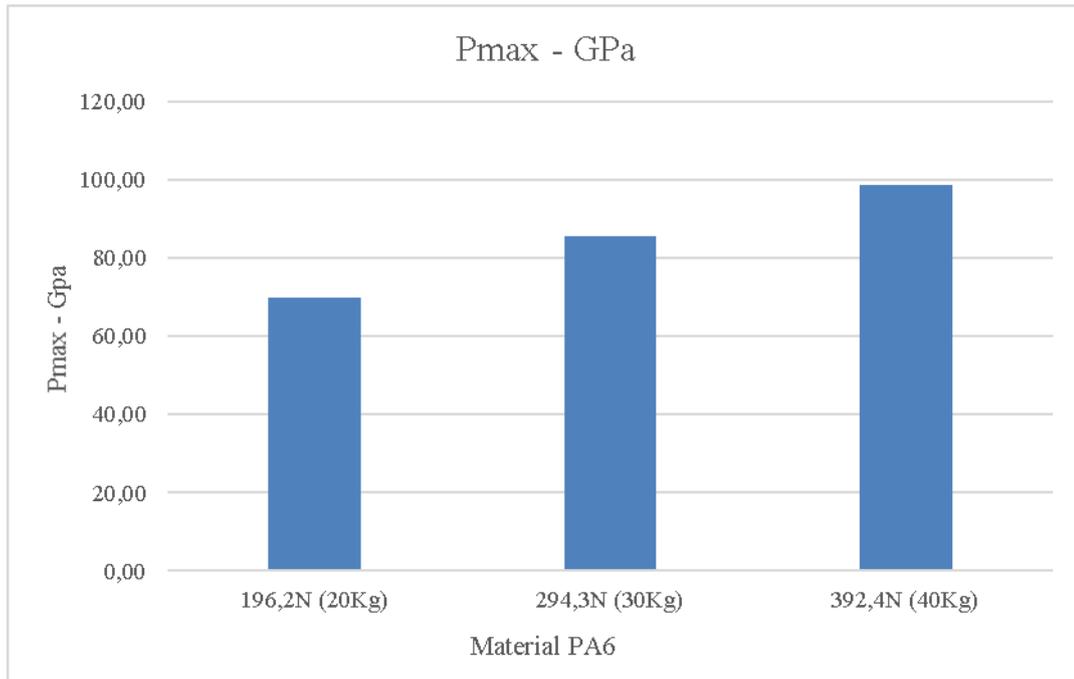


Figura 54 – P_{max} de contato de Hertz para o teste de bancada com o material PA6 20% fibra de vidro.

O componente rodízio possui um rolamento na parte central, o componente possui baixa resistência a rolagem devido a presença do rolamento, essa situação aliada a um número de ciclos reduzido resultada em um desgaste quase inexistente. Para observar desgastes elevados seria necessário testes de 50.000 ciclos e uma quantidade superior de amostras.

5.1.4.2 Resultados do POM

A Tabela 16 e a Figura 55 apresentam os resultados para o teste funcional para o POM. Os valores representados na planilha foram obtidos com o uso de um paquímetro digital, devidamente calibrado. Como forma de validação as peças foram avaliadas com um micrômetro devidamente calibrado, obtendo os mesmos valores.

Tabela 16 – Teste de ciclagem para o POM.

Teste de ciclagem 15.000 ciclos - POM				
ID.:	Peso da pota (kg):	Ø inicial (mm):	Ø final (mm):	Diferença (mm):
A1	20	29,85	29,85	0
A2	20	29,91	29,91	0
B1	20	29,85	29,85	0
B2	20	29,84	29,84	0
C1	30	29,88	29,88	0
C2	30	29,87	29,86	0,01
D1	30	29,93	29,91	0,02
D2	30	29,86	29,86	0
E1	40	29,83	29,83	0
E2	40	29,92	29,92	0
F1	40	29,92	29,91	0,01
F2	40	29,92	29,9	0,02

Os valores da coluna ‘diferença’ representam o desgaste do rodízio após o teste de bancada. Como forma de padronizar o teste os rodízios foram usinados antes de iniciar o teste, com a medida do diâmetro de 30 mm, posteriormente nas imagens de microscopia óptica será possível observar a característica usinada da superfície.

Avaliando-se os resultados da Tabela 16, o desgaste médio das amostras de 30 e 40 Kg não apresentou diferença considerável, sendo que para a amostra de 20 Kg, não foi registrado desgaste, mesmo utilizando a segunda medição com o uso de um micrômetro, porém, não é possível concluir com clareza que o desgaste aumentou com o aumento da carga, pois mesmo com a aplicação de 40 Kg, uma peça apresentou desgaste zero. O componente rodízio possui um rolamento na parte central, o componente possui baixa resistência a rolagem devido a presença do rolamento, essa situação aliada a um número de ciclos reduzido resultada em um desgaste quase inexistente. Para observar desgastes elevados seriam necessários testes acima de 50.000 ciclos e uma quantidade superior de amostras

Ao analisar de forma percentual o teste que apresentou maior desgaste foi 0,02 mm e representa apenas 0,0006% da medida inicial, o que pode ser aceito como desgaste nulo para essa aplicação.

O comportamento do POM pode ser explicado pela sua composição e estrutura molecular, que faz com que ele seja considerado como um material auto lubrificante. O POM possui dentro da sua especificação genérica uma quantidade elevada de composições e ligas que variam a propriedade de acordo com a necessidade da aplicação, podendo ter rigidez e

dureza extremamente elevada, onde algumas aplicações podem substituir até metais, fornecedores como *Dupont* possuem cerca de setenta variações de Poliacetal.

De acordo com a empresa Ensinger, o POM é o material ideal para componentes deslizantes, possui μ baixo e reduzida absorção de umidade.

O componente rodízio possui um rolamento na parte central, o componente possui baixa resistência a rolagem devido a presença do rolamento, essa situação aliada a um número de ciclos reduzido resultada em um desgaste quase inexistente. Para observar desgastes elevados seria necessário testes de 50.000 ciclos e uma quantidade superior de amostras.

De acordo com a Figura 55, é possível observar o rodízio do teste de bancada com o material POM, a superfície do material apresenta uma característica distinta do material PA6 20% fibra de vidro, e que pode ser relacionada com o ensaio de desgaste *ball-on-plate*, apresentando um aspecto menos rugoso e uniforme ao sentido de rotação do rodízio em comparação ao PA6 20% fibra de vidro.

As amostras apresentadas na Figura 55 possuem 50 vezes de aumento, com este parâmetro é possível observar com clareza a diferença entre a superfície da peça com 20 e 40 Kg, onde na imagem da amostra "A" de 20 Kg é possível observar na parte inferior a superfície original com as marcas de ferramenta de usinagem.

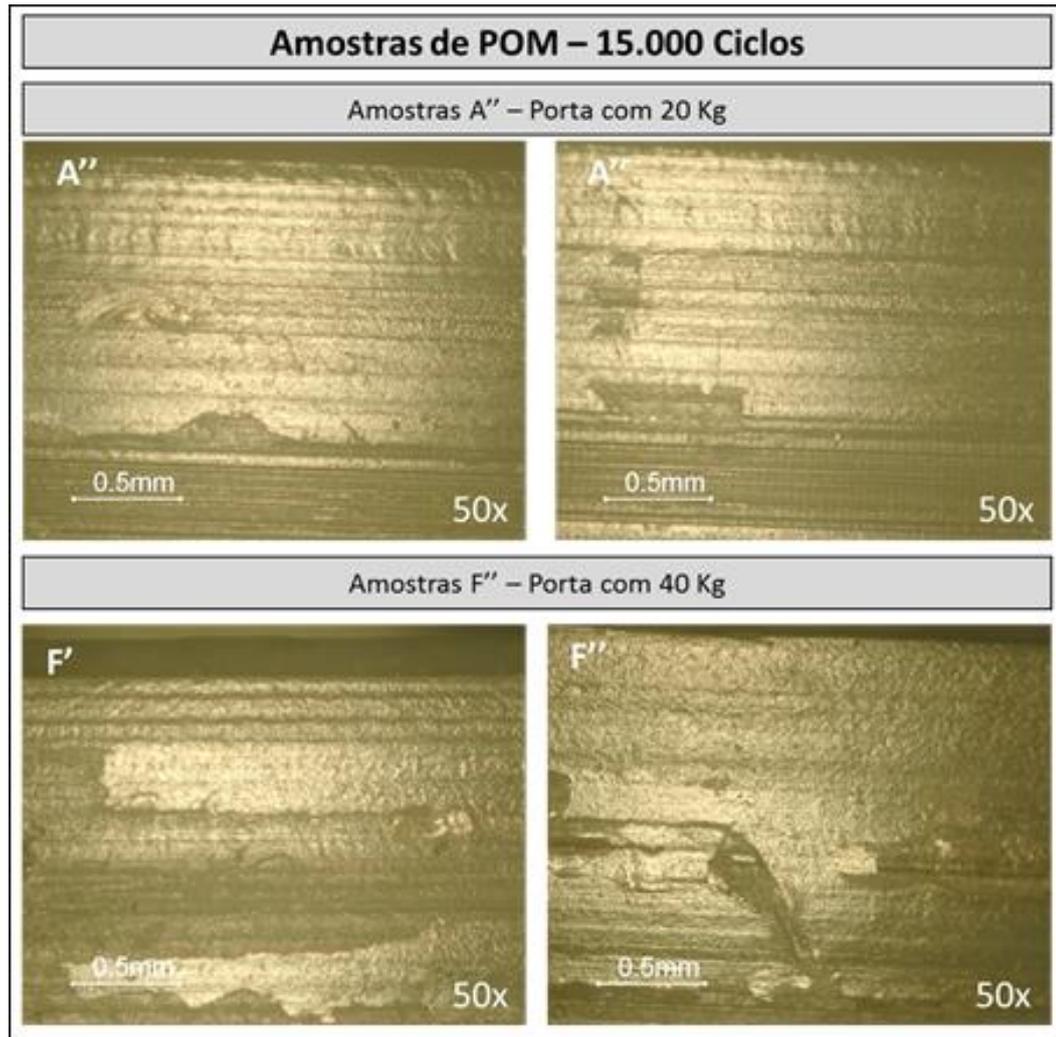


Figura 55 – Comparativo entre os testes de ciclagem com cargas de 20 e 40 Kg para o POM com um aumento de 50 vezes.

A Figura 56 apresenta as mesmas peças da Figura 55 com um aumento de 100 vezes, neste momento é possível visualizar de forma mais acentuada os defeitos na superfície dos componentes, nas amostras de 40 Kg o desgaste é similar a uma situação de deslocamento de uma fina camada de material em alguns pontos, isso pode ser relacionado ao desgaste de adesão que faz com que o POM seja arrancado em pequenas quantidades, ficando aderido ao perfil de alumínio em pequenas quantidades.

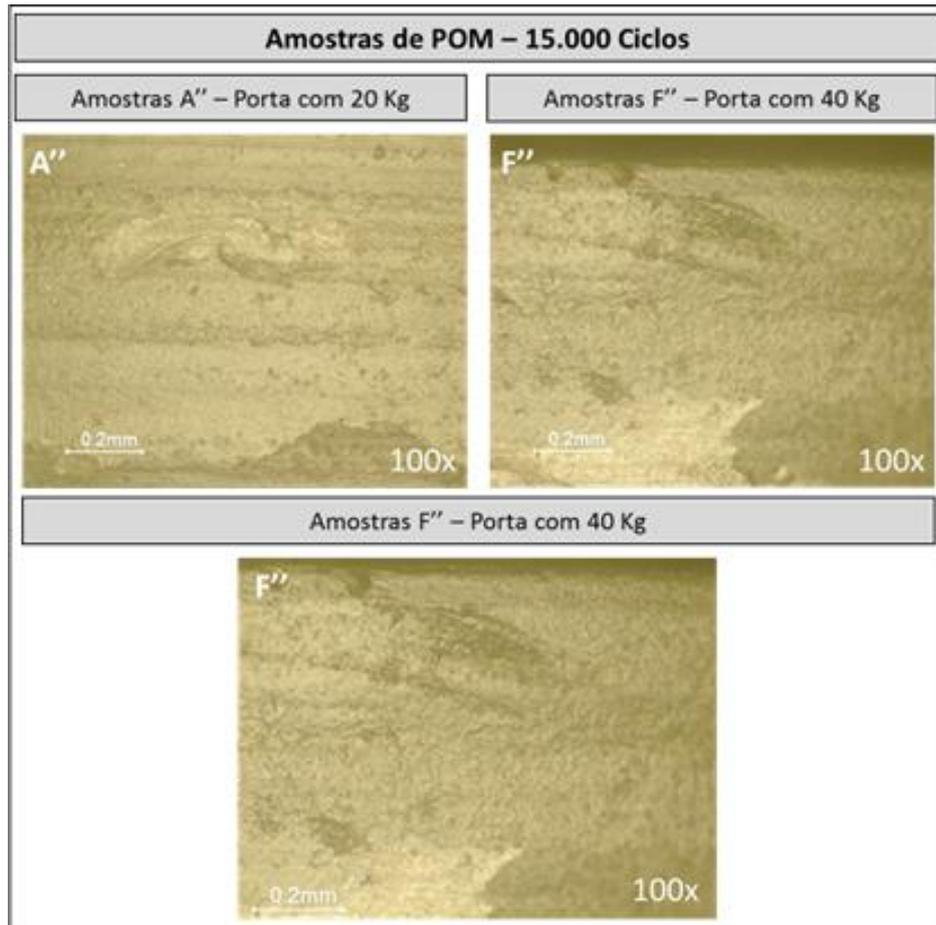


Figura 56 – Comparativo entre os testes de ciclagem com cargas de 20 e 40 Kg para o POM com um aumento de 100 vezes.

O cálculo da P_{max} de contato de Hertz para o teste de bancada para o material POM é apresentado na Figura 57.

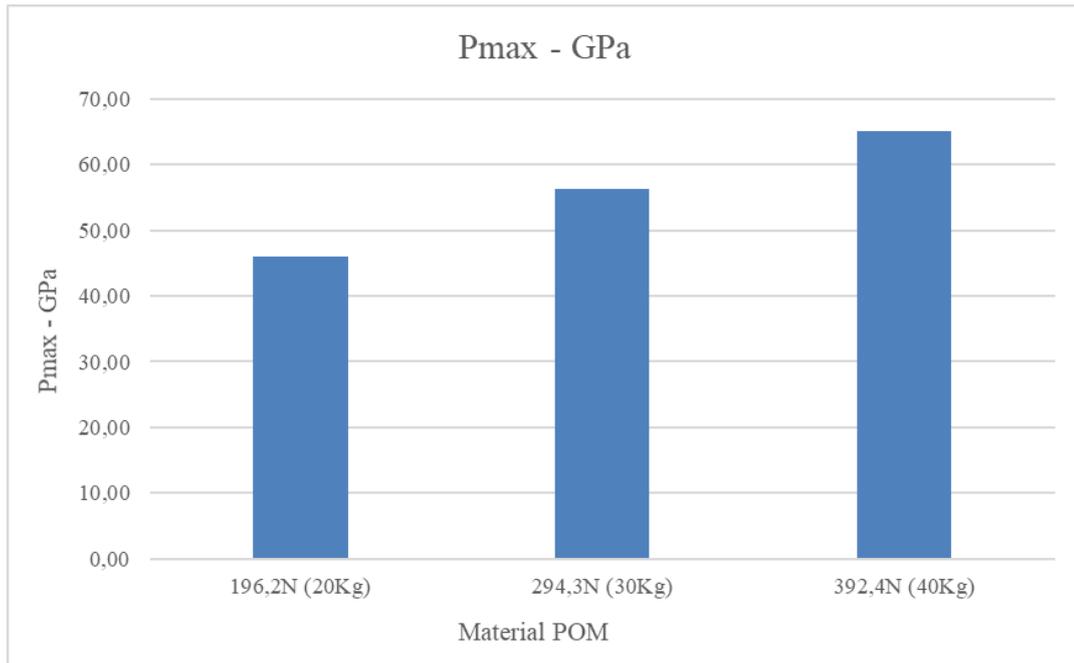


Figura 57 – P_{max} de contato de Hertz para o teste de bancada com o material POM.

5.1.5 Comparação dos testes de bancada ensaio de desgaste *ball-on-plate*

A Figura 58 apresenta um quadro comparativo entre as imagens de PA6 20% fibra de vidro e POM com 40 Kg para o teste de bancada e ilustra alguns mecanismos de desgaste descritos no capítulo 2.1.6.1, dentre os mecanismos do quadro o microssulcamento e microfadiga possivelmente sejam os que atuem de forma mais acentuada no teste de bancada, de forma menos presente a formação de proa e o microcorte podem atuar por mudanças ocorridas na superfície por outros mecanismos. De acordo com Myshink. K [15], Brostow et al. [16] relatam em seus estudos as interferências que os mecanismos de desgaste podem acarretar no desempenho dos materiais.

É válido ressaltar que alguns mecanismos de desgaste podem ter ocorrido de forma menos acentuada pela carga e duração do teste utilizados, com novas variações aumentando-se a carga e número de ciclos poderíamos encontrar valores elevados de desgaste e a presença de mecanismos de desgaste de forma mais nítida.

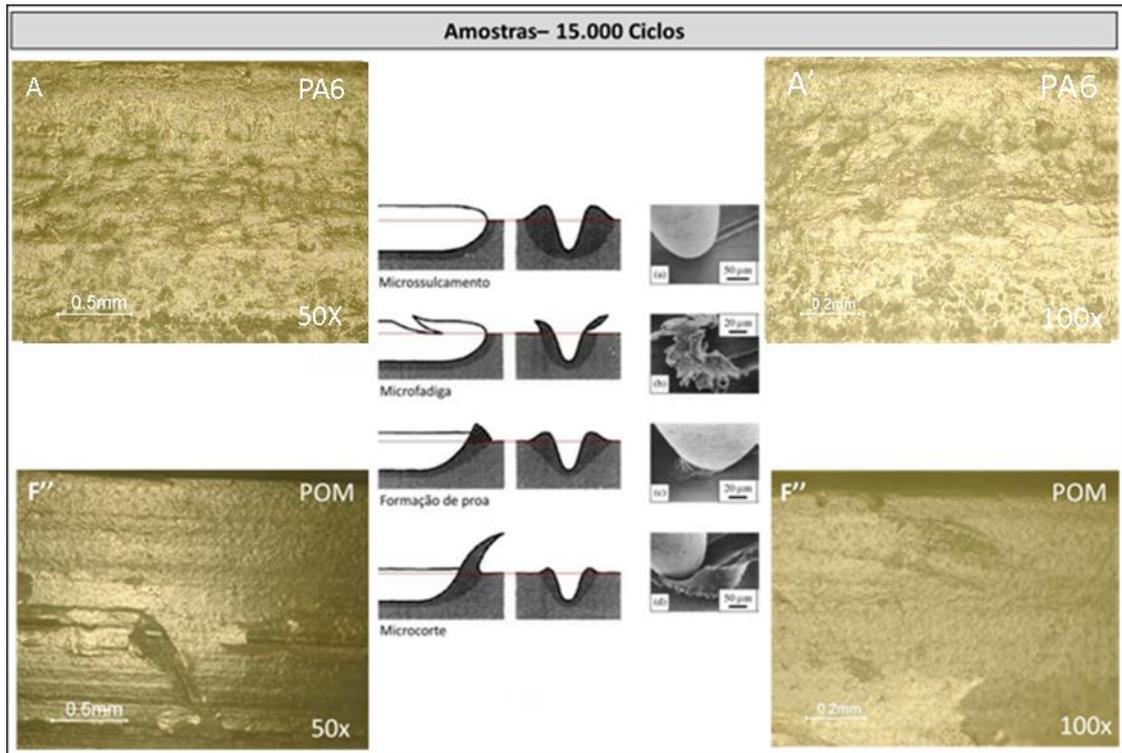


Figura 58 – Comparação as micrografias do PA6 20% fibra de vidro e do POM para a carga de 40 Kg e alguns mecanismos de desgaste.

Analisando-se as imagens das esferas desgastadas e os dados da perda de massa V_p , os resultados indicam com clareza o maior desgaste e a maior perda de massa para o material POM no ensaio de desgaste *ball-on-plate*.

A Figura 59 apresenta a perda de massa o V_p e o diâmetro aproximado área desgastada das esferas do ensaio de desgaste *ball-on-plate*, desta forma buscou-se relacionar o desgaste com a perda de massa da norma ASTM G133 [49].

De acordo com as informações na Figura 59, é possível observar o comportamento geral de todas as amostras do teste e fica evidente que as amostras de PA6 20% fibra de vidro são superiores no quesito desgaste, sendo que para todos os comparativos o PA6 20% fibra de vidro apresentou valores inferiores as amostras de POM para a mesma carga. O diâmetro que está considerado na Figura 59 é média de todas as amostras de cada carga, o desvio padrão para as amostras estão representados na Tabela 11 e na Tabela 14.

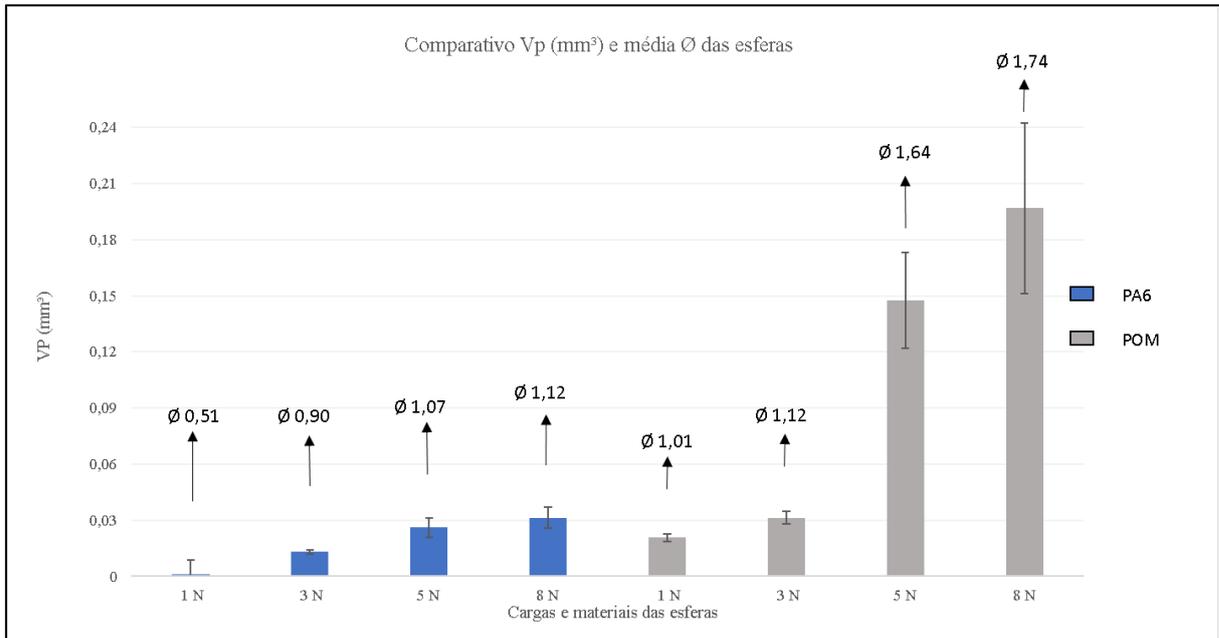


Figura 59 – Comparação entre a perda de massa V_p e o diâmetro aproximado da área desgastada nas esferas do ensaio de desgaste *ball-on-plate*.

O comparativo entre as informações obtidas no ensaio de desgaste *ball-on-plate* como μ , perda de massa V_p , não pode ser relacionado diretamente ao teste de bancada, por uma série fatores como: áreas de contato diferentes, P_{max} de contato de Hertz diferentes, condição de deslizamento diferentes visto que o rodizio possui um rolamento que diminui a resistência ao deslizamento da porta.

De acordo com Rymuza [5], a transferência de material polimérico para um par não polimérico é iniciada por fortes ligações adesivas e fricção, onde a formação de um filme de transferência é importante para a condição de deslizamento diminuindo o μ . Além disso, o comportamento de amostras de teste com pequenas áreas de contato é significativamente diferente para compósitos lubrificados, esta situação não é uma variável deste trabalho, mas cabe a sua avaliação em situações específicas em outras aplicações.

A formação de um filme de polímero na superfície de deslizamento também é citada por Wieleba [56] como sendo de grande importância para o desempenho do par tribológico pois após a criação do filme de polímero o contato passa a ser entre polímeros e não mais sobre metal e polímero.

De acordo com Wieleba [56], em casos de contato entre polímeros e metais, devido a dureza superior do metal a sua rugosidade provoca a remoção de partículas que cavam a superfície do polímero. Isto é representado na Figura 60.

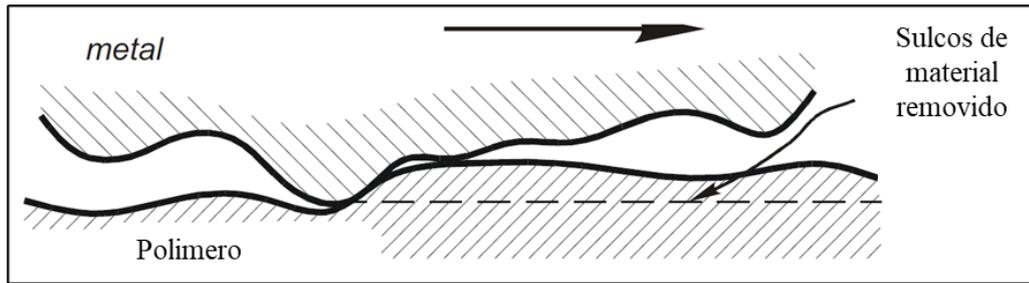


Figura 60 – Representação da remoção de material da superfície de um polímero em contato com um metal (adaptado de WIELEBA [56]).

De acordo com Wieleba [56], a formação do desgaste tem relação forte com a rugosidade e com o μ , e que de forma surpreendente apresenta que superfícies lisas apresentam maior μ e maior interação de contato de acordo com a Figura 61.

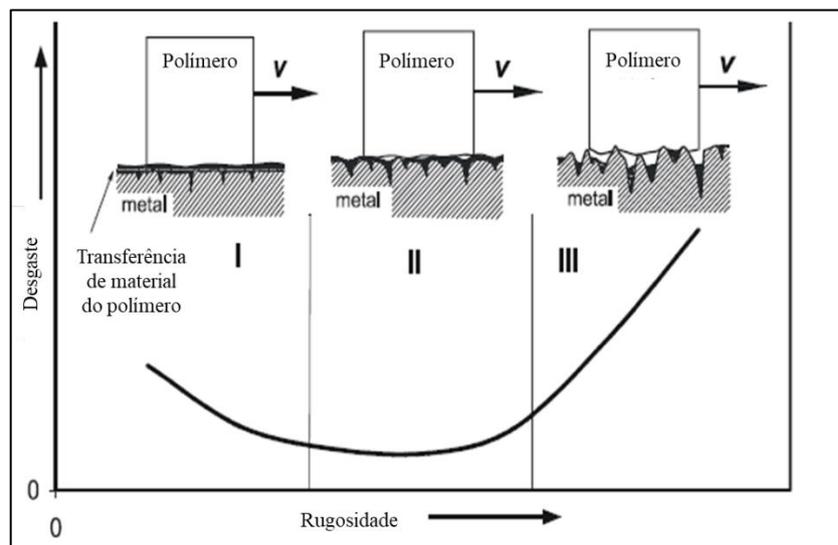


Figura 61 – Representação do desgaste em função da rugosidade para superfícies de polímeros e metais (adaptado de WIELEBA (2007)).

A P_{max} de contato de Hertz apresenta uma informação importante no estudo da situação de contato onde a magnitude da mesma ultrapassa aproximadamente 1000 vezes o limite de escoamento de ambos os materiais, devido a este valor é possível afirmar que no ponto específico de contato ambos materiais serão removidos pela ação de fenômenos de desgaste como adesão, abrasão. De acordo com Callister [57] os polímeros são sensíveis a cargas elevadas e em determinadas situações podem ocorrer falhas devido ao amolecimento do material e não a processos de fadiga comuns.

O presente trabalho dentro dos resultados dos testes apresenta uma clara relação entre o desgaste e a carga de teste. O trabalho de Sudeepan, J. [58] desenvolveu testes com o polímero

ABS/ZnO pressionadas contra um rolo de aço, neste trabalho o autor comenta que o principal fator para a interferência no quesito taxa de desgaste é a carga aplicada, seguida pela velocidade de rotação.

O estudo realizado por Chang L. [59] apresenta alguns polímeros dentre eles o PA sem fibra, os testes realizados foram com modalidade pino disco, os resultados obtidos mostraram que os a adesão entre as superfícies de contato diminuiu com a presença de nanopartículas no material compósito.

O trabalho desenvolvido em American Capitanu, Lucian; Florescu Virgil [9] desenvolveu testes em componentes de PA com fibra sobre um eixo de aço em rotação, os resultados obtidos apresentaram que a dureza do corpo de prova de aço teve significativa participação nos resultados, o trabalho também faz menção as elevadas temperaturas que são obtidas no teste entre 180-240 °C, e em vários casos devido a esta temperatura o material do polímero é transferido para a peça, parte das fibras que foram retiradas da peça ainda produzem desgaste na área de contato.

O ensaio de desgaste *ball-on-plate* apresenta dentro das condições deste trabalho e dos materiais utilizados informações mais completas acerca do comportamento do par tribológico POM/PA6 20% fibra com Al, isto se deve a quantidade de dados gerados pelo ensaio de desgaste *ball-on-plate* onde pode ser observado o comportamento distinto de ambos os materiais, seguidos pela variação do μ .

O desafio de reduzir o μ é uma proposta que envolve uma percepção da aplicação e o amplo conhecimento de materiais específicos e suas combinações. De acordo com Bakhareva, Nikolaev e Anisimov [60], existem combinações de borrachas lubrificadas a água onde pode ser obtido μ de 0,004 a 0,007, porém, está limitada a carga de 0,35 MPa com velocidades de 0,5 a 10m/s para rolamentos de borracha. De acordo com Avital [61] em seu trabalho concluiu-se que o coeficiente de atrito não tem relação direta com a resistência ao desgaste, mas sim com o par tribológico em estudo.

Dentro da avaliação dos resultados uma possibilidade que merece ser considerada, não diretamente aos testes deste trabalho, mas no âmbito do conhecimento do desgaste de materiais diferentes em contato é a presença de um lubrificante.

Existe uma quantidade expressiva de estudos realizados para o contato entre PA e aço devido a sua utilização em máquinas e mancais. De acordo com Rosa et al. [62], o estudo refere-se a proposta de testar o material PA com várias composições para substituir o material de atrito de embreagem, neste estudo é evidenciada a influência que a temperatura e exerce em polímeros, o μ não tem influência direta no desgaste, mas sim a composição par tribológico.

De acordo com W. A. Brainard [63], sugerem que todos os polímeros em contato com superfícies em baixas velocidades tendem a formar filmes, e de acordo com isso indica um aumento no atrito.

Corroborando o que foi citado por P.C MICHAEL [28] comenta que a magnitude elevada da adesão pode ser explicada pela transferência de filmes gerados na face de contato entre superfícies metálicas. Outro autor segue a mesma linha de pensamento do autor anterior, Martínez. F [20] em seu trabalho testou o polímero TPU sobre uma superfície de aço, os resultados concluíram que no processo de desgaste é semelhante ao existente na literatura, porém, dentro de uma faixa restrita de parâmetros e que para outras variações é necessário o desenvolvimento de um modelo específico de fadiga, o autor comenta que o desgaste por fadiga ocorreu por meio do cisalhamento de folhas ou laminas de material.

O trabalho realizado por Muhandes. h et al. [64] desenvolveu uma proposta que completa o estudo do presente trabalho, onde ele utilizou compostos poliméricos especificamente PA6 em três variações, utilizando o processo pino disco em seu teste. Os resultados obtidos apresentaram que o composto com fibra apresentou os menores picos de rugosidade após o teste e o perfil da rugosidade também foi menos nítido o que é representa uma situação similar ao estudo realizado neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados de ambos os testes é possível observar o comportamento distinto nos quesitos coeficiente de atrito (μ) e desgaste da esfera entre o ensaio de desgaste realizado em um tribômetro na configuração *ball-on-plate* e o teste funcional. A principal diferença está no princípio de funcionamento de cada teste, onde o ensaio de desgaste *ball-on-plate* se dá pelo deslizamento de uma esfera fixa em um suporte sobre uma placa de Al e o teste de bancada possui uma roda revestida de PA6 20% fibra de vidro ou POM com um rolamento na parte central, a resistência ao deslizamento e conseqüentemente os mecanismos de desgaste atuam de forma diferente em cada teste.

O ensaio de desgaste *ball-on-plate* apresentou resultados que evidenciaram claramente as diferenças entre os materiais, onde a variação dos requisitos técnicos refletiu-se no desgaste das amostras. O PA6 20% fibra de vidro mostrou-se superior no quesito desgaste onde a suas propriedades mecânicas superiores e a presença de fibras em sua estrutura contribuíram para o aumento da resistência ao desgaste comparativamente ao POM, em todas as cargas testadas no ensaio de desgaste na configuração *ball-on-plate*. O coeficiente de atrito, no entanto, apresentou resultados inversos, o que se deve a composição e estrutura do POM que é amplamente conhecido por suas características lubrificantes, por sua vez a presença das fibras na estrutura do PA6 20% fibra de vidro de acordo com a bibliografia faz com que as irregularidades provocadas pela presença das fibras em sua estrutura e que acabam por se desprender do componente migrem para a superfície formando uma película de material que ocasione um acréscimo no μ .

O desgaste das esferas esta condizente e reproduz os resultados obtidos pelo cálculo de perda de massa teórica da norma ASTM G133 [49], onde linearmente a perda de massa para a esfera com a carga de 8N reproduziu-se na questão de desgaste para ambos os materiais.

O teste funcional de desgaste, por possuir a característica da presença do rolamento é menos agressivo considerando o contato entre o polímero e a superfície da liga de Al. Para todas as variações de carga com 15.000 ciclos, o desgaste obtido foi da ordem de 0,0006% do diâmetro externo do rodízio o que é praticamente inexistente para a aplicação.

O material POM mesmo possuindo características mecânicas inferiores ao PA6 20% fibra de vidro, devido a sua composição química possui propriedades que o favorecem na aplicação descrita neste trabalho, sendo utilizado em situações que possuem contato e deslizamentos entre componentes. O PA6 20% fibra de vidro por sua vez possui propriedades

mecânicas que favorecem a aplicação em situações que exigem carregamentos e esforços elevados.

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de desgaste na configuração *ball-on-plate* estes representam melhor o comportamento dos materiais, considerando uma condição mais severa de carregamento. O teste funcional de desgaste, com os parâmetros utilizados, não permitiu evidenciar as diferenças de comportamento em desgaste dos materiais ensaiados além disso, possuem algumas variáveis como a montagem e alinhamento dos componentes dos materiais que podem influenciar o desempenho geral do sistema.

O comportamento de ambos os materiais mostra que cada um possui características particulares e devem ser relacionadas com inúmeros quesitos para a sua utilização em uma determinada aplicação. O PA6 20% fibra de vidro possui vantagem em aplicações que exigem esforços e resistência ao desgaste, enquanto o POM apresenta menores valores de coeficiente de atrito, o que favorece o contato entre componentes que exigem aplicações com menor emissão de ruídos.

REFERÊNCIAS

-
- [1] BUSHAN, B. **Introduction to tribology**. Columbus, Ohio. John Wiley & Sons, INC, 2002.
- [2] JOST, H. P. **Lubrication: Tribology; Education and Research; Report on the Present Position and Industry's Needs** (submitted to the Department of Education and Science by the Lubrication Engineering and Research) Working Group. HM Stationery Office, 1966.
- [3] STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology**. Tribology Series, 24; Elsevier Science: Amesterdam, Netherlands, 1993. *Apud* ON THE THERMODYNAMICS OF FRICTION AND WEAR—A REVIEW.
- [4] METALS HANDBOOK, Vol. 13. **Corrosion**, ASM International, Metals Park, OH, v. 44073, 1987.
- [5] RYMUZA, Z. **Tribology of polymers**. *Archives of civil and mechanical engineering*, v. 7, n. 4, p. 177-184, 2007.
- [6] BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Projeto de Máquinas de Shigley**. 11 ed. Bookman, 2011.
- [7] DUARTE, E. N. **Mecânica do Contato entre Corpos Revestidos**. 1 ed. Blucher, 2016.
- [8] NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4 ed. Bookman, 2013.
- [9] CAPITUANU, LUCIAN; FLORESCU, VIRGIL. **Tribological Aspects of wear of polished steel surface dry friction contact on polymer composities with glass fibres**. *American Journals of Materials Science*, 8 – 18, 2013
- [10] Neale, J. M. **The tribology handbook**. 2° ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1995.
- [11] HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 1992. Arnold, London, 1992.
- [12] UNAL, H.; HAKAN YETGIN, S.; FINDIK, F. **The effect of applied load and sliding speed on the tribological properties of Nylon 6 and ultra-high-molecular-weight polyethylene**. *Industrial Lubrication and Tribology*, v. 66, n. 3, p. 498-504, 2014.
- [13] UNAL, H.; MIMAROGLU, A. **Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions**. *Wear*, v. 289, p. 132-137, 2012.
- [14] PIHTILI, H. AND TOSUN, N. **“Effect of load and speed on the wear behavior of woven glass fabrics and aramida fiber-reinforced composites”**, *Wear*, Vol. 252, 2002.
- [15] MYSHINK, M; KOVALEV, A. **Adhesion and friction of polymers**. Gomel. 2014. 36f. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/228531798_Adhesion_and_friction_of_polymers>
. Acesso em: 20 jun.2020

[16] BROSTOW, W.; KOVACEVIC, V.; VRSALIKO, D.; WHITWORTH, J. **Tribology of polymers and polymer-based composites**. Journal of Materials Education, v. 32, n. 5, p. 273, 2010.

[17] MALIK Y.ET AL. **Wear dynamics of a TPU/steel contact under reciprocal sliding**. Tarbes, vol. 315, p. 103-114. 2014

[18] SVAHN, Fredrik; CSILLAG, Stefan. **Formation of low-friction particle/polymer composite tribofilms by tribopolymerization**. Tribology letters, v. 41, n. 2, p. 387-393, 2011.

[19] ASTM. G133-05: **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**. 2016. West Conshohocken EUA.

[20] Martínez F.J, Canales. M et al. **Relationship between wear rate and mechanical fatigue in sliding TPU–metal contacts**. *Wear* , Zaragoza, 268, p 388-398, aug 2009.

[21] ZHUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier, 1987.

[22] MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. D. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, v. 2, 2009.

[23] Neale, J. M. **The tribology handbook**. 2º ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1995.

[24] LOW, K. O.; WONG, K. J. **Tribological effects of polymer surface modification through plastic deformation**. *Bulletin of Materials Science*, v. 34, n. 7, p. 1549-1555, 2011.

[25] **JOURNAL OF MATERIALS EDUCATION VOL.32**. Denton, Texas: International Council on Materials Education, 2010.

[26] POGACNIK, A.; KALIN, M. **Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel**. *Wear*, v. 290, p. 140-148, 2012.

[27] SRIVANSAN, V. ET AL. **Comparative Study on the Wear Behavior of Long and Short Glass Fiber Reinforced Plastics**. *Metals and Materials Int.*, Annamalainagar, 16, 2, p 205-212, 2008-2009.

[28] P.C MICHAEL, E.RABINOWICZ, Y. IWASA **Friction and wear of polymeric materials** at 293, 77 and 4.2 K. 1990

[29] NBR ISO 4287: **Especificações geométricas do produto (GPS) -Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. 2002. Rio de Janeiro.

[30] Ludema, K.C. **Friction, wear, lubrication :a textbook in tribology**. Boca Raton: CRC Press, 1996.

-
- [31] QUAGLINI, VIRGINIO; DUBINI, PAOLO. Friction of Polymers Sliding on Smooth Surfaces. *Advances in Tribology*, Milano, vol 2011, pag 1-8, 2011.
- [32] ASTM D792-20: **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. 2020. West Conshohocken EUA.
- [33] ASTM D638-14: **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. 2014. West Conshohocken EUA.
- [34] ASTM D790-17: **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. 2017. West Conshohocken EUA.
- [35] ASTM D256-10: **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. 2018. West Conshohocken EUA.
- [36] ASTM D785-08: **Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials**. 2015. West Conshohocken EUA.
- [37] WIEBECK, H. **Plásticos de engenharia**. Artliber, 2005.
- [38] Lates, M. T; Velicu, R; Gavrilă, C. C. **Temperature, Pressure, and Velocity Influence on the Tribological Properties of PA66 and PA46 Polyamides**. Mdpi.com. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/journal/materials>>. Acesso em 10 novembro 2019.
- [39] Bahadur, S. and Polineni, V.K. (1996) ‘**Tribological studies of glass fabric-reinforced polyamide composites filled with CuO and PTFE**’, *Wear*, Vol. 200, Nos. 1–2, pp.95–104.
- [40] K.D Dearn et al; **Applications of dry film lubricants for polymer gears**. 2012.
- [41] **TRIBOLOGY OF FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITES—A REVIEW**. Pennsylvania: SAGE Journals, 2015-2015.
- [42] MUHAMMAD NURUZZAMAN, D.; ASADUZZAMAN CHOWDHURY, M.; LUTFAR RAHAMAN, M. **Effect of duration of rubbing and normal load on friction coefficient for polymer and composite materials**. *Industrial Lubrication and Tribology*, v. 63, n. 5, p. 320-326, 2011.
- [43] TSUKIZOE, T. AND OHMAE, N. “**Friction and wear of advanced composite materials**”, *Fiber Science and Technology*, Vol. 18 No. 4. 1983 p. 265-86.
- [44] DOCPLAYER. **Perfis extrudados de alumínio ligas e têmperas de extrusão**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/6289952-Perfis-extrudados-de-aluminio-ligas-e-temperas-de-extrusao.html>
- [45] **Guia técnico do alumínio: extrusão: vol. 1 – 5 ed.** – São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio – ABAL, 2014.
- [46] VIEIRA, S. T. V. E.; LUIZ L. **Processos de injeção**, Unisociosc, Joinville, 2014.
- [47] <<http://www.arburg.com>>. Acesso em 10 dezembro 2020.

-
- [48] **TUDO SOBRE PLÁSTICOS**. Tudo sobre plásticos. Disponível em: <<https://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>>. Acesso em: 10 setembro 2020.
- [49] ASTM. G133-05: **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**. 2016. West Conshohocken EUA.
- [50] SILVA, C. H.; GIRALDO, D. H.; SOUZA, R.; SINATORA, A. **Estudo da influência das características do contra-corpo na taxa de desgaste do polioximetileno em ensaio pinto-contra-disco**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 18, n. 1-2, p. 87-94, 2006.
- [51] MUHAMMAD NURUZZAMAN, D.; ASADUZZAMAN CHOWDHURY, M.; LUTFAR RAHAMAN, M. **Effect of duration of rubbing and normal load on friction coefficient for polymer and composite materials**. Industrial Lubrication and Tribology, v. 63, n. 5, p. 320-326, 2011.
- [52] HARSHA, A. P. **An investigation on low stress abrasive wear characteristics of high-performance engineering thermoplastic polymers**. Wear, v. 271, n. 5-6, p. 942-951, 2011.
- [53] PIENIAK, D; WALCZAK, A; NIEWCZAS. **Comparative study of wear resistance of the composite with microhybrid structure and nanocomposite**. Acta mechanica et automática, Białystok, 10, 4, p 1-4, Dec 2016
- [54] KONOVALOVA O. ET AL. **Tribological analysis of the nano-modified industrial Polymer**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION, 69, ed 24, 2014, Zadar. Elsevier, 2014. p 1481-1489
- [55] Y. Sahin; Mirzayev, H; Yalçinkaya, S. **The effect of load on the tribological property of polyacetal and metallographic observation**. in: Simposio Internacional de Mecanismos Maquinas e Ciência.2017. Baku Azerbaijão. Anais.
- [56] WIELEBA, W. **The mechanism of tribological wear of thermoplastic materials**. archives of civil and mechanical engineering, v. 7, n. 4, p. 185-199, 2007.
- [57] Callister, Willian D. Jr. **Características, aplicações, e o processamento dos polímeros**. In: _____. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002. 16-10 Características diversas, p 329-353
- [58] Sudeepan, J. et al. **Study of Friction and Wear of ABS/Zno Polymer Composite Using Taguchi Technique**. In: 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation, 6.3, 2014, Hyderabad. Elsevier, 2014. p 391-400.
- [59] CHANG, L; FRIEDRICH, K. **Enhancement effec of nanoparticles on the sliding wear of short fiber-reinforced polymercomposites: A critical discussion of wear mechanisms**. Tribology International, Kaiserslautern, 43, p 2355-2364, Sept. 2010.
- [60] BAKHAREVA, V. E.; NIKOLAEV, G. I.; ANISIMOV, A. V. **The improvement of functional features of antifriction polymer composites for sliding friction units**. Russian Journal of General Chemistry, v. 80, n. 10, p. 2081-2097, 2010.

[61] Avital, G. A; Moreto, J. A; Manfrinato, M. D; Rossino, L. S. **Study on Friction and Wear Behavior of SAE 1045 steel, reinforced Nylon 6.6 and NBR Rubber Used in Clutch Disks.** in: TECHNICAL MEETING OF MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 4th, 2014, São Carlos. Anais. São Paulo. Materials Research. 2014. p1397-1403.

[62] ROSA, A. G. D. A.; MORETO, J. A., MANFRIANTO, M. D.; ROSSINO, L. S. **Study on friction and wear behavior of SAE 1045 steel, reinforced nylon 6.6 and NBR rubber used in clutch disks.** Materials Research, v. 17, n. 6, p. 1397-1403, 2014.

[63] W. A. Brainard and D. H. Buckley, **Wear**, 26 (1973) 75.

[64] MUHANDES. H ET AL. **Analyses of abrasive wear behaviour in pin-on-plate tribo-system for several materials. In: Materials Science and Engineering**, 749.01, 2020. Godolo: Elsevier, 2020, p.1-9