

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

MATEUS BOBECK ISHIDA

MATHEUS TERPLAK BEÊ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE POLÍMEROS DE
ENGENHARIA EM DESLIZAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO CONTRA AÇO
INOXIDÁVEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc 2)

CURITIBA

2015

MATEUS BOBECK ISHIDA

MATHEUS TERPLAK BEÊ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE POLÍMEROS DE
ENGENHARIA EM DESLIZAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO CONTRA AÇO
INOXIDÁVEL**

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: João Luiz do Vale, MSc

Co-orientador: Carlos Henrique da Silva, Dr

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa “ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE POLÍMEROS DE ENGENHARIA EM DESLIZAMENTO SEM LUBRIFICAÇÃO CONTRA AÇO INOXIDÁVEL”, realizada pelos alunos Mateus Bobeck Ishida e Matheus Terplak Beê como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. MSc João Luiz do Vale
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva
DAMEC, UTFPR
Co-Orientador

Prof. MSc Samuel Soares Ansay
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz
DAQBI, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 05 de março de 2015.

RESUMO

Polímeros de engenharia são de grande uso na indústria devido a sua possível utilização sem o uso de óleos lubrificantes. O presente trabalho realizou um estudo do comportamento tribológico de cinco polímeros de engenharia em deslizamento, sem lubrificação, contra aço inoxidável AISI 304. Os polímeros que foram utilizados para o estudo são: polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM), polietileno de alta densidade (PEAD), poliamida 6.0 (PA 6.0), poliamida 6.6 (PA 6.6) e poliacetal (POM). O estudo se concentra em simular, em uma máquina construída no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR, um contato do tipo mancal de escorregamento sobre eixo, sobre uma mesma condição PV médio (produto da velocidade de deslizamento e da pressão média). Os ensaios tiveram primeiramente duração de 120 minutos e condição PV de $0,49 \text{ MPa.m.s}^{-1}$ e após a obtenção de alguns resultados, foram reduzidos para 70 minutos em condição PV de $0,22 \text{ MPa.m.s}^{-1}$. Realizam-se 3 repetições de ensaios para cada material polimérico. No ensaio foram coletados dados de uma célula de carga e de um termopar, possibilitando a avaliação do coeficiente de atrito cinético e da temperatura no contato. Com relação ao coeficiente de atrito o POM apresentou o maior valor (0,23) e o PEUAPM o menor valor (0,16) e a temperatura, para todos os polímeros, se concentraram na faixa de $41 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$. Também se calculou o coeficiente dimensional de Archard (coeficiente de desgaste) para os polímeros, como resultado obteve-se uma diferença na ordem de 10^{-1} em comparação com a literatura. Foram feitas análises para verificar as alterações impostas pelos ensaios nas características dos polímeros, a saber: Interferometria de luz branca, microscopia eletrônica de varredura e FTIR. A partir dessas, foi possível analisar o tipo de desgaste sofrido pelos polímeros, o qual foi em sua grande maioria desgaste adesivo. Com relação ao custo benefício da aplicação dos polímeros o PEAD e o P.A 6.0 apresentaram melhor aplicabilidade.

Palavras-chave: Atrito; Desgaste; Polímeros de engenharia; Deslizamento sem lubrificação; Mancais.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Exemplo de Buchas	5
Figura 2.2 – Exemplos de elementos girantes	5
Figura 2.3 – Ilustração da Lei de Amonton-Coulomb	6
Figura 2.4 – Ilustração Lei de Prandtl.....	7
Figura 2.5 – Comportamento inicial do coeficiente de atrito de polímeros em deslizamento sobre metal afetado pela diferença de rugosidade.	8
Figura 2.6 – Exemplo de curva de coeficiente de atrito cinético em função do tempo com a identificação de regiões de amaciamento, transição e estabilização com lubrificação.	9
Figura 2.7 – Gráfico coeficiente de atrito pelo tempo.	9
Figura 2.8 – Mecanismos de desgaste.....	11
Figura 2.9 - Mecanismo de formação e transferência de filme transferido de polímero	13
Figura 2.10 – Taxa de desgaste do polietileno de Ultra-alto peso molecular (PEUAPM) deslizando contra aço, em função da rugosidade da superfície do aço	13
Figura 2.11 - Mecanismo de transferência normal apresentado pela maioria dos	14
Figura 2.12 – Variação da taxa de desgaste estacionário com carga normal contra aço inox liso.	14
Figura 2.13 – Mecanismos típicos de desgaste abrasivo: (a) Microsulcamento, (b) Microcorte, (c) Microfadiga (d) Microlascamento.	15
Figura 2.14 – Demonstração esquemática da classificação do desgaste abrasivo: abrasão entre dois corpos (a) e Abrasão entre três corpos (b)	16
Figura 2.15 - Aumento da taxa de desgaste, devido à fadiga, em função da distância de deslizamento para o par PEUAPM-aço.....	17

Figura 2.16 - Comportamento do desgaste por fadiga em função da tensão de contato e da distância de deslizamento para o par PEUAPM-aço.	17
Figura 2.17 - Mecanismo de desgaste por fusão em polímeros causado por elevadas temperaturas de contato alcançadas durante o deslizamento.	18
Figura 2.18 – Profundidade de desgaste por tempo para o PE.....	19
Figura 2.19 - Mecanismos de fusão cíclica de polímeros em deslizamento a temperaturas abaixo da crítica: (a) início do processo de fusão (b) finalização da fusão da camada e reinício do ciclo.	19
Figura 2.20 - Diagrama esquemático da evolução de um simples contato entre duas asperezas movendo-se uma sobre a outra: (a) contato total (b) contato parcial (c) fim do contato.	20
Figura 2.21 – Diagrama do coeficiente de dimensional de Archard em função da pressão de contato para diversos materiais.....	21
Figura 2.22- Relação entre coeficiente de atrito cinético e carregamento normal para diversos polímeros em deslizamento sem lubrificação contra aço.....	22
Figura 2.23 - Temperatura x Tempo x Condição PV.	24
Figura 2.24 - Relação entre área real de contato, tensão cisalhante e temperatura.	25
Figura 2.25 – Relação entre coeficiente de atrito e temperatura para vários polímeros, em ensaios de deslizamento contra esferas de aço a baixas velocidades.	25
Figura 2.26 – Distribuição de pressão prismático no contato	26
Figura 2.27- Estrutura dos Polietilenos	29
Figura 2.28 - Reações para formação da Poliamida 6.0	31
Figura 2.29 - Reações para formação da Poliamida 6.0	31
Figura 2.30 - estrutura final da Poliamida 6.6.....	32
Figura 2.31 – Estrutura química do POM: homopolímero e copolímero	33
Figura 2.32 – Exemplo de aplicação POM	34

Figura 2.33 – Textura da superfície com rugosidade e ondulação (a) e textura após a aplicação do filtro (b).....	35
Figura 3.1- Dimensões das buchas de polímeros (corpo): Detalhes de fabricação e vista em perspectiva	39
Figura 3.2 - Dimensões do contra-corpo de aço inoxidável AISI 304 (contra corpo): Detalhes de fabricação e vista em perspectiva	39
Figura 3.3 - Análise dimensional Polímeros	40
Figura 3.4 - Medição da massa dos Polímeros	41
Figura 3.5 - Equipamento de interferômetro de luz branca para medições 3D	42
Figura 3.6 - Local mostrando a área de amostragem e sentido dos perfis de rugosidade nos corpos poliméricos.....	42
Figura 3.7 - Disposição dos polímeros após a metalização	43
Figura 3.8 - Microscópio Eletrônico de Varredura	44
Figura 3.9 – Metalizador Q150R ES.....	44
Figura 3.10 - Local mostrando a área de amostragem e sentido dos perfis de rugosidade obtidos nos contra-corpos de aço inoxidável.....	46
Figura 3.11 - Fotografias da máquina de atrito cinético tipo mancal sobre eixo: (a) visão geral (b) detalhe do sistema de medição da força transmitida à célula de carga, cujo dado é fundamental para obtenção do coeficiente de atrito cinético	47
Figura 3.12 - Fotografia da MAC mostrando, em detalhe, o modo de aplicação de carga através de sistema de peso morto	47
Figura 3.13 - Detalhes do corpo com adaptação do termopar para medição da temperatura no contato: (a) vista em perspectiva com detalhes acrescidos (b) fotografia da montagem do termopar no corpo.	48
Figura 3.14 - Vista explodida da montagem do corpo e contra corpo na MAC.	48
Figura 3.15 - Diagrama de corpo livre da haste de carga.	49

Figura 3.16 - Diagrama de corpo livre do corpo: (a) vista isométrica (b) vista no plano "xy"	50
Figura 4.1 - Gráficos Coeficiente de Atrito x Tempo.....	54
Figura 4.2 - Gráfico coeficiente de atrito condição 1	55
Figura 4.3 – Gráfico temperatura no contato condição 1	55
Figura 4.4 - Desgaste excessivo PEAD após 20 minutos de ensaio.....	56
Figura 4.5 - Desgaste excessivo PEUAPM após 90 minutos de ensaio	56
Figura 4.6 – Coeficiente de atrito dos ensaios.	58
Figura 4.7 – Coeficiente de atrito dos ensaios.	59
Figura 4.8 – Gráfico coeficiente de atrito em relação a massa específica.	60
Figura 4.9 – Temperatura no contato dos ensaios.	62
Figura 4.10 – Temperatura dos ensaios.....	63
Figura 4.11 – Espectros obtido a partir da análise de FTIR na superfície do P.A 6.066	
Figura 4.12 – Topografias do aço inoxidável: antes (a) e após o ensaio (b) em 3D..	67
Figura 4.13 – Topografias do aço inoxidável: antes (a) e após o ensaio (b) em 3D..	68
Figura 4.14 – Perfil de rugosidade do aço inoxidável: antes (a) e após o ensaio (b)	69
Figura 4.15 - MEV no Aço Inoxidável sem ser ensaiado.....	70
Figura 4.16 - MEV Aço Inoxidável ensaiado com PEUAPM.....	70
Figura 4.17 – Topografia do P.A 6.0 não ensaiado (a) e ensaiado (b).....	71
Figura 4.18 - Topografia do P.A 6.6 não ensaiado (a) e ensaiado (b).....	72
Figura 4.19 - Topografia do POM não ensaiado (a) e ensaiado (b)	72
Figura 4.20 - Topografia do PEAD não ensaiado (a) e ensaiado (b).....	72
Figura 4.21 - Topografia do PEUAPM não ensaiado (a) e ensaiado (b)	73
Figura 4.22 – Imagem em MEV do P.A 6.0 não ensaiado (a) e ensaiado (b) com 500x de aumento	74

Figura 4.23 – Imagem em MEV do P.A 6.6 não ensaiado (a) e ensaiado (b) com 500x de aumento	74
Figura 4.24 – Imagem em MEV do POM não ensaiado (a) e ensaiado (b) com 500x de aumento	75
Figura 4.25 – Imagem em MEV do PEUAPM com 50x de aumento	75
Figura 4.26 – Imagem em MEV do PEAD com 50x de aumento.....	76
Figura 4.27 - Imagem em MEV do PEUAPM com 2000x de aumento	77
Figura 4.28 - Imagem em MEV do PEAD com 2000x de aumento	77
Figura 4.29 - Imagem em MEV do P.A 6.0 com 2000x de aumento	78
Figura 4.30 - Imagem em MEV do P.A 6.6 com 2000x de aumento	79
Figura 4.31 - Imagem em MEV do POM com 2000x de aumento	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades do Aço Inoxidável AISI 304.	28
Tabela 2.2 - Propriedades do PEUAPM.....	30
Tabela 2.3 - Propriedades do PEAD	30
Tabela 2.4 - Propriedades da PA 6.0	32
Tabela 2.5 - Propriedades da PA 6.6	33
Tabela 2.6 - Propriedades do POM.....	34
Tabela 3.1 - Materiais e Equipamentos.....	38
Tabela 3.2 - Médias e desvio padrão dos diâmetros interno dos corpos	41
Tabela 3.3 - Médias e desvio padrão dos diâmetros interno dos contra corpos	45
Tabela 3.4 - Valores das constantes relacionadas ao contato entre corpo e contra corpo.	51
Tabela 3.5 - Planejamento dos ensaios para cada polímero (proposta 1l).	52
Tabela 3.6 - Planejamento dos ensaios para cada polímero (proposta 2).	53
Tabela 4.1 - Valores de temperatura e umidade relativa do laboratório.....	57
Tabela 4.2 - Valores de coeficiente de atrito e massa específica.....	60
Tabela 4.3 - Valores de temperatura e condutividade térmica.	63
Tabela 4.4 - Valores de taxa de desgaste mássico média dos ensaios com duração de 70 minutos.....	64
Tabela 4.5 – Coeficiente dimensional de Archard	65
Tabela 4.6 - Resultados de topografia para o aço inoxidável.....	67
Tabela 4.7 - Resultados de topografia para os polímeros.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI:	<i>American iron and steel institute;</i>
FTIR:	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier;
HDPE:	<i>High Density Polietilene</i>
IDLB:	Interferometria de luz branca;
LASC:	Laboratório de superfícies e contato;
MAC:	Máquina de atrito cinético;
MEV:	Microscopia eletrônica de varredura;
P.A 6.0:	Poliamida 6.0
P.A 6.6:	Poliamida 6.6
POM:	Poliacetal
PP:	Polipropileno;
PE:	Polietileno;
PET:	Politereftalato de etileno;
PEAD:	Polietileno de alto peso molecular;
PEUAPM:	Polietileno de ultra alto peso molecular.
PVC:	Policloreto de vinila;
PS:	Poliestireno;
PTFE:	Politetrafluoretileno;

LISTA DE SÍMBOLOS

A_r	Área real de contato [m^2];
A_{nom}	Área de contato nominal [m^2];
a_o	Raio da área de contato circular do modelo de Hertz [mm];
a_1	Coefficiente para modelo de atrito de Archard;
a_2	Coefficiente para modelo de atrito de Archard;
a	Metade da largura da região de contato do tipo cilindro-cilindro [mm];
B	Constante geométrica que depende dos raios de contato do corpo e contra corpo [mm^{-1}];
C_{mh}	Força atribuída a massa do conjunto da haste de carga medido no ponto de aplicação da carga normal no corpo [g];
d	Distância total de deslizamento durante o ensaio de desgaste [m];
D_c	Diâmetro externo do corpo [mm];
E_1	Módulo de elasticidade do contra-corpo [GPa];
E_2	Módulo de elasticidade do corpo [GPa];
F_{at}	Força de atrito na interface [N];
F_B	Força aplicada na célula de carga pelo parafuso do corpo [N];
F_c	Força peso das cargas aplicadas no tirante da haste de carga [N];
F_h	Força proveniente da massa da haste de carga considerada no ponto de aplicação da carga normal [N];
g	Aceleração da gravidade [$mm.s^{-2}$];
H	Dureza da superfície mais mole do par tribológico [N/mm^2];
i	Parâmetro de contagem [-];
K	Coefficiente de desgaste adimensional [-];
k	Coefficiente de desgaste dimensional [mm^3/Nm];
k_1	Constante dependente das propriedades do material do contra-corpo [GPa^{-1}];
k_2	Constante dependente das propriedades do material do corpo [GPa^{-1}];
L	Comprimento do contato entre o par tribológico ao longo do eixo dos cilindros [mm];
L_B	Distância do centro do corpo até a célula de carga [m];
L_c	Distância do centro de giro até o ponto da aplicação das cargas [mm];
L_{Ry}	Distância da força de atrito causada pelo rolamento até o centro de giro [mm];
L_{Rz}	Distância do centro da barra até os rolamentos [mm];
L_w	Distância do centro de giro até o ponto de aplicação da carga normal no corpo [mm];
L_x	Extensão da área de amostragem no eixo x [μm];
L_y	Extensão da área de amostragem no eixo y [μm];
m_B	Força transmitida pelo parafuso do corpo, à haste de transmissão de força e, medida na célula de carga [g];
m_c	Massa das cargas acrescentadas à MAC [g];
n_o	Rotação do eixo da MAC [rpm];
O_x	Força de reação no ponto de articulação da haste de carga no eixo x [N];
O_y	Força de reação no ponto de articulação da haste de carga no eixo y [N];
P_{max}	Pressão máxima do contato entre corpo e contra-corpo [MPa];
$P_{média}$	Pressão média do contato entre corpo e contra-corpo [MPa];
PV	Parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [$MPa.m.s^{-1}$];
PV_{max}	Condição máxima para parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [$MPa.m.s^{-1}$];
$PV_{média}$	Condição média para parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [$MPa.m.s^{-1}$];
Q	Volume desgastado por distância de deslizamento [m^3/m];
R_1	Raio externo do contra-corpo [mm];
R_2	Raio interno do corpo [mm];
S_a	Parâmetro de rugosidade relacionado com a média aritmética das alturas das rugosidades [μm];
S_{ds}	Parâmetro de rugosidade relacionado à densidade de asperezas por área [mm^{-2}];

S_q	Parâmetro de rugosidade relacionado com a média quadrática das alturas das rugosidades [μm];
S_p	Parâmetro de rugosidade relacionado à altura do maior pico de rugosidade da área de amostragem [μm];
S_v	Parâmetro de rugosidade relacionado à profundidade do vale mais profundo da área de amostragem [μm];
S_z	Parâmetro de rugosidade relacionado com a média de dez pontos da rugosidade, sendo cinco valores associados aos picos mais altos e outros cinco associados aos vales mais profundos [μm];
t	Tempo de duração do ensaio de desgaste;
T	Temperatura no contato [$^{\circ}\text{C}$];
V	Velocidade de deslizamento no contato [m/s];
Y	Tensão de escoamento [MPa];
£	Libra esterlina;
μ	Coefficiente de atrito do par tribológico [-];
ν_1	Coefficiente de Poisson do contra-corpo [-];
ν_2	Coefficiente de Poisson do corpo [-];
$\sigma_{\mu t}$	Tensão de ruptura do material [MPa];
η_{p_i}	Altura dos picos mais altos da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];
η_{v_i}	Altura dos vales mais profundos da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];
$\eta_{p_{max}}$	Altura do maior pico da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];
$\eta_{v_{max}}$	Altura do maior vale da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];
ξ	Número de picos da área de amostragem [-];

SUMÁRIO

RESUMO	i
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ii
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivo principal.....	1
1.1.2 Objetivos secundários.....	1
1.2 Justificativa.....	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Mancal.....	3
2.1.1 Tipos de mancais	3
2.1.1.1 Mancal de Escorregamento.....	4
2.1.1.2 Mancal de Rolamento.....	5
2.2 Atrito.....	5
2.2.1 Leis do Atrito	6
2.2.1.1 Lei de Amonton-Coulomb.....	6
2.2.1.2 Lei de Prandtl	6
2.2.1.3 Lei de Wanheim-Bay (Modelo Misto).....	7
2.2.2 Coeficiente de atrito de polímeros em deslizamento sobre aço.....	8
2.3 Desgaste	10
2.3.1 Desgaste Adesivo	11
2.3.2 Desgaste Abrasivo	14
2.3.3 Desgaste por Fadiga.....	16
2.3.4 Desgaste por Fusão.....	17
2.4 Modelo de Archard	20
2.5 Severidade no contato.....	22
2.5.1 Pressão de contato	22
2.5.2 Velocidade de deslizamento	23
2.5.3 Condição PV	23
2.5.4 Relação Coeficiente de atrito Vs Temperatura de contato.....	24
2.6 Distribuição de pressão no par tribológico	25
2.7 Materiais.....	27
2.7.1 Aço Inoxidável.....	27
2.7.2 Polímeros	28
2.7.2.1 Polietilenos	28
2.7.2.1.1 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular.....	29
2.7.2.1.2 Polietileno de Alta Densidade	30
2.7.2.2 Poliamidas	30
2.7.2.2.1 Poliamida 6.0.....	31
2.7.2.2.2 Poliamida 6.6.....	32

2.7.2.3	Poliacetal	33
2.8	Topografia	34
2.8.1	Parâmetro Sa	35
2.8.2	Parâmetro Sq	36
2.8.3	Parâmetro Sz	36
2.8.4	Parâmetro Spd	37
2.8.5	Parâmetro Ssk	37
3	Materiais e métodos	38
3.1	Materiais	38
3.1.1	Corpos de Prova	39
3.1.2	Polímeros	40
3.1.2.1	Análise dimensional	40
3.1.2.2	Desgaste mássico	41
3.1.2.3	Análise topográfica	41
3.1.2.4	Microscopia eletrônica por varredura (MEV)	43
3.1.2.5	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	44
3.1.3	Aço Inox	45
3.1.3.1	Análise dimensional	45
3.1.3.2	Desgaste mássico	46
3.1.3.3	Análise topográfica	46
3.1.3.4	Microscopia eletrônica por varredura (MEV)	46
3.2	Aparato	47
3.2.1	Modelo de atrito cinético para as condições geométricas da MAC	49
3.3	Atmosfera do laboratório	50
3.4	Planejamento e variáveis dos ensaios	51
3.4.1	Proposta 1	52
3.4.2	Proposta 2	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	Proposta 1	54
4.2	Proposta 2	57
4.2.1	Atmosfera do Laboratório	57
4.2.2	Coeficiente de atrito cinético	58
4.2.3	Temperatura no contato	61
4.2.4	Desgaste	64
4.2.4.1	Taxa de desgaste mássico médio	64
4.2.4.2	Coeficiente dimensional de Archard	65
4.2.5	Análise de FTIR	66
4.2.6	Alterações de topografia das superfícies submetidas ao desgaste	67
4.2.6.1	Aço Inoxidável	67
4.2.6.2	Polímeros	71
5	CONCLUSÕES	80
6	REFERÊNCIAS	82
	ANEXO A – Certificado de materia prima: AÇO INOXIDÁVEL	85
	ANEXO B – Certificado de materia prima: POM	86

ANEXO C – Certificado de materia prima: PA 6.6	87
ANEXO D – Certificado de materia prima: PA 6.0	88
ANEXO E – Certificado de materia prima: PEAD	89
ANEXO F – Certificado de materia prima: PEUAPM	90

1 INTRODUÇÃO

O tema a ser estudado é o comportamento tribológico sem lubrificação dos polímeros polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM), polietileno de alta densidade (PEAD), poliamida 6.0 (PA 6.0), poliamida 6.6 (PA 6.6) e poliacetal (POM) sobre o aparato de máquina de atrito cinético. Em seu contexto geral esse estudo aplica-se a ciência que estuda o atrito, a tribologia.

O termo “Tribologia” tem origem Grega (*τριβω* 'tribo' significando 'esfregar, atritar, friccionar', e *λόγος* 'logos' significando 'estudo'). A principal motivação para estudo do tema teve realmente início em 1966, quando o governo do Reino Unido fez um levantamento de custos estimando o quanto as empresas do país deixariam de gastar caso princípios básicos de tribologia fossem aplicados nas indústrias. Na época do estudo estimou-se que a economia de energia caso esses princípios fossem aplicados poderia chegar a £26 milhões de um total de £86 milhões, representando cerca de 30% de economia (HUTCHINGS, 1998).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

- 1) Avaliação do comportamento tribológico do polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM), poliamida 6.0 (PA 6.0), poliamida 6.6 (PA 6.6) e poliacetal (POM) em contato com o aço inoxidável AISI 304 através de ensaios experimentais do tipo mancal sobre eixo sem lubrificação.

1.1.2 Objetivos secundários

- 1) Cálculo do coeficiente de atrito e a temperatura no contato, em função do tempo, para cada material polimérico sob mesma condição PV.
- 2) Avaliação do período de amaciamento dos polímeros e também o ponto de estabilização.
- 3) Avaliação do desgaste ao qual os corpos poliméricos foram submetidos a partir de análises de MEV, Interferometria e FTIR.
- 4) Avaliação da taxa de desgaste mássico dos polímeros.
- 5) Cálculo do coeficiente dimensional de Archard.

1.2 Justificativa

A utilização de polímeros como mancais de deslizamento sem lubrificação é pouco utilizada na indústria, a partir dos ensaios foi possível a obtenção de dados que podem auxiliar projetistas na especificação de materiais para esse tipo de mancal. Com o levantamento do coeficiente de atrito e do desgaste sofrido pelos polímeros, projetista podem determinar um tempo de vida útil para o componente a ser especificado.

A escolha dos polímeros se deu devido a sua grande aplicação na engenharia e na fabricação de componentes mecânicos, como por exemplo mancais e engrenagens.

Outro ponto levantado foi o fato do trabalho estudar o deslizamento de polímeros sem lubrificação. Com relação a esse assunto, vale ressaltar dois pontos: a economia que a não utilização de lubrificantes pode trazer para uma indústria e a questão ambiental. Uma empresa que tem o compromisso com o meio-ambiente e que busca ter certificações, como, por exemplo, a ISO 14001, preocupa-se com o armazenamento, obtenção e principalmente descarte dos resíduos. Os lubrificantes, após o uso, devem ser apropriadamente descartados. Para se efetuar o descarte de forma com que atenda as especificações da ISO 14001, existe um custo elevado. Com a utilização de polímeros sem lubrificação essa preocupação passa a não ser necessária, surgindo a oportunidade de, ao mesmo tempo, reduzir custos para a empresa e contribuir para a preservação do meio-ambiente.

Vale ressaltar que esse trabalho é considerado uma continuidade de estudo já realizado na instituição, uma vez que foi utilizada uma máquina de atrito cinético e modelo para cálculo do coeficiente de atrito cinético já desenvolvido por Vale (2014) para o polímero Politetrafluoretileno (PTFE).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo levanta embasamento teórico para entendimento do comportamento tribológico de polímeros de engenharia em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável. Temas como mancais, atrito, desgaste, pressão de contato, velocidade de deslizamento, polímeros (PEUAPM, PEAD, P.A 6.0, P.A 6.6 e POM), aço inoxidável AISI 304, distribuição de pressão no contato e modelo para cálculo do coeficiente de atrito são apresentados nesta seção.

2.1 Mancal

A definição de mancal pode ser designada genericamente como um dispositivo mecânico composto por uma parte fixa (geralmente de aço, ferro fundido ou outro material estrutural) e outro elemento com movimento relativo de rotação, escorregamento ou o conjunto dos dois movimentos. Com o intuito de reduzir o atrito e remover o calor gerado geralmente são utilizados lubrificantes. Para Shigley (2005), mancal é definido como um dispositivo fixo fechado, sobre o qual é apoiado um eixo. Sua principal função é comportar um eixo.

Os principais tipos são: o mancal de deslizamento, na qual há uma bucha de material macio entre a base do mancal e o eixo, tratando-se de uma solução para baixas rotações; e o mancal de rolamento, adequado para maiores rotações. Essas duas formas de mancais serão detalhadas a seguir.

2.1.1 Tipos de mancais

Existem vários tipos de mancais, podendo ter lubrificação ou não. No presente trabalho serão discutidos os dois principais tipos:

- a) Mancal de escorregamento, ou de deslizamento, ou ainda bucha;
- b) Mancal de rolamento, ou simplesmente rolamento;

O objetivo da lubrificação consiste em reduzir a fricção, o desgaste e o aquecimento das peças de máquina que se movem relativamente umas às outras. Um lubrificante é qualquer substância que, quando inserida no contato, roda ou oscila dentro do mancal (SHIGLEY et al.,2005). Para Norton (2004) existem três tipos gerais de lubrificação: Filme completo (hidrostática, hidrodinâmica e elasto-

hidrodinâmica), filme misturado e lubrificação de contorno. Seguindo os conceitos de Shigley *et al.* (2005), a lubrificação hidrodinâmica significa que as superfícies de carregamento de carga do mancal encontram-se separadas por um filme relativamente espesso de lubrificante de tal modo que não haja contato metal-metal. Este tipo de lubrificação independe da introdução do lubrificante sob pressão, embora possa ocorrer. A lubrificação estática, é obtida pela introdução de lubrificante, ar ou água na área de suporte de carga sob pressão elevada, para separar as superfícies com um filme espesso. Para lubrificação elasto-hidrodinâmica, a definição citada é do fenômeno que ocorre quando um lubrificante é injetado entre superfícies que estão em contato rolante, como por exemplo, engrenagens acopladores ou mancais de rolamento tendo como base explicativa, a teoria hertziana de tensão de contato e mecânica de fluido.

A lubrificação de contorno refere-se a situações nas quais alguma combinação da geometria da interface, nível de cargas elevadas, baixa velocidade, ou quantidade insuficiente de lubrificante excluem a iniciação de uma condição hidrodinâmica. As propriedades das superfícies constantes e as propriedades do lubrificante distintas da viscosidade volumétrica determinam o desgaste e o atrito nessa situação (NORTON, 2004).

2.1.1.1 Mancal de Escorregamento

Para este tipo de mancal, o exemplo a ser mencionado é uma camisa ao redor do diâmetro externo de um eixo girante, como pode ser observada na Figura 2.1. Quando a camisa for fechada totalmente formando um anel completo ao redor do eixo, o mancal é designado como Bucha, podendo ser uma bucha denominada fixa ou bi partida.

Os mancais já são constituídos de uma bucha fixada em um suporte e são utilizados em máquinas pesadas e em equipamentos de baixa rotação, porque a baixa velocidade evita o superaquecimento dos equipamentos expostos ao atrito. A função do mancal de deslizamento é servir de apoio para eixos girantes. Estes mancais estão sujeitos às forças de atrito devido à rotação do eixo, ou seja, o atrito ocorre devido ao contato da superfície do eixo com o mancal. (FERNANDES *et al.* 2012).

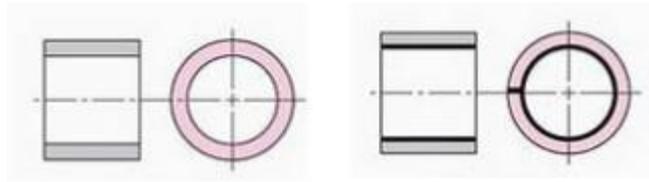


Figura 2.1 – Exemplo de Buchas

Fonte: Shigley (2005).

2.1.1.2 Mancal de Rolamento

O atrito do rolamento gera um atrito menor se comparado com o atrito de deslizamento. Estes são formados por um anel externo com pista, um elemento girante como: (a) rolo reto; (b) rolo esférico axial; (c) rolo cônico axial; (d) agulha; (e) rolo cônico e, (f) rolo de ângulo íngreme, que podem ser observados na Figura 2.2.

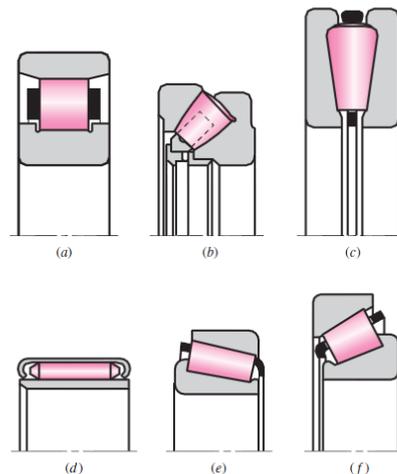


Figura 2.2 – Exemplos de elementos girantes

Fonte: Shigley (2005).

2.2 Atrito

Atrito pode ser definido como a resistência de movimento de um corpo sobre o outro. Esse movimento relativo pode ser na forma de deslizamento ou na forma de rolamento (HUTCHINGS, 1992). A energia dissipada por atrito na forma de calor não consegue ser reaproveitada.

Depois de simples experimentos, Leonardo da Vinci (1452-1519), primeira pessoa a tentar mensurar a atrito, chegou a duas conclusões:

- i) O atrito independe da área de contato quando uma mesma força é aplicada sobre determinado corpo
- ii) O atrito depende das superfícies dos materiais em contato (CANGUNDO, 2009).

A partir do estudo desse fenômeno elaboraram-se três leis do atrito que serão detalhadas a seguir.

2.2.1 Leis do Atrito

2.2.1.1 Lei de Amonton-Coulomb

A lei de Amonton-Coulomb, também conhecida como lei clássica do atrito (CANGUNDO, 2009), é caracterizada pela deformação de um material de superfície mais dura em contato com uma superfície mais macia (LUDEMA; TABOR, 1966). Essa força de deformação é originária da passagem da aspereza de uma superfície pela outra (Figura 2.3), ou seja, devido às pequenas imperfeições nas superfícies dos materiais em contato (HUTCHINGS, 1998).

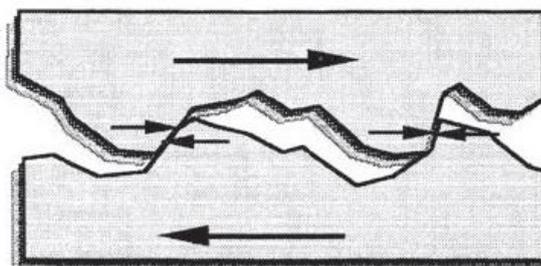


Figura 2.3 – Ilustração da Lei de Amonton-Coulomb
Fonte: Blau (2009).

2.2.1.2 Lei de Prandtl

Chamada de lei de atrito constante ou lei de Prandtl, ela assume que a tensão de corte é proporcional a força necessária para que ocorra a deformação plástica do material e é dada pela Equação (1).

$$\delta = m \times k \tag{1}$$

Na qual:

- δ = tensão de corte

- m = fator proporcionalidade, que varia de 0 a 1
- k = tensão máxima de corte do material

Essa lei complementa a de Amonton-Coulomb, a qual pode ser aplicada para pressões superiores aquelas aplicadas na lei de Amonton-Coulomb.

2.2.1.3 Lei de Wanheim-Bay (Modelo Misto)

Chamada de teoria da adesão (CANGUNDO, 2009) é caracterizada pela interação das superfícies devido às ligações secundárias que ocorrem entre os corpos (LUDEMA; TABOR, 1966). Essa força de adesão é originária na área real de contato entre as superfícies (HUTCHINGS, 1998). Uma ilustração dessa força de atrito pode ser vista na Figura 2.4.

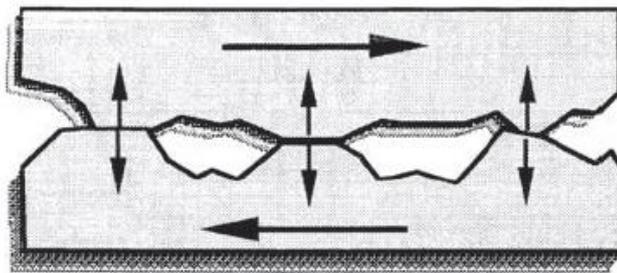


Figura 2.4 – Ilustração Lei de Prandtl
Fonte: Blau (2009).

Considerando uma interação entre asperezas A necessidade de se considerar a interação entre asperezas vizinhas fez com que este problema fosse estudado por Wanheim, Bay *et al* (1985). Estes estudos foram resumidos por Bay (1985). Considerando a área real de contato e a deformação plástica das asperezas, o estudo propôs um modelo de atrito, que assume que o atrito e a pressão são proporcionais simplesmente até o limite da proporcionalidade

Segundo Hutchings (1998), as leis do atrito descritas acima não podem ser tratadas independentes, mas para se tornar conveniente pode-se considerar a contribuição de cada parcela de forma independente. A componente da força final de atrito pode ser visualizada na Equação (2).

$$F_{\text{atrito}} = F_{\text{adesão}} + F_{\text{deformação}} \quad (2)$$

2.2.2 Coeficiente de atrito de polímeros em deslizamento sobre aço.

Segundo Blau (2009), o coeficiente de atrito pode apresentar um comportamento instável em seus primeiros momentos de movimento até estabilização. A curva de coeficiente de atrito se molda ao conjunto de fatores de instabilidade, não se atendo a uma única causa. Superfícies contaminadas, diferenças de rugosidade, rebarbas, orientações de estrutura são possíveis causas citadas como relevantes neste comportamento, que pode ser observado na Figura 2.5.

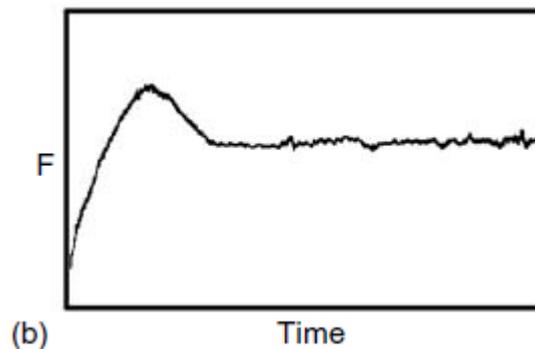


Figura 2.5 – Comportamento inicial do coeficiente de atrito de polímeros em deslizamento sobre metal afetado pela diferença de rugosidade.

Fonte: Blau (2009)

Também foi observado por Blau (2009) um período caracterizado como período de transição. Em sua teoria, este período está relacionado com o aumento tanto da temperatura, quanto da área nominal de contato, como pode ser observado na Figura 2.6.

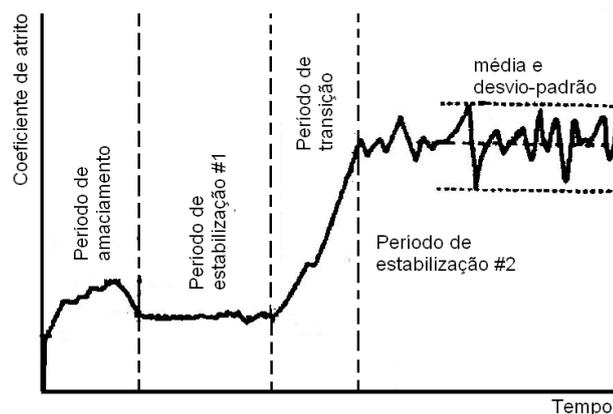


Figura 2.6 – Exemplo de curva de coeficiente de atrito cinético em função do tempo com a identificação de regiões de amaciamento, transição e estabilização com lubrificação.

Fonte: Blau (2009).

Em análises de coeficientes de atrito do tipo pino sobre disco, Ünlü *et al.* (2009) publicou resultados em condições de velocidade de 0,13 m/s e 20N de força normal. Inicialmente o POM se demonstrou com um coeficiente de atrito maior (0,35) que PA 6.0 (0,33), posteriormente houve uma tendência aos materiais apresentarem coeficientes de atrito próximos (a partir dos 60 min). Observam-se os resultados na Figura 2.7.

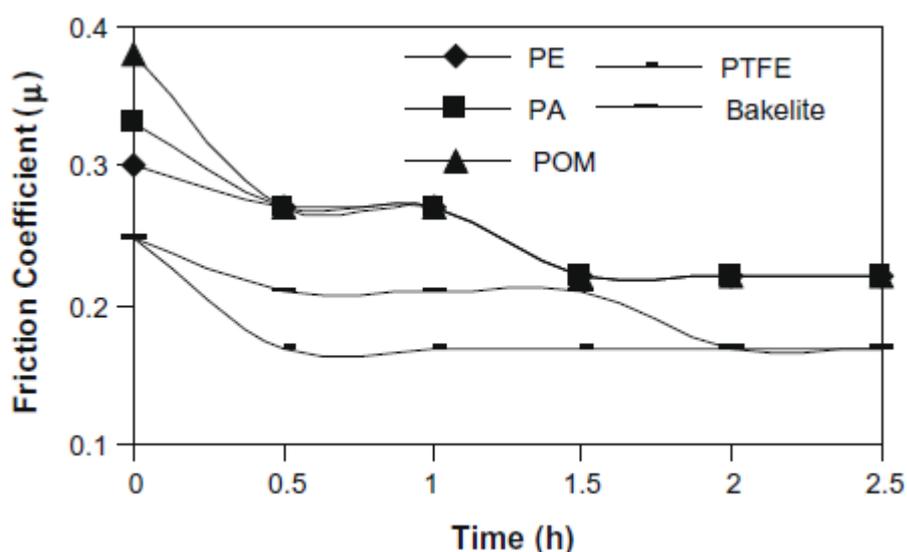


Figura 2.7 – Gráfico coeficiente de atrito pelo tempo.

Fonte: Ünlü *et al.* (2009).

Unal *et al.* (2004) analisou o coeficiente de atrito também através do mecanismo do tipo pino sobre disco entre P.A 6.6, POM, PEUAPM sobre aço inox,

com velocidade de 0,5 m/s e pressão de 0,35 MPA (condição PV = 0,18). Seus resultados mostraram que nessas condições os coeficientes de atrito foram muito próximos, 0,32, 0,31 e 0,30 respectivamente.

Em mecanismo semelhante, Chen *et al.* (2004) estudou os coeficientes em condições de velocidade de 0,42 m/s e força normal de 196 N sobre o P.A 6.6 e PEAD. Em suas conclusões, observa-se uma diferença grande a qual o coeficiente cinético do P.A 6.6 (0,67) foi superior ao PEAD (0,19).

2.3 Desgaste

Desgaste é um termo amplo que engloba vários tipos de falhas, todas envolvendo alterações nas superfícies da peça (NORTON, 2004). Quando duas superfícies estão em contato com movimento relativo, uma ou ambas as superfícies sofrerão desgaste (HUCHINGS, 1992). O atrito gerado pelo movimento entre partes móveis é a maior causa de desgaste e dissipação de energia (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001). Existe uma série de mecanismos de desgaste como os citados abaixo e ilustrados na Figura 2.8.

- a) Desgaste adesivo;
- b) Desgaste abrasivo;
- c) Desgaste por Fadiga;
- d) Desgaste por Fusão;
- e) Desgaste por Erosão;
- f) Desgaste por Cavitação
- g) Desgaste por Corrosão;
- h) Desgaste Oxidativo;

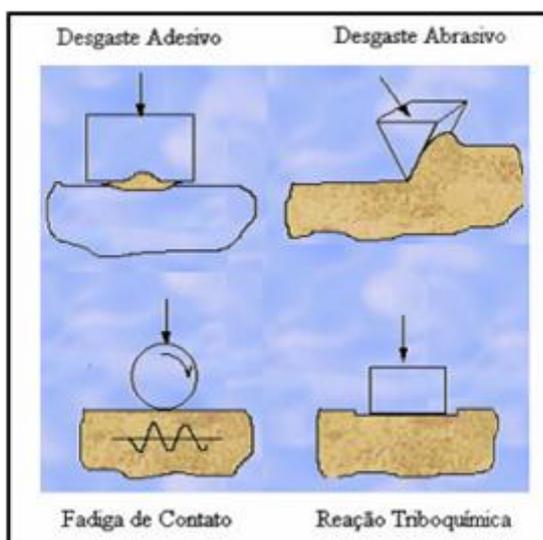


Figura 2.8 – Mecanismos de desgaste

Fonte: Brankovic, (1998)

Na prática, o desgaste de um componente numa aplicação tribológica é resultado da combinação de vários fenômenos e tipos de desgaste, situação que é dependente de vários parâmetros (YAMAGUCHI, 1990). Para o estudo tribológico aplicado a polímeros, os itens de desgaste (a), (b), (c) e (d), citados acima, detêm de maior relevância e serão detalhados nas seções seguintes.

2.3.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo ocorre devido à fratura das junções formadas, nos contatos, que falham devido ao movimento relativo das superfícies (KAR; BAHADUR, 1978). O desgaste adesivo ocorre preferencialmente quando a superfície do contra corpo é relativamente mais lisa, e o mecanismo de desgaste está associado à transferência de material para o contra corpo devido à adesão (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). Para contatos do tipo metal-polímero, Hutchings (1992) cita que a deformação ocorre predominantemente no polímero.

Existem tensões causadas pela adesão em materiais poliméricos que causam a quebra das ligações da cadeia e há a formação de radicais livres (BELYI *et al.*, 1977) e o cisalhamento interfamiliar fica diretamente ligado a geração de partículas (KAR; BAHADUR, 1978). Devido às forças de adesão, as camadas superficiais dos materiais são modificadas, quais sejam: a formação de novos grupos funcionais, a

formação de novas ligações com presença de átomos insaturados, o alinhamento de átomos e moléculas causando mudança na flexibilidade e mobilidade de macromoléculas (BELYI *et al.*, 1977).

Frequentemente uma mudança de ponto de fusão é observada após o deslizamento. Elas estão relacionadas tanto com mudanças de morfologia quanto a degradação do material. Como em um tratamento térmico superficial, muitas vezes a superfície é submetida a uma grande variação de temperatura, tendo as características do tratamento evidentes em alguns casos (KAR; BAHADUR, 1978).

Segundo Stachoviak e Batchelor (2001), são poucos os polímeros que apresentam este tipo de mecanismo, sendo algumas exceções: o polietileno de alta densidade (PEAD) e o polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM). Estes polímeros apresentam estruturas lineares, sem ramificações e sem polaridade, dando baixa força de coesão intermolecular com um alto grau de cristalinidade. Seu comportamento de formação de filmes é atribuído à suavidade e simetria das suas cadeias moleculares (HUTCHINGS, 1992).

Para alguns materiais com estrutura complexa, a qual é formada de camadas alternadas de cristalitos de cadeia dobrada, que apresentam alto índice de cristalinidade, e camadas amorfas formadas por moléculas de ligação relativamente mais fracas (CALLISTER, 2007). Se porventura este material for submetido a deslizamento contra uma superfície dura, resultará no desgaste do material através do desprendimento de camadas (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). Neste caso, em particular, segmentos de cadeia do material são desprendidos sem serem quebrados (BELYI *et al.*, 1977). Como pode ser observado nas Figuras 2.9 e 2.10.

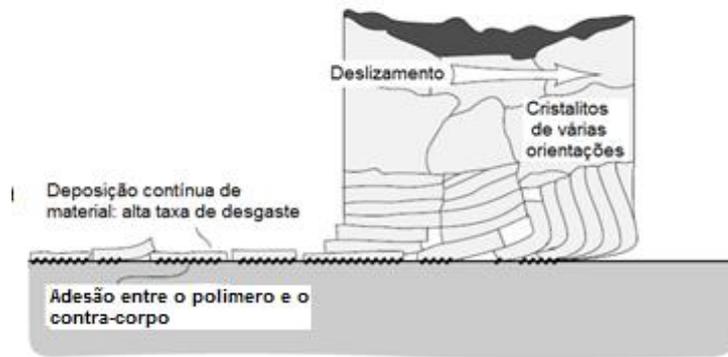


Figura 2.9 - Mecanismo de formação e transferência de filme transferido de polímero
 Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

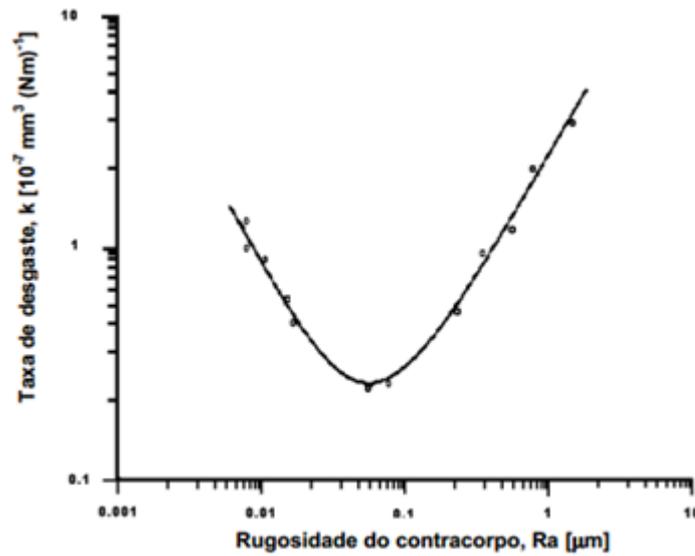


Figura 2.10 – Taxa de desgaste do polietileno de Ultra-alto peso molecular (PEUAPM) deslizando contra aço, em função da rugosidade da superfície do aço
 Fonte: Hutchings (1992)

Para outros materiais, geralmente os fragmentos de material se juntam ao contra corpo e são mais fortes que as ligações dentro do próprio polímero, assim a falha acontece deixando um fragmento transferido (Figura 2.11).

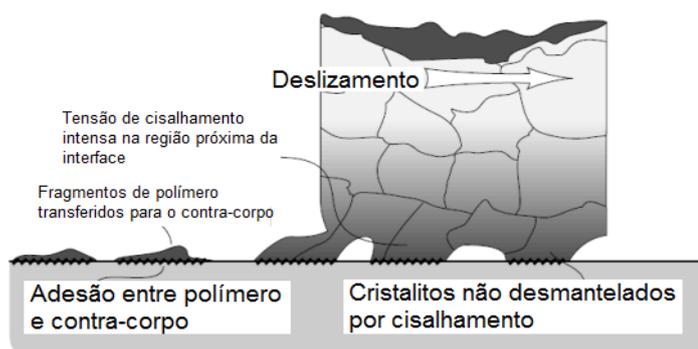


Figura 2.11 - Mecanismo de transferência normal apresentado pela maioria dos Polímeros.

Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

Há evidências que polímeros são relutantes para transferências adicionais em seus próprios filmes transferidos, e se o filme transferido adere fortemente ao contra corpo então a taxa de desgaste é baixa (HUTCHINGS, 1992), podendo ser observados exemplos na Figura 2.12.

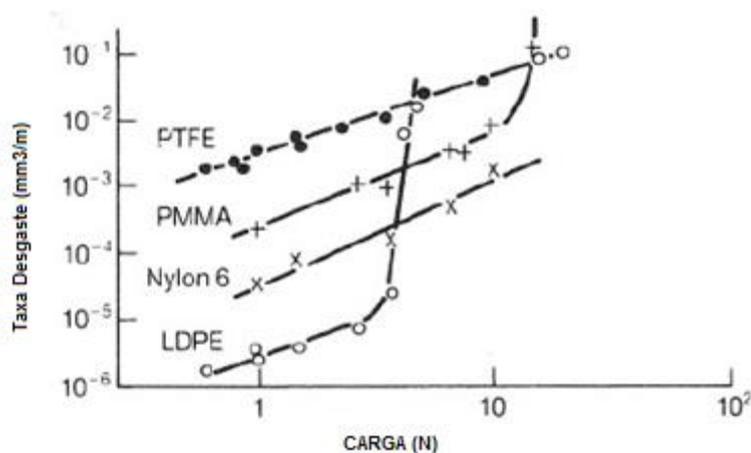


Figura 2.12 – Variação da taxa de desgaste estacionário com carga normal contra aço inox liso.
Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

2.3.2 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é uma deformação plástica ou sulcamento do polímero por uma protuberância rígida do contra corpo durante o deslizamento (KAR; BAHADUR, 1978). Para este caso os contatos entre os materiais precisam ser plásticos e a superfície do contra corpo ser relativamente rugosa. Existem quatro

classificações de micro mecanismos citados abaixo e mostrados na Figura 2.13 (VALE, 2014).

- a) Microsulcamento,
- b) Microcorte
- c) Microfadiga de baixo ciclo
- d) Microlascamento

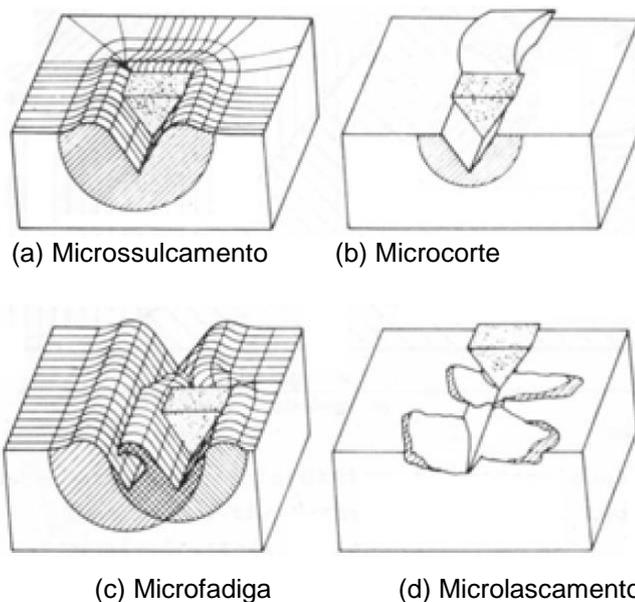


Figura 2.13 – Mecanismos típicos de desgaste abrasivo: (a) Microsulcamento, (b) Microcorte, (c) Microfadiga (d) Microlascamento.
Fonte: Zhum-Gahr (1987).

Para Zum-Gahr (1987), o desgaste abrasivo (Figura 2.14) é o deslocamento de material causado na presença de partículas duras entre suas superfícies que possuem movimento relativo. Tais partículas tem a probabilidade de estar entre superfícies ou incrustadas em uma delas. Protuberâncias duras em sua superfície podem ocasionar este tipo de desgaste.

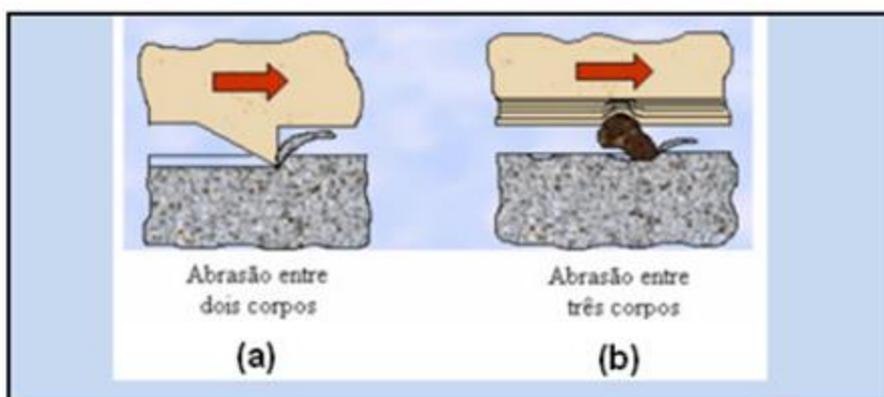


Figura 2.14 – Demonstração esquemática da classificação do desgaste abrasivo: abrasão entre dois corpos (a) e Abrasão entre três corpos (b)

Fonte: Brankovic (1998).

Para o modelo de desgaste de Archard (1953), que será abordado na seção 2.4, o desgaste por deslizamento apresenta-se inversamente proporcional à dureza do material com menor dureza. Para desgaste envolvendo mecanismos de abrasão, uma melhor correlação é verificada entre taxa de desgaste abrasivo e $1/\sigma_{ut}\epsilon_{ut}$, onde as variáveis são, respectivamente, tensão de ruptura à tração e alongação de ruptura, ambas medidas em testes convencionais de tensão. Esta correlação é chamada, muitas vezes, de correlação de Ratner-Lancaster. Em muitos estudos utiliza-se esta relação para verificar se há mudança no tipo de desgaste (DO VALE, 2014).

2.3.3 Desgaste por Fadiga

Desgaste por fadiga acontece através da formação de trincas em conjunto com a deformação elástica. O dano é acumulativo e se desenvolve para determinada condição com uma série de ciclos de contato. Partículas desprendidas são removidas por crescimento e interseção das trincas (HUTCHINGS, 1992).

Por exemplo, com uma taxa de desgaste do PEUAPM elevada aplicado a um longo tempo de deslizamento do aço com uma superfície lisa, haverá deformação e adesão nos contatos. Esse desgaste elevado coincidiu com o desenvolvimento de trincas e desprendimento de partículas associadas. (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001), sendo observado na Figura 2.15.

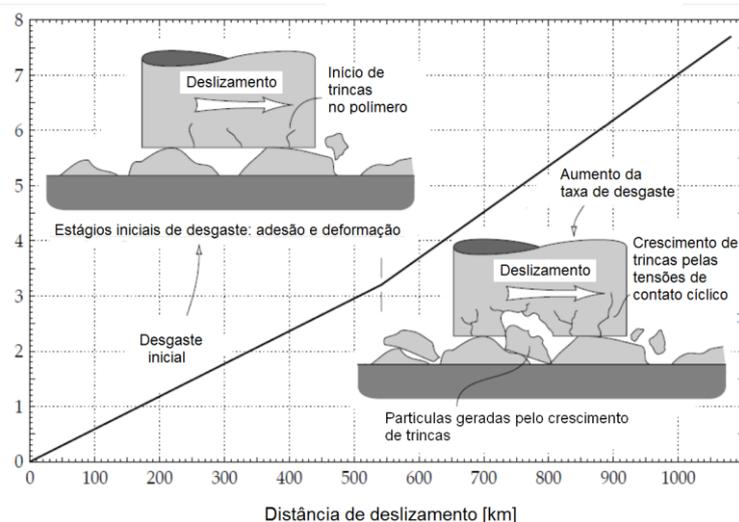


Figura 2.15 - Aumento da taxa de desgaste, devido à fadiga, em função da distância de deslizamento para o par PEUAPM-aço.

Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

Desgaste fadiga é mais provável de ocorrer em superfícies muito carregadas e com superfícies lisas, após um longo período de deslizamento. A relação experimental entre o início de desgaste por fadiga de PEUAPM e o contato aparente pode ser observado na Figura 2.16 (STACHOVIK E BATCHELOR, 2001).

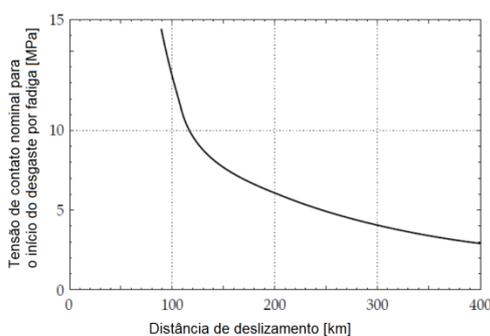


Figura 2.16 - Comportamento do desgaste por fadiga em função da tensão de contato e da distância de deslizamento para o par PEUAPM-aço.

Fonte: Adaptado de Stachoviak e Batchelor (2001).

2.3.4 Desgaste por Fusão

A maioria dos polímeros tende a derreter a temperaturas relativamente baixas. Se combinada com a baixa condutividade térmica de polímeros, as temperaturas de contato de fricção podem facilmente chegar ao ponto de fusão do polímero e causar

o derretimento da superfície. Quando o polímero funde seu atrito e desgaste são alterados (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001).

Este mecanismo de desgaste pode ser verificado por microscopia, ou ainda, por análise de vapores e decomposição de materiais, através de espectrômetros de massa durante altas velocidades de deslizamento (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001). O mecanismo é apresentado na Figura 2.17.

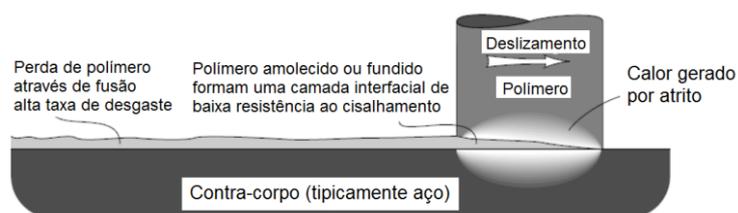


Figura 2.17 - Mecanismo de desgaste por fusão em polímeros causado por elevadas temperaturas de contato alcançadas durante o deslizamento.

Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

Com o aumento da temperatura de contato existe uma alteração da cinética de desgaste. Este fenômeno fica evidente a partir de um processo linear de velocidade constante para uma série de períodos de desgaste rápidos e discretos, separados por longos períodos de desgaste essencialmente insignificante. Quando a contra face é áspera, o desgaste procede de forma eficaz independente de um tipo de abrasivo de desgaste. Assim, para este caso, o desgaste se desenvolve de forma mais linear e mais lenta. Estes dois modos de desgaste observados para PEUAPM contra uma contra face de aço inoxidável estão ilustrados na Figura 2.18 (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001).

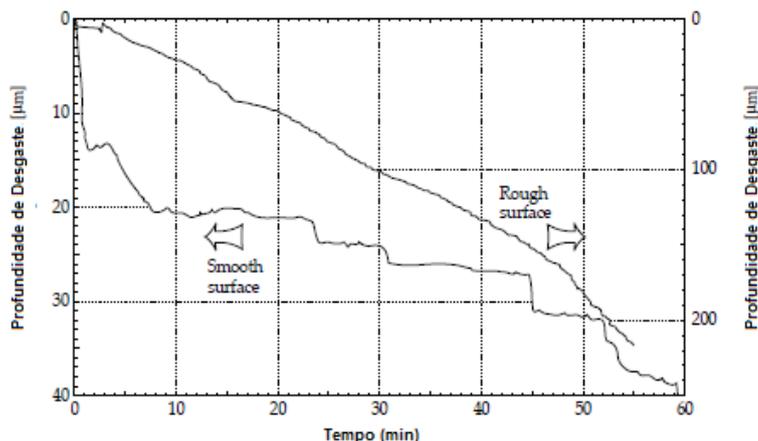


Figura 2.18 – Profundidade de desgaste por tempo para o PE.
Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

A temperatura crítica do contato não pode ser generalizada com a temperatura de fusão. A temperatura muitas vezes não é suficiente para fusão contínua do material por completo, somente parte do material e de maneira cíclica. O ciclo inicia-se com a fusão dos pontos mais quentes do contato e progride até a fusão completa de uma camada. Quando despreendida, inicia-se em uma nova camada (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). A Figura 2.19 mostra o processo em detalhes.

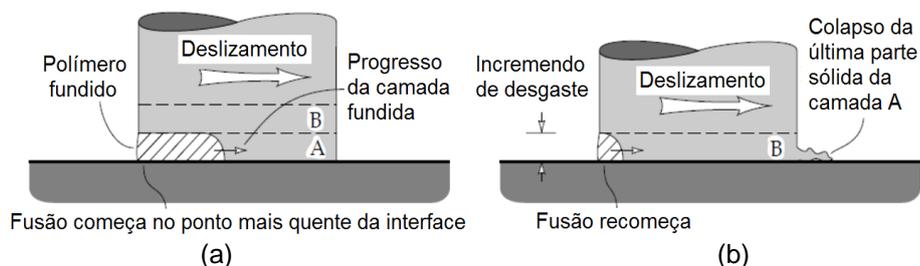


Figura 2.19 - Mecanismos de fusão cíclica de polímeros em deslizamento a temperaturas abaixo da crítica: (a) início do processo de fusão (b) finalização da fusão da camada e reinício do ciclo.
Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

Este tipo de desgaste está fortemente relacionado com a temperatura do contato e a severidade da condição imposta no deslizamento, sendo a última dependente de parâmetros como pressão de contato e velocidade de deslizamento (VALE, 2014).

Ao material ocorrem também fusões pontuais no polímero durante o deslizamento devido ao contato se restringir ao contato a área real de contato. No

topo das asperezas, as temperaturas são mais elevadas em relação à temperatura da interface e seus valores podem alcançar o ponto de fusão do material polimérico. Assim existem mudanças pontuais nas propriedades dos polímeros, que ainda não tem um efetivo efeito no mecanismo de desgaste por fusão (STACHOVIÁK; BATCHELOR, 2001).

2.4 Modelo de Archard

Uma teoria simples para a análise do desgaste foi originalmente desenvolvida por Archard (1953). O modelo propõe que o contato entre os corpos se dá através de interações entre as asperezas, onde a área de contato real, A_r [m^2], é proporcional ao carregamento, e com valor igual à soma das várias pequenas áreas (ΣA_i). Com o deslizamento haverá contato entre as asperezas quando uma passar sobre a outra, conforme mostrado na Figura 2.20. Para cada iteração desta, há uma possibilidade, ou probabilidade, de ocorrer desgaste (ARCHARD, 1953).

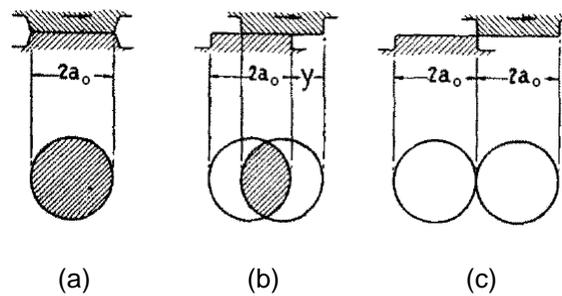


Figura 2.20 - Diagrama esquemático da evolução de um simples contato entre duas asperezas movendo-se uma sobre a outra: (a) contato total (b) contato parcial (c) fim do contato.

Fonte: Archard (1953)

A principal conclusão do modelo é que: o desgaste é proporcional ao carregamento e independe da área nominal de contato, mantendo relação inversa com a dureza do material mais mole (ARCHARD, 1953). O modelo é apresentado matematicamente na Equação (3):

$$Q = K \frac{F_N}{H} = kF_N \quad (3)$$

onde:

Q: Taxa de volume desgastado por distância de deslizamento [m^3/m];

K: Coeficiente de desgaste adimensional [-];

k: Coeficiente de desgaste Dimensional [m^3/Nm];

F_N : Carregamento normal [N];

H: Dureza da superfície mais mole [Pa].

Conforme a Equação (3), o volume desgastado é proporcional ao coeficiente de desgaste adimensional. O valor de K é sempre menor que a unidade e é adimensional (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). O Segundo Hutchings (1992), o coeficiente é um reflexo do número de ciclos de deformação requeridos por cada aspereza, antes que um fragmento de material seja removido.

O coeficiente de desgaste adimensional é um meio de caracterizar a severidade do desgaste e de comparar sistemas tribológicos (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). Em aplicações de engenharia, utiliza-se também, o coeficiente de desgaste dimensional, k [m^3/Nm], o qual é obtido com a razão de K/H (HUTCHINGS, 1992). Na Figura 2.21 pode-se ver um diagrama com os valores do coeficiente dimensional de Archard, em função da pressão de contato, para diversos materiais.

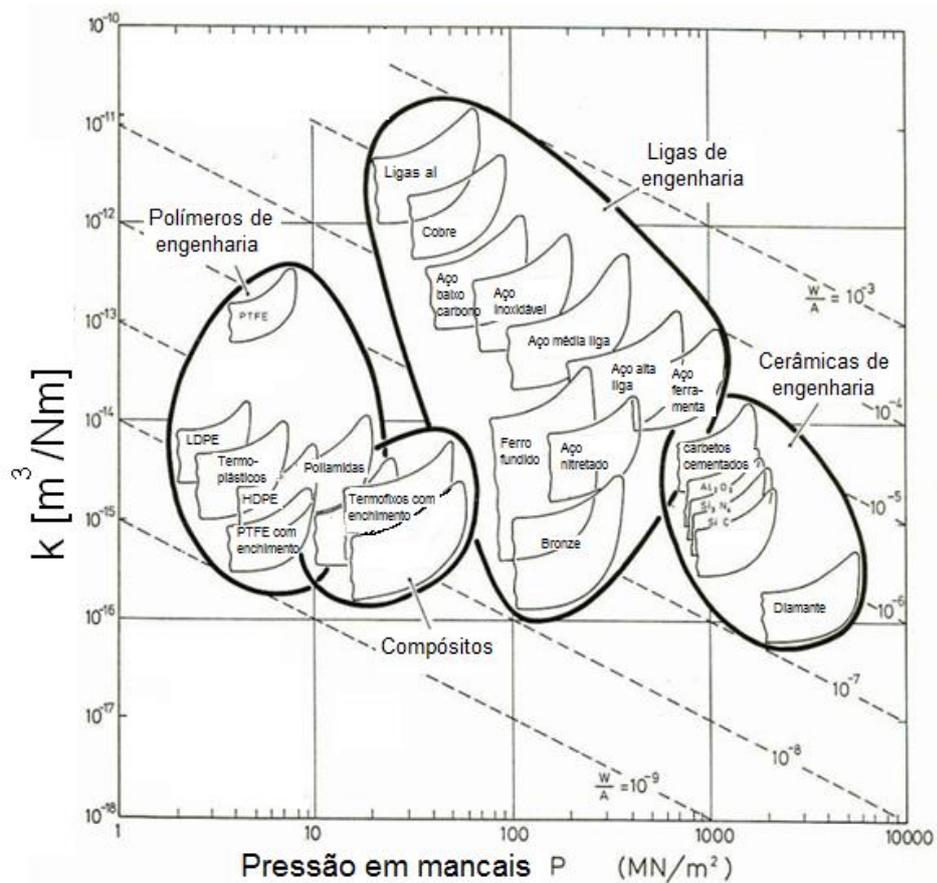


Figura 2.21 – Diagrama do coeficiente de dimensional de Archard em função da pressão de contato para diversos materiais.

Fonte: Ashby (1992).

2.5 Severidade no contato

A multiplicação da pressão de contato (P) pela velocidade de deslizamento (V) é conhecida como condição PV. Muitas vezes essa condição é um fator limitante para uma aplicação tribológica. Com esse parâmetro é possível quantificar a severidade ou agressividade de um contato. Esse conceito será detalhado nas próximas seções.

2.5.1 Pressão de contato

A pressão de contato é um importante parâmetro quando se analisa o desgaste de um material. Em especial materiais poliméricos, em comparação com metais, não podem ser submetidos a uma pressão normal muito elevada devido ao aumento do desgaste dimensional também se elevar.

Segundo Archard (1957) as variáveis, coeficiente de atrito e força normal de carregamento, são inversamente proporcionais na ordem exponencial de 1/3. Podemos ver essa relação na Equação (4).

$$\mu \propto F_N^{-0,33} \quad (4)$$

A Figura 2.22 mostra a relação do coeficiente de atrito e carregamento de quatro polímeros em deslizamento sem lubrificação contra aço. A partir dela, podemos comprovar a condição de proporcionalidade entre as variáveis citadas anteriormente.

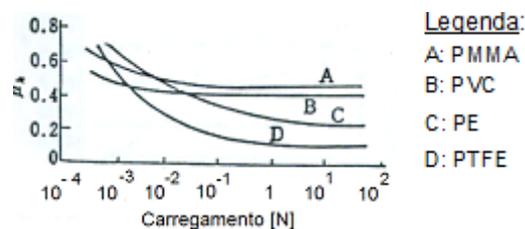


Figura 2.22- Relação entre coeficiente de atrito cinético e carregamento normal para diversos polímeros em deslizamento sem lubrificação contra aço.

Fonte: Yamaguchi (1990)

2.5.2 Velocidade de deslizamento

A relação entre velocidade de deslizamento e coeficiente de atrito é muito dependente das condições superficiais dos materiais em contato. Essa análise é complicada devido à temperatura de transição vítrea dos polímeros (YAMAGUCHI, 1990). Essa temperatura é definida como a temperatura de transição em que um material deixa de apresentar as características de uma borracha e apresenta as características de um sólido rígido (CALLISTER, 2007).

Segundo estudos desenvolvidos por Quaglini *et al.* (2009), para polímeros, é possível notar um aumento do coeficiente de atrito cinético com o aumento da velocidade de deslizamento.

2.5.3 Condição PV

Conforme citado anteriormente, a partir da multiplicação das variáveis, pressão de contato e velocidade de deslizamento, é possível quantificar a severidade da aplicação tribológica. O produto dessas variáveis tem como resultado dimensional $\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Para a análise da condição PV é necessário a classificação do termo PV limite e temperatura limite. Esses termos representam valores máximos ao qual determinado material suporta em uma aplicação tribológica, ou seja, se a aplicação apresentar uma condição PV muito elevada o desgaste imposto ao material será muito mais severo devido ao aumento da temperatura no contato levando o material a fusão ou queima. A Figura 2.23 exemplifica esse processo, diversas condições PV tendem a estabilizar a temperatura com o decorrer de determinado tempo, porém, se essa temperatura for muito elevada a tendência é a condição PV não ser mais constante, esse valor de PV é chamado de condição limite.

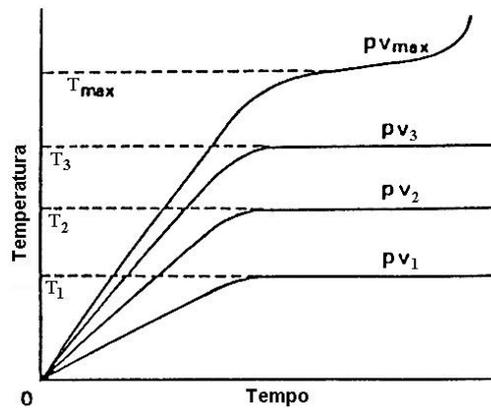


Figura 2.23 - Temperatura x Tempo x Condição PV.
Fonte: Yamaguchi (1990).

A importância de se manter uma condição PV constante é a possibilidade de comparar diferentes dados entre materiais e ensaios, ou seja, ensaiar diferentes materiais sob a mesma condição e analisar o comportamento de cada um deles.

Segundo Bhushan (2002), a condição PV tem influência na taxa de desgaste mássico e na energia dissipada na interface. Essa relação pode ser vista nas Equações (5) e (6):

$$\dot{m} = \gamma A_r PV_{m\acute{e}dia} \quad (5)$$

$$\dot{Q} = \mu A_r PV_{m\acute{e}dia} \quad (6)$$

2.5.4 Relação Coeficiente de atrito Vs Temperatura de contato

Para Yamaguchi (1990), o comportamento do módulo de elasticidade e da tensão de cisalhamento é complexo e apresenta descontinuidades para temperaturas da região de transição vítrea e próximo da temperatura de fusão do material, existem relações com a área de contato, tensão cisalhante e temperatura como ilustrado pela Figura 2.24.

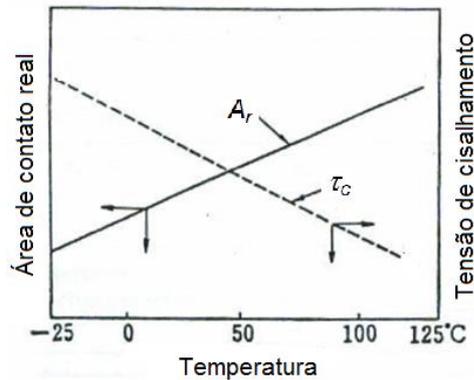


Figura 2.24 - Relação entre área real de contato, tensão cisalhante e temperatura.
Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990).

Logo o estudo da relação entre o coeficiente de atrito dos materiais poliméricos com a temperatura é complexo e é uma combinação dos efeitos citados, uma relação entre o coeficiente de atrito e temperatura para vários materiais poliméricos em deslizamento contra aço é descritos na Figura 2.25.

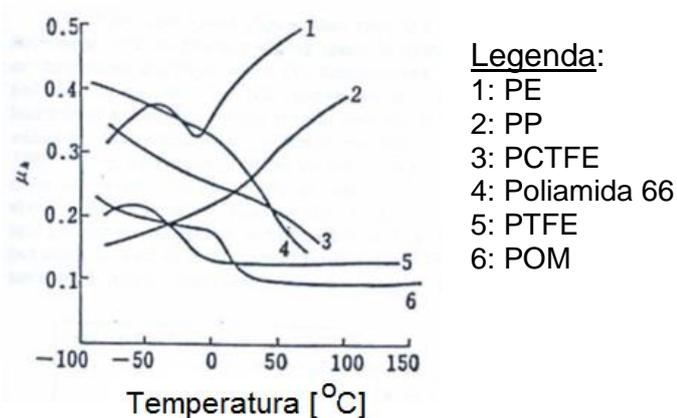


Figura 2.25 – Relação entre coeficiente de atrito e temperatura para vários polímeros, em ensaios de deslizamento contra esferas de aço a baixas velocidades.
Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990).

2.6 Distribuição de pressão no par tribológico

É de extrema importância estudar como se dá a distribuição de pressão no par tribológico. Entende-se que no caso do trabalho proposto o contato é entre cilindros. Segundo Norton (2004), esse tipo de contato é muito usado em processos de laminação e calandragem, além em rolamentos do tipo rolo.

Pode-se ver na Figura 2.26 a distribuição de pressão no contato, com a pressão máxima no centro da distribuição e a zona de contato de Hertz como área de contato entre as duas superfícies cilíndricas. As chamadas tensões de contato ou tensões de Hertz surgem nessa área quando o acoplamento, ao girar, faz com que as duas superfícies entrem em contato por um período de tempo pequeno, mas de formar sucessiva. Esse comportamento pode levar a fadiga superficial de um dos materiais em contato Norton (2004).

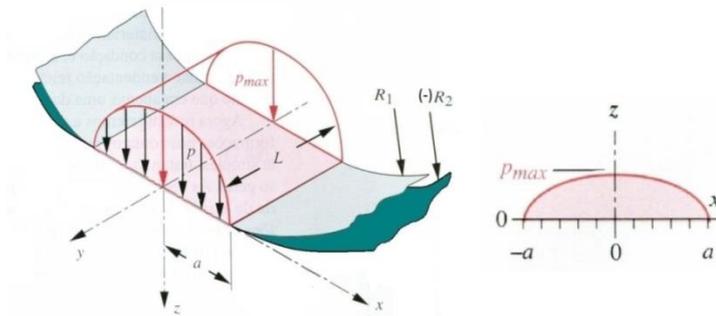


Figura 2.26 – Distribuição de pressão prismática no contato
Fonte: Norton (2004).

O valor para o tipo de contato de dois cilindros, segundo Norton (2004), faz-se considerando a força normal, F_N [N], aplicada na região de contato igual ao volume do prisma semi-elíptico, conforme Equação (7). Na qual, L é o comprimento de contato.

$$F_N = \frac{1}{2} \pi a L P_{max} \quad (7)$$

Define-se uma constante geométrica, B [mm^{-1}], dependente dos raios dos cilindros conforme Equação (8).

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

O valor da largura a , da distribuição de pressão apresentada na Figura 2.26, referente à metade da largura do prisma, é então calculada a partir da Equação (9).

$$a = f(F_N) = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{k_1 + k_2}{B} \cdot \frac{F_N}{L}} \quad (9)$$

Cujas constantes k_1 [GPa⁻¹] e k_2 [GPa⁻¹], são definidas, respectivamente, como:

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (11)$$

Em que:

E_1 : Módulo de elasticidade do contra-corpo [GPa];

E_2 : Módulo de elasticidade do corpo [GPa];

ν_1 : Coeficiente de Poisson do contra-corpo [-];

ν_2 : Coeficiente de Poisson do corpo [-];

Substituindo-se a Equação (9) na Equação (7), e resolvendo-se para P_{max} , tem-se a Equação (12), que para o caso estudado neste trabalho será função da carga F_N .

$$P_{max} = f(F_N) = \sqrt{\frac{2F_N B}{\pi L(k_1 + k_2)}} \quad (12)$$

A área nominal, A_{nom} , é formada pelo retângulo de dimensões $2a$ e L , conforme Equação (13). Para se obter a pressão média no contato, $P_{média}$ [MPa], considera-se a divisão da força normal aplicada pela área de contato nominal, esta relação é mostrada matematicamente na Equação (13).

$$A_{nom} = f(F_N) = 2aL = \sqrt{\frac{8L(k_1 + k_2)}{\pi B}} F_N \quad (13)$$

$$P_{média} = f(F_N) = \frac{F_N}{A_{nom}} = \frac{F_N}{2aL} \quad (14)$$

2.7 Materiais

2.7.1 Aço Inoxidável

Aços inoxidáveis, como o próprio nome diz, são aços altamente resistentes à corrosão nos mais variados ambientes. Para se caracterizar como um aço inoxidável o material deve ter uma concentração mínima de 11% de cromo em sua composição (CALLISTER, 2007).

Aços inoxidáveis podem ser divididos em três categorias: martensítico, ferrítico ou austenítico. Essa denominação dá-se de acordo com a fase em maior quantidade na sua microestrutura (CALLISTER, 2007).

O aço inoxidável a ser utilizado no presente trabalho é o AISI 304, ele é considerado um aço inoxidável austenítico. Esse tipo de aço já é endurecido, tem sua resistência aumentada quando submetido à deformação plástica a frio. Dentre os três tipos, o austenítico é único não magnético e o que mais resiste à corrosão devido a maior concentração de cromo e a presença de níquel em sua composição, a qual é formada por 19% de Cromo (Cr), 9% de Níquel (Ni), 2% de Manganês (Mn) e 0,08% de Carbono (C). Com relação a sua aplicação, é utilizado em equipamentos para processamento químico e de alimentos e para a construção de vasos criogênicos (CALLISTER, 2007).

Na Tabela 2.1 podem-se ver algumas propriedades do aço inoxidável AISI 304.

Tabela 2.1 - Propriedades do Aço Inoxidável AISI 304. (Fonte: Callister, 2007)

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm ³]
Aço inoxidável AISI 304	1,93	0,30	16,20	8,00

2.7.2 Polímeros

Materiais poliméricos podem ser divididos em naturais (madeira, borracha, algodão, lã, couro, seda, proteínas, enzimas, amidos, celulose) ou sintéticos, os quais são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. Com o avanço tecnológico no descobrimento de novos materiais poliméricos, pode-se até substituir metais e madeiras por polímeros (CALLISTER, 2007).

2.7.2.1 Polietilenos

Segundo Coutinho *et al.* (2003) os Polietilenos são polímeros cristalinos e flexíveis e suas propriedades dependem da quantidade de fases amorfas e cristalina.

A menor estrutura dos Polietilenos, conhecida como mero, é composta por dois carbonos e quatro hidrogênios e apresenta a forma mostrada na Figura 2.27.

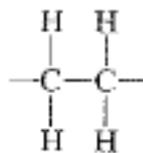


Figura 2.27- Estrutura dos Polietilenos

Fonte: Callister (2007).

Devido a sua natureza parafínica os polietilenos podem ser considerados inertes quando em contato com a maioria dos produtos químicos e em temperaturas abaixo de 60°C solúveis em todos os solventes (COUTINHO *et al.*, 2003).

A seguir serão detalhados os dois polietilenos que serão utilizados na execução dos ensaios.

2.7.2.1.1 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

O polietileno com ultra alto peso molecular (PEUAPM) apresenta a estrutura na forma de fibras. Esse apresenta grande resistência ao impacto, resistência à abrasão, coeficiente de atrito baixo, superfície auto lubrificante, boa resistência química, manutenção das propriedades à baixa temperatura, característica de absorção de energia e amortecimento acústico, isolante elétrico e temperatura de fusão baixa (CALLISTER, 2007).

Esse polímero apresenta alta densidade (0,93-0,94 g/cm³), temperatura de transição vítrea (T_g) entre 100°C e 125°C e cristalinidade de 45% (COUTINHO *et al.*, 2003).

Devida a essas propriedades é possível uma gama de aplicação muito grande dentre as quais se destacam a vestimentas à prova de balas, linhas de pesca, revestimento inferior de esquis, bolas de golfe, próteses biomédicas e filtros de sangue (CALLISTER, 2007).

Na Tabela 2.2 podem ser vistas algumas propriedades do PEUAPM.

Tabela 2.2 - Propriedades do PEUAPM

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm ³]
PEUAPM	0,80	0,46	0,40	0,93
Fonte	Anexo F (2014)	Goodfellow (2014)	Anexo F (2014)	Anexo F (2014)

2.7.2.1.2 Polietileno de Alta Densidade

O polietileno de alta densidade (PEAD) apresenta cadeia linear e estrutura na lamelar com pouca ramificação, devido a isso apresenta alta cristalinidade (acima de 90%). Como esse polímero apresenta um peso molecular relativamente elevado, pode-se dizer que apresenta uma boa resistência ao impacto (COUTINHO et al., 2003).

As aplicações desse material são as mais diversas, destacando-se a confecção de baldes, bacias, banheiras e brinquedos infantis, tampas para garrafas, boias, embalagens de detergentes e cosméticos, isolamento de fios telefônicos, revestimento de tubulações e caixas d'água.

Na Tabela 2.3 podem ser vistas algumas propriedades do PEAD.

Tabela 2.3 - Propriedades do PEAD

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm ³]
PEAD	1,08	0,46	0,43	0,95
Fonte	Callister (2007)	Goodfellow (2014)	Anexo E (2014)	Anexo E (2014)

2.7.2.2 Poliamidas

Conhecidas comercialmente como *Nylon*, a primeira poliamida sintética foi comercializada em 1935 pela empresa DuPont. Elas constituem uma importante classe de polímeros para aplicação em engenharia devido as suas propriedades (FACTORI, 2009).

Dentre as propriedades destacam-se a semi-cristalinidade, boa resistência mecânica, resistência à abrasão e tenacidade, baixo coeficiente de atrito, elevada resistência a tensão e flexão (CALLISTER, 2007). Uma característica não muito

desejável desses materiais é a absorção de alguns líquidos, principalmente água, que faz com que aumente a sua umidade e faça com que se tenha alterações em algumas propriedades como estabilidade dimensional, densidade, resistência mecânica e elétrica. São considerados polímeros semi-cristalinos (FACTORI, 2009).

A diferença entre a Poliamida 6.0 e a 6.6 é devido aos componentes envolvidos no processo de fabricação. Os dois polímeros são obtidos a partir de reações de condensação. Enquanto a Poliamida 6.0 é formada a partir do aquecimento do ácido ϵ -aminocaproico ou pela abertura do anel e polimerização da caprolactama, a Poliamida 6.6 é obtida a partir do adipato de hexametilenodiamina (FACTORI, 2009). Essas reações serão mostradas nas seções seguintes.

As Poliamidas destacam-se na aplicação a produção de mancais, engrenagens, cames, buchas, cabos e revestimentos para fio e cabos (CALLISTER, 2007).

2.7.2.2.1 Poliamida 6.0

As reações para formação da Poliamida podem ser vistas nas Figuras 2.28 e 2.29.

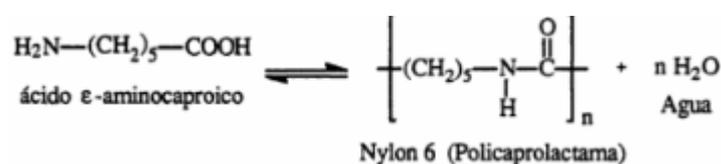


Figura 2.28 - Reações para formação da Poliamida 6.0

Fonte: Factori (2009)

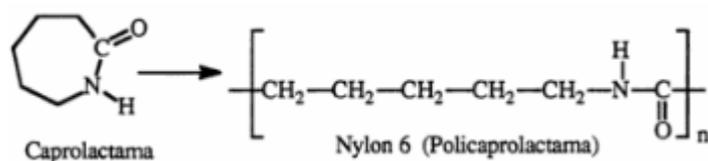


Figura 2.29 - Reações para formação da Poliamida 6.0

Fonte: Factori (2009)

A estrutura final da Poliamida 6.0 consiste de segmentos de polietileno (CH₂) separados por unidades de peptídeos (NH-CO) (FACTORI, 2009).

Na Tabela 2.4 podem ser vistas algumas propriedades da Poliamida 6.0.

Tabela 2.4 - Propriedades da PA 6.0

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm ³]
Poliamida 6.0	1,80	0,39	0,23	1,13
Fonte	Anexo D (2014)	Goodfellow (2014)	Anexo D (2014)	Anexo D (2014)

2.7.2.2.2 Poliamida 6.6

A reação para formação da Poliamida 6.6 pode ser vista na Figura 2.30.

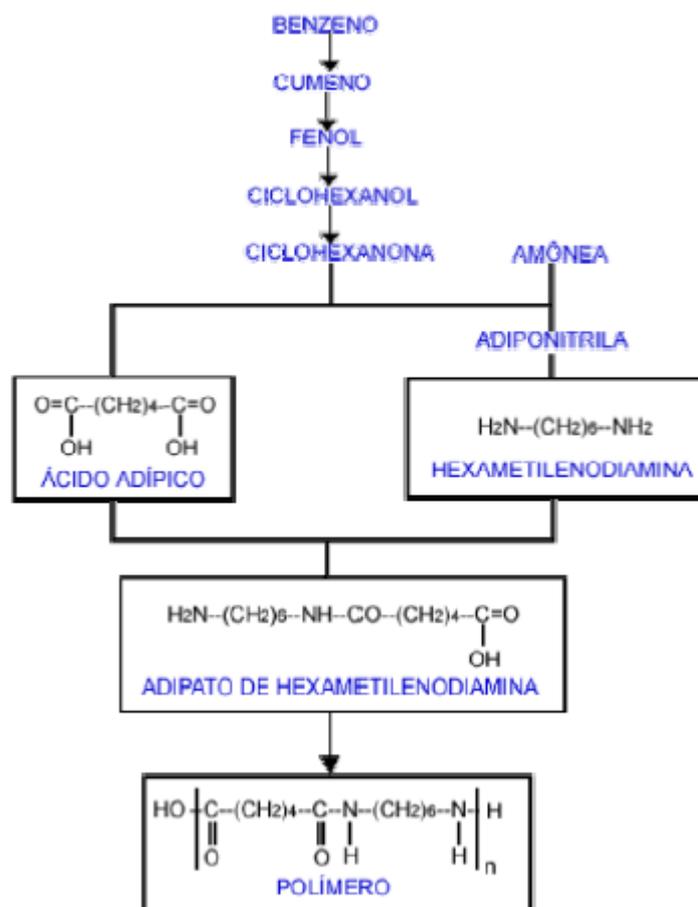


Figura 2.30 - estrutura final da Poliamida 6.6

Fonte: Factory (2009).

A estrutura final da Poliamida 6.6 consiste de segmentos de polietileno (CH₂) separados por unidades de peptídeos (NH), (OH) e (H) (FACTORI, 2009).

Na Tabela 2.5 podem ser vistas algumas propriedades do Poliamida 6.6.

Tabela 2.5 - Propriedades da PA 6.6

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm ³]
Poliamida 6.6	2,00	0,39	0,23	1,14
Fonte	Anexo C (2014)	Goodfellow (2014)	Anexo C (2014)	Anexo C (2014)

2.7.2.3 Poliacetal

O polioximetileno (POM), ou poliacetal apresenta excelentes características como baixo custo, boa capacidade de lubrificação, baixo peso e alta resistência à corrosão (KHODDAMZADEH *et al.*, 2009). O material é obtido pela técnica de polimerização em solução utilizando como iniciado o ácido de LEWIS (Boro Trifluorado – BF₃). Existem dois tipos de POM, o homopolímero e o copolímero, que são obtidos pela reação de um formaldeído.

O POM copolímero é um acetal composto de trioxano e quantias pequenas de comonômeros. O material possui uma estrutura linear de alta cristalinidade e sua estrutura química é formado por cadeias moleculares com distribuição aleatória das unidades de comonômeros. Se comparado com ao POM homopolímero, possui alta estabilidade à degradação térmico-oxidativa (TICONA, 1997). Esta vantagem se dá à presença dos grupos –C-C- em sua estrutura química os quais possuem uma ligação mais forte que o grupo –C-O-.

A estrutura química do POM pode ser observada na Figura 2.31.

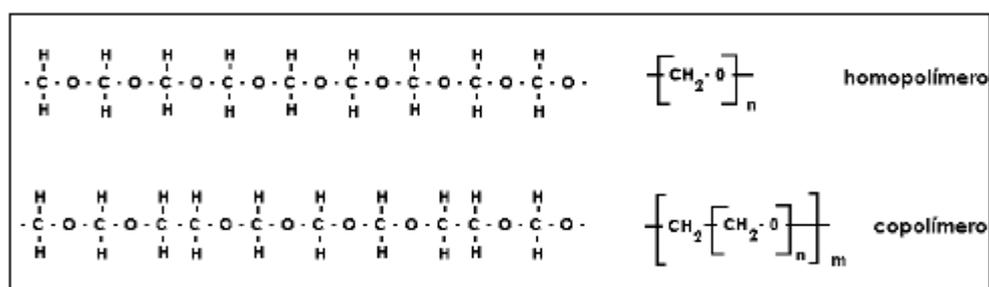


Figura 2.31 – Estrutura química do POM: homopolímero e copolímero

Fonte: Silva (2003)

Na Tabela 2.6 são apresentadas algumas propriedades do Poliacetal.

Tabela 2.6 - Propriedades do POM

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm ³]
Poliacetal	3,10	0,35	0,31	1,42
Fonte	Anexo B (2014)	Goodfellow (2014)	Anexo B (2014)	Anexo B (2014)

Na Figura 2.32 é possível ver a sua aplicação ideal, engrenagens, essa aplicação é possível devido a sua estabilidade dimensional com ampla resistência ao desgaste, podendo ser moldado por injeção e por sopro e entrudado em forma de placas e perfis. Outros tipos de aplicações são designados pelo fabricante como mancais, acoplamentos e vedações pois existe baixa absorção de umidade, alta resistência a produtos químico, boa estabilidade dimensional e sua fácil usinagem (NITACETAL, 2014).



Figura 2.32 – Exemplo de aplicação POM

Fonte: Nitacetal (2014)

2.8 Topografia

A medição das características de uma superfície pode ser feita levando em conta desvios de circularidade, linearidade, planicidade, cilindridade e rugosidade (WHITEHOUSE, 2003). Como o presente trabalho se trata de um estudo tribológico, a característica principal a ser analisada será a topografia (textura) da superfície, ou seja, a rugosidade e ondulação (JUNIOR, 2009).

A rugosidade pode ser avaliada em 2 dimensões (2D) ou em 3 dimensões (3D), quando avalia-se em 2D avalia uma linha sobre a superfície e em 3D avalia-se uma área sobre a superfície (GADELMAWLA, 2002).

Para analisar mais precisamente a rugosidade, evitando erros de forma e ondulação e traçando uma linha média sobre os resultados obtidos, comumente utiliza-se filtros, o mais conhecido é chamado de filtro gaussiano (WHITEHOUSE, 2003). Na Figura 2.33 é possível ver a aplicação da utilização desse filtro.

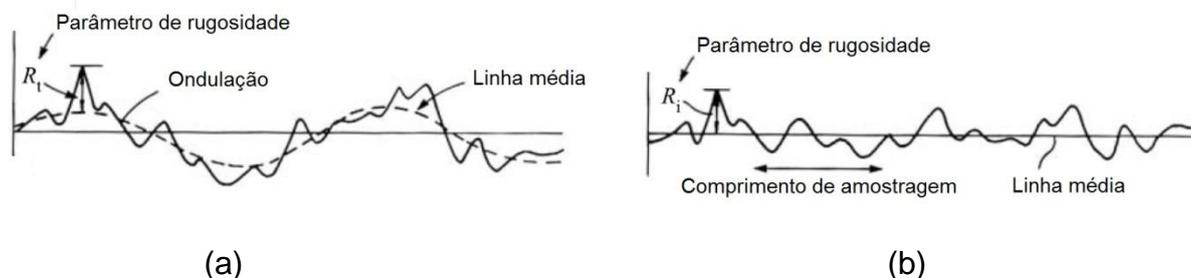


Figura 2.33 – Textura da superfície com rugosidade e ondulação (a) e textura após a aplicação do filtro (b).

Fonte: Whitehouse (2003)

A aplicação de tais filtros podem alterar o tipo de perfil obtido e a área de contato. Porém, se for aplicado o mesmo filtro para as mesmas análises, consegue-se fazer uma comparação quantitativa da alteração da superfície.

A partir da obtenção desses perfis de textura e aplicação dos filtros, podem-se definir alguns parâmetros que serão utilizados nesse trabalho para analisar as superfícies em questão.

2.8.1 Parâmetro S_a

É o parâmetro de usinagem mais utilizado e é calculado a partir das médias aritméticas do perfil, tomando como referência a linha média sobre um comprimento pré-determinado (OLIVEIRA, 2004). Segundo Whitehouse (1994) esse parâmetro é definido conforme a Equação (15).

$$S_a = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} |f(x, y) - \bar{f}| dx dy \quad (15)$$

na qual:

- L_x : Extensão da área de amostragem no eixo x [μm];
- L_y : Extensão da área de amostragem no eixo y [μm];

$f(x, y)$: Altura da superfície no ponto (x, y) em relação ao plano médio [μm];
 \bar{f} : Altura do plano médio [μm];
 dx : Comprimento diferencial no eixo x [μm];
 dy : Comprimento diferencial no eixo y [μm].

2.8.2 Parâmetro S_q

Chamado de raiz quadrada das médias dos quadrados, o parâmetro é calculado a partir da raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil de rugosidade (OLIVEIRA, 2004). Segundo Whitehouse (2003) esse parâmetro é definido conforme a Equação (16).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} |f(x, y) - \bar{f}|^2 dx dy} \quad (16)$$

2.8.3 Parâmetro S_z

Chamado de média das amplitudes dos maiores picos e vales, este parâmetro é o valor obtido a partir da média de todas as alturas máximas, ou seja, diferença entre pico e vale medido no comprimento de amostragem (OLIVEIRA, 2004). Segundo Whitehouse (2003) esse parâmetro é definido conforme a Equação (17).

$$S_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |\eta_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{v_i}| \right) \quad (17)$$

Em que:

η_{p_i} : Altura dos picos mais altos da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];
 η_{v_i} : Altura dos vales mais profundos da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];
 i : Parâmetro de contagem.

2.8.4 Parâmetro Spd

O parâmetro Spd é conhecido como densidade de picos em uma área de 1 mm² (DO VALE, 2014 *apud* CHIFFRE *et. al.*, 2000). Sendo definido pela Equação (18).

$$Sds = \frac{\xi}{L_x L_y} \cdot 10^{12} \quad (18)$$

na qual:

ξ : Número de picos da área de amostragem [-];

2.8.5 Parâmetro Ssk

Conhecido também como região de máximo contato, Ssk é o parâmetro associado à parte intermediária da rugosidade. Este quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato (OLIVEIRA, 2004). Através de tal parâmetro, quantifica-se o formato da distribuição das alturas da topografia e a assimetria da distribuição das alturas (FARIAS, *et al*, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado um descritivo dos materiais estudados neste trabalho, os Polímeros e o aço inoxidável AISI 304 e os métodos utilizados para as análises que serão apresentadas no capítulo 4. Os ensaios foram, primeiramente, feitos sobre uma condição PV e posteriormente sobre uma condição PV com menor severidade. Neste capítulo também apresentam-se: descritivo do aparato, planejamento dos ensaios, e os métodos utilizados para a avaliação do desgaste.

3.1 Materiais

Na Tabela 3.1, pode-se ver a lista de materiais e equipamentos utilizados no presente trabalho.

Tabela 3.1 - Materiais e Equipamentos

Material/Equipamentos	Quantidade
Corpo de prova de aço inoxidável AISI 304	20
Corpo de prova de Poliamida 6.0	4
Corpo de prova de Poliamida 6.6	4
Corpo de prova de Poliacetal	4
Corpo de prova de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	4
Corpo de prova de Polietileno de Alta Densidade	4
Micrômetro interno TESA (17 ~ 20 mm)	1
Balança de precisão Marte AD500	1
Interferômetro de Luz Branca Taylor Hobson	1
Microscópio eletrônico de varredura EVO-MA15	1
Metalizador Q150R ES	1
Espectrômetro Varian 640-IR	1
Micrômetro externo Vonder	1
Multímetro Minipa MTK-01	1
Termopar Minipa ET2076	1
Motor trifásico	1
Inversor de frequência	1
Eixo de aço carbono 1020	1
Mancais de apoio	2
Haste de carga	1
Sistema de medição/aquisição de força	1
Placa de aquisição de dados	1

Rolamento para aplicação de carga	1
Parafuso M8 x 30 mm	1
Porca M8	1
Arruela de Fixação	1
Arruela lisa A6,4 DIN 125	1
Parafuso M6 x 15 mm	1

Como esses materiais e equipamentos foram utilizados serão detalhados nas próximas seções.

3.1.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova foram torneados e os desenhos de fabricação podem ser vistos nas Figuras 3.1 e 3.2. A concepção dos corpos de prova é a mesma proposta em Vale (2014).

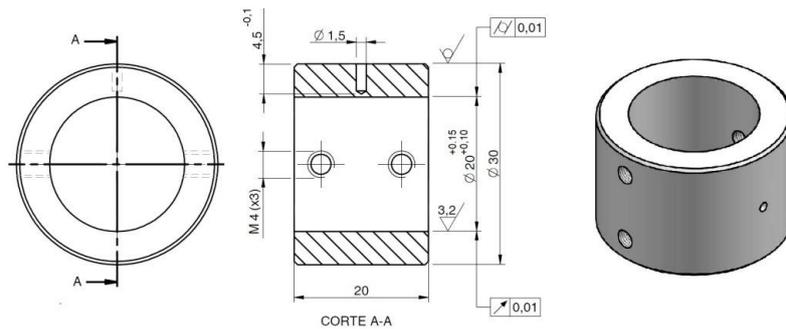


Figura 3.1- Dimensões das buchas de polímeros (corpo): Detalhes de fabricação e vista em perspectiva

Fonte: Vale (2014)

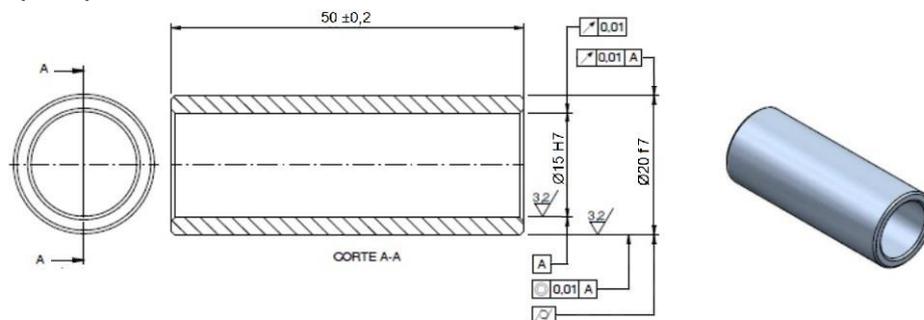


Figura 3.2 - Dimensões do contra-corpo de aço inoxidável AISI 304 (contra corpo): Detalhes de fabricação e vista em perspectiva

Fonte: Vale (2014)

É importante destacar que o ajuste proposto para o diâmetro no qual há o acoplamento do par tribológico é do tipo com folga diametral, a qual pode variar entre 0,1 a 0,17mm e também é um ajuste indicado para o uso com mancal de deslizamento (VALE, 2014).

3.1.2 Polímeros

Os materiais poliméricos para os corpos, adquiridos em barras de seção circular extrudadas (com Ø30 mm por comprimento de 150 mm), possuem certificados de matéria-prima que podem ser encontrados nos Anexos B, C, D, E e F. As propriedades dos polímeros utilizados na pesquisa podem ser encontradas nas Tabelas 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6

3.1.2.1 Análise dimensional

Ao início de cada um dos ensaios foram realizadas análises dimensionais de todos os corpos poliméricos. A medição foi feita em dois pontos (A e B), com um micrômetro interno de 17 a 20 mm da marca TESA, com precisão de 0,005 mm. Conforme mostra a Figura 3.3.



Figura 3.3 - Análise dimensional Polímeros

Verifica-se na Tabela 3.2, que os valores médios do diâmetro mensurados estão dentro da tolerância especificada no desenho de fabricação ($\text{Ø}20^{+0,15}_{+0,10}$).

Tabela 3.2 - Médias e desvio padrão dos diâmetros interno dos corpos

Polímero	Medida "A" [mm]	Medida "B" [mm]
PA 6.0	20,14 ± 0,02	20,14 ± 0,02
PA 6.6	20,14 ± 0,04	20,14 ± 0,02
POM	20,09 ± 0,02	20,10 ± 0,02
PEUAPM	20,10 ± 0,02	20,10 ± 0,03
PEAD	20,12 ± 0,03	20,12 ± 0,02

3.1.2.2 Desgaste mássico

O desgaste mássico foi obtido efetuando a medição imediatamente antes, e imediatamente após a execução dos ensaios em uma balança de precisão Marte modelo AD500 (com capacidade para medição de até 510 gramas e sensibilidade de 0,001 gramas). A medição foi feita com todos os componentes que são utilizados para fazer o ensaio. Na Figura 3.4 é possível ver uma foto da medição.

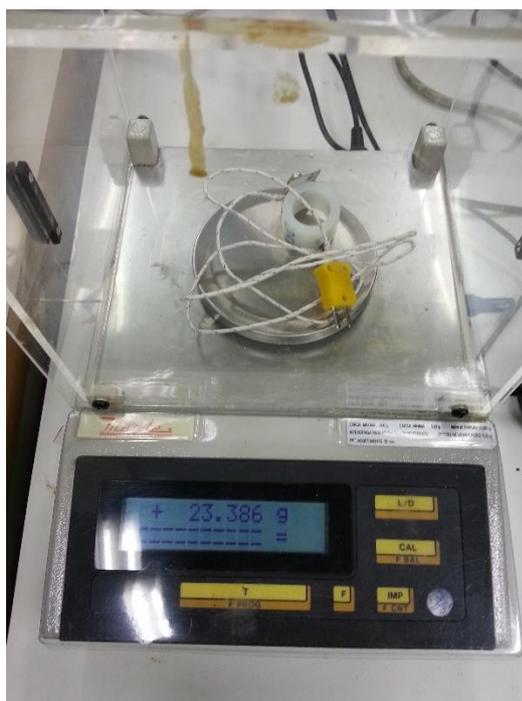


Figura 3.4 - Medição da massa dos Polímeros

3.1.2.3 Análise topográfica

Foi realizada análise topográfica dos polímeros em um equipamento de interferômetro de luz branca para medições 3D (Figura 3.5) sem contato modelo CCI

Talysurf Lite da marca Taylor Hobson o qual se encontra disponível no laboratório de metrologia da UTFPR. O interferômetro utiliza, para cada área de amostragem, 1024x1024 pontos medidos e resolução óptica entre 0,4 e 0,6 μm .



Figura 3.5 - Equipamento de interferômetro de luz branca para medições 3D
Fonte: UTFPR (2014)

Para tal análise, os corpos poliméricos foram cortados ao meio, sendo possível analisar a parte ensaiada e a parte não ensaiada. Na Figura 3.6 é possível ver um dos corpos poliméricos cortados, e mostrando que o perfil de rugosidade foi obtido no sentido axial da peça.



Figura 3.6 - Local mostrando a área de amostragem e sentido dos perfis de rugosidade nos corpos poliméricos

3.1.2.4 Microscopia eletrônica por varredura (MEV)

Para a metalização nos polímeros, primeiramente os corpos foram fixados em um suporte juntamente com fita adesiva de ouro, que é boa condutora. Tal processo de metalização se dá com recobrimento de uma camada de aproximadamente 20 μm de ouro, devido à má condutividade térmica dos polímeros. O resultado obtido após este processo pode ser visto na Figura 3.7.

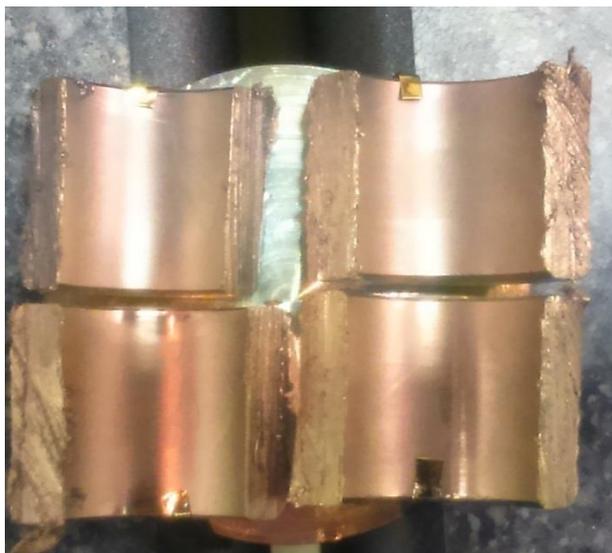


Figura 3.7 - Disposição dos polímeros após a metalização

A metalização se dá necessária para o ideal funcionamento do MEV, uma vez que este utiliza a condução de elétrons para projetar as imagens e também para melhorar a dissipação de calor gerada pelo feixe de elétrons.

Para a aquisição das análises por MEV, foi utilizado o microscópio da marca Zeiss, modelo EVO-MA15, nos recintos da UTFPR (Figura 3.8). Já para preparação das amostras, o metalizador por pulverização catódica, da marca Quorum modelo Q150R ES, foi empregado (Figura 3.9).



Figura 3.8 - Microscópio Eletrônico de Varredura

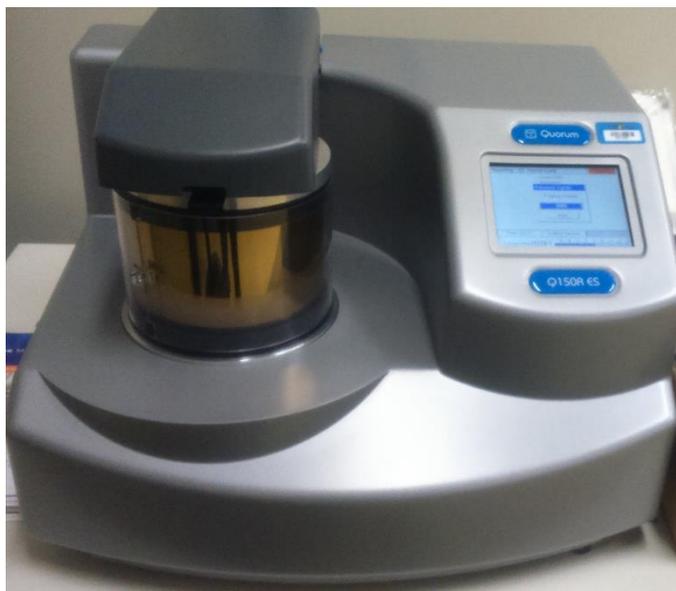


Figura 3.9 – Metalizador Q150R ES

3.1.2.5 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Foi realizada a análise por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier nos corpos poliméricos, tanto na condição inicial, quanto na condição final. O equipamento utilizado para essa análise foi um espectrômetro de

infravermelho marca Varian, modelo 640-IR disponível no campus Ecoville da UTFPR.

3.1.3 Aço Inox

O material utilizado para os contra corpos, foi comprado em barras laminadas (com $\varnothing 25,4\text{mm}$ por comprimento de 1,5m). As barras de aço inoxidável foram fornecidas com acabamento decapado. O certificado de matéria-prima pode ser encontrado no Anexo A. As propriedades do aço utilizado na pesquisa podem ser encontradas na Tabela 2.1.

3.1.3.1 Análise dimensional

A análise dimensional dos contra corpos de aço inox foram feitas ao longo de seu diâmetro externo, pois esta parte mantém contato com o corpo polimérico durante os ensaios. Para aferição das medidas, foi utilizado um micrômetro externo com capacidade de medição de 0 a 25 mm da marca Vonder, com precisão de 0,01mm. A medição foi realizada em 6 pontos conforme mostrado na Figura 3.9.

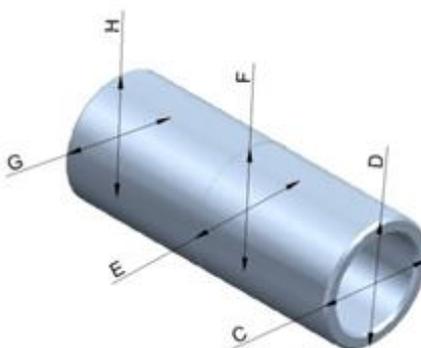


Figura 3.9 – Pontos de medição do contra corpo

Fonte: Vale (2014)

Tabela 3.3 - Médias e desvio padrão dos diâmetros interno dos contra corpos

Polímero	Medida "C" [mm]	Medida "D" [mm]	Medida "E" [mm]	Medida "F" [mm]	Medida "G" [mm]	Medida "H" [mm]
PA 6.0	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01
PA 6.6	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01
POM	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,94 ± 0,15	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,02	19,98 ± 0,01
PEUAPM	19,98 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,98 ± 0,01	19,97 ± 0,01	19,98 ± 0,01
PEAD	19,97 ± 0,02	19,97 ± 0,03	19,97 ± 0,02	19,97 ± 0,02	19,97 ± 0,02	19,97 ± 0,02

A partir da análise da Tabela 3.3, constata-se que as todas as dimensões estão dentro do especificado com exceção da medida “E” usada com o polímero POM, constatou-se que foi somente uma peça que deu um valor baixo e essa não foi utilizada para a realização dos ensaios, conforme será detalhado na seção 3.3.

3.1.3.2 Desgaste mássico

Foi realizada a medição da massa antes e após dos ensaios do aço inoxidável no mesmo equipamento descrito na seção 3.1.2.2.

3.1.3.3 Análise topográfica

Na análise topográfica dos contra corpos de aço inoxidável utilizou-se o mesmo aparelho especificado na seção 3.1.2.3.

Realizou-se a análise de 6 contra corpos, 5 referentes a cada ensaio realizado com cada polímero e 1 em um sem a realização de ensaio, ou seja, sem ter sofrido desgaste. Na Figura 3.10 pode-se ver a região na qual foi realizada a análise topográfica, essa corresponde a região de contato entre o corpo polimérico e o contra corpo de aço inoxidável, o sentido de coleta do perfil de rugosidade é indicado pela seta vermelha.

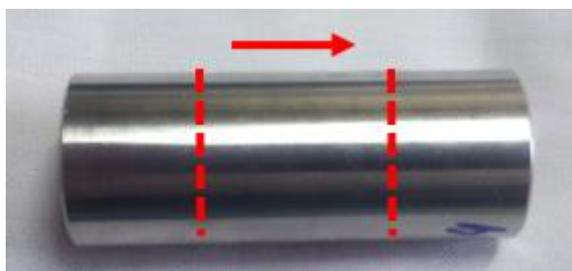


Figura 3.10 - Local mostrando a área de amostragem e sentido dos perfis de rugosidade obtidos nos contra-corpos de aço inoxidável.

3.1.3.4 Microscopia eletrônica por varredura (MEV)

Utilizando-se o mesmo equipamento descrito na seção 3.1.2.4, foram realizadas análises de microscopia eletrônica por varredura em 3 contra corpos de aço inoxidável, desses, 2 foram ensaiados e 1 não foi ensaiado.

3.2 Aparato

Os ensaios de desgaste foram realizados em uma máquina de atrito cinético (MAC), tipo mancal sobre eixo, desenvolvida no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR, a qual pode ser visualizada na Figura 3.11.

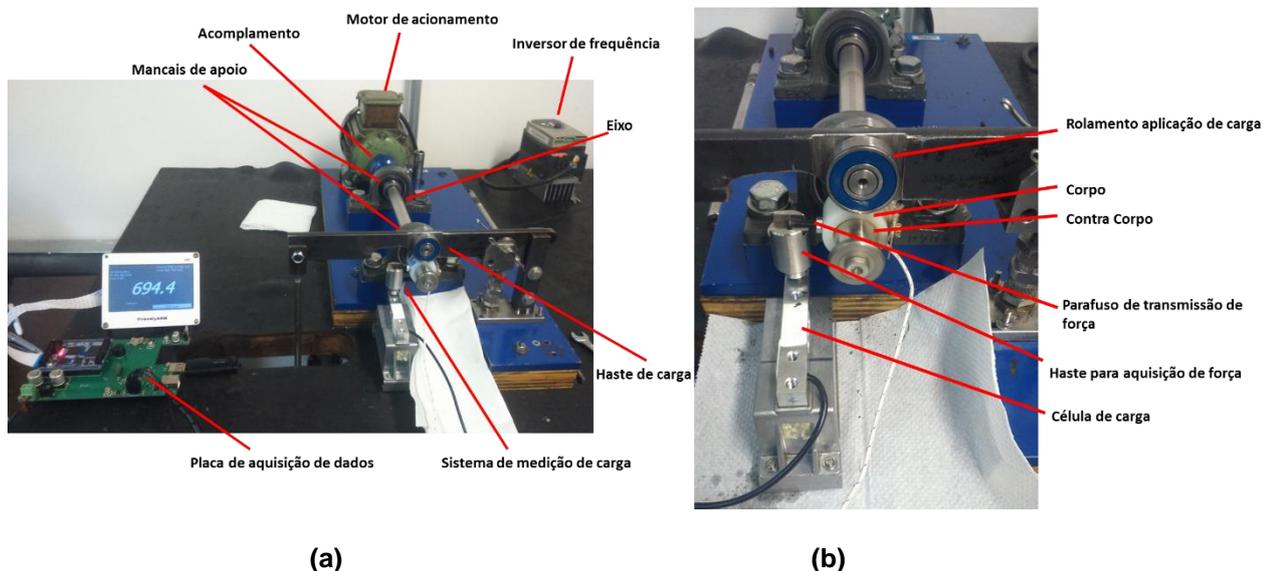


Figura 3.11 - Fotografias da máquina de atrito cinético tipo mancal sobre eixo: (a) visão geral (b) detalhe do sistema de medição da força transmitida à célula de carga, cujo dado é fundamental para obtenção do coeficiente de atrito cinético

A MAC possui um eixo apoiado em mancais, que é acoplado ao motor elétrico e o controle da rotação (feitos através de um inversor de frequência). Na ponta do eixo é fixado o contra corpo de aço inoxidável. O corpo polimérico é forçado contra o contra corpo com força normal aplicada pelo rolamento fixado à haste de carga através de sistema de peso-morto. Cargas discretas, são responsáveis por gerar a força normal e são acrescentadas ao tirante da haste de carga, conforme mostrado na Figura 3.12.

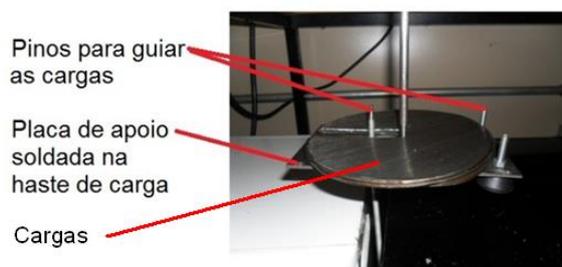


Figura 3.12 - Fotografia da MAC mostrando, em detalhe, o modo de aplicação de carga através de sistema de peso morto

Fonte: Vale (2014)

Durante os ensaios foram coletados, de modo automático, dados de temperatura no contato e da força transmitida à célula de carga. Para a medição da temperatura no contato foi utilizado um termopar da marca Minipa modelo MTK-01, com pasta térmica e um multímetro também da marca Minipa, modelo ET-2076 conectado a um computador, a montagem do termopar no corpo polimérico pode ser visto na Figura 3.13. Para o sistema de medição de carga foi utilizada uma célula de carga conectada a uma placa de aquisição de dados.



Figura 3.13 - Detalhes do corpo com adaptação do termopar para medição da temperatura no contato: (a) vista em perspectiva com detalhes acrescidos (b) fotografia da montagem do termopar no corpo.

Fonte: Vale (2014)

A Figura 3.14 mostra a montagem do corpo de polímero e do contra corpo de aço inoxidável na MAC.

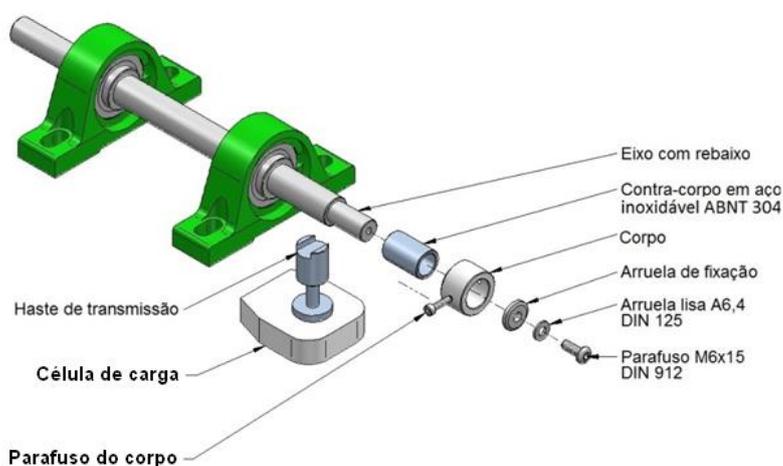


Figura 3.14 - Vista explodida da montagem do corpo e contra corpo na MAC.

Fonte: Vale (2014).

3.2.1 Modelo de atrito cinético para as condições geométricas da MAC

Para o cálculo do coeficiente de atrito cinético será utilizada a Equação (15) deduzida por Vale (2014). Na Figura 3.15 é possível ver o diagrama de corpo livre da haste de carga da MAC. A partir dele definiram-se as variáveis de força, distâncias e reações de apoio. A descrição de cada variável pode ser vista na sequência.

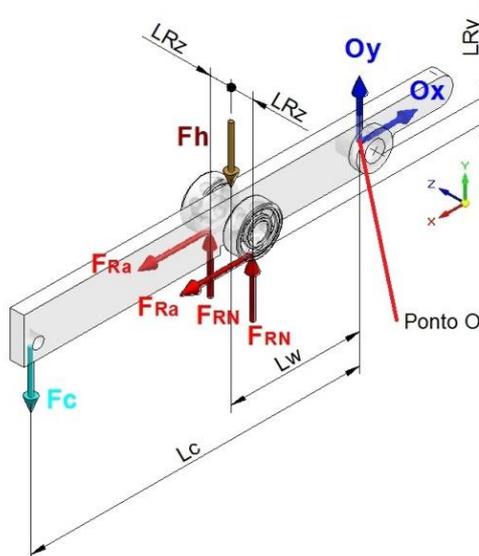


Figura 3.15 - Diagrama de corpo livre da haste de carga.

Fonte: Vale (2014).

Em que:

- F_h : Força proveniente da massa da haste de carga considerada no ponto de aplicação da carga normal [N];
- F_c : Força peso das cargas aplicadas no tirante da haste de carga [N];
- F_{Ra} : Força de atrito gerada pela tendência de movimento dos rolamentos [N];
- F_{RN} : Força normal de reação do corpo [N];
- L_w : Distância do centro de giro até o ponto de aplicação da carga normal no corpo [mm];
- L_c : Distância do centro de giro até o ponto da aplicação das cargas [mm];
- L_{Ry} : Distância da força de atrito causada pelo rolamento até o centro de giro [mm];
- L_{Rz} : Distância do centro da barra até os rolamentos [mm];
- O_x : Força de reação no ponto de articulação da haste de carga no eixo x [N];
- O_y : Força de reação no ponto de articulação da haste de carga no eixo y [N];

Na Figura 3.16 é possível ver o diagrama de corpo livre sobre o corpo de material polimérico. Novamente definiram-se algumas variáveis de força, distância e

reações de apoio as quais foram utilizadas para deduzir a expressão do coeficiente de atrito cinético.

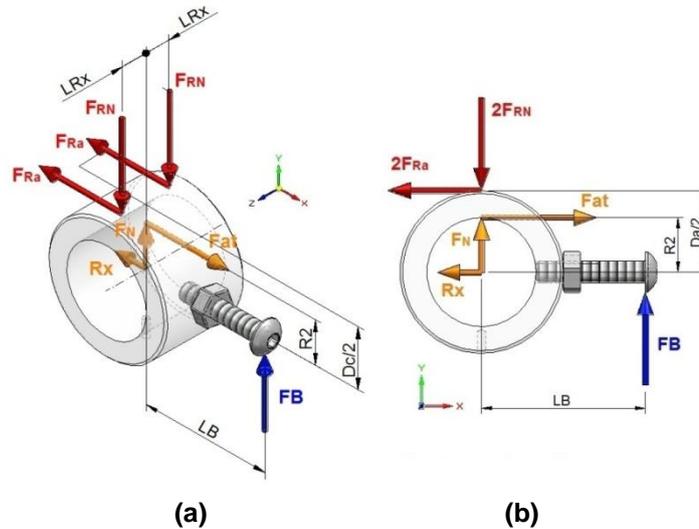


Figura 3.16 - Diagrama de corpo livre do corpo: (a) vista isométrica (b) vista no plano "xy".
Fonte: Vale (2014).

Na Equação (19) é possível ver a fórmula deduzida para o coeficiente de atrito cinético em função das condições de entrada para o experimento.

$$\mu = f(m_B, m_c) = \frac{\frac{1}{R_2}(L_B m_B)}{\frac{L_c}{L_w} m_c + c_{mh} - m_B} \quad (19)$$

onde:

- c_{mh} : Força atribuída a massa do conjunto da haste de carga medido no ponto de aplicação da carga normal no corpo [g];
- L_B : Distância do centro do corpo até a célula de carga [m];
- L_c : Distância do centro de giro da haste de carga até o ponto da aplicação das cargas [mm];
- L_w : Distância do centro de giro da haste de carga até o ponto de aplicação da carga normal no corpo [mm];
- m_c : Massa das cargas acrescentadas à MAC [g];
- m_B : Força transmitida pelo parafuso do corpo, à haste de transmissão de força e, medida na célula de carga [g].

3.3 Atmosfera do laboratório

Os ensaios foram realizados em atmosfera não controlada, apesar disso, dados de temperatura e a umidade relativa foram coletadas no início de cada ensaio.

Os equipamentos utilizados para a coleta foram um termômetro analógico (faixa de leitura de -35°C a 55°C com precisão de 1°) e um higrômetro analógico (faixa de 0 a 100 % com precisão de 1%) ambos da marca Fischer.

3.4 Planejamento e variáveis dos ensaios

Serão abordadas duas condições distintas de ensaios, as quais serão detalhadas nas seções 3.4.1 e 3.4.2, com diferentes valores de condição PV, devido a problemas encontrados durante a realização da condição original os quais serão detalhados na seção de resultados e discussões (seção 4.1 e 4.2).

Os pares tribológicos permaneceram 48 horas em dissecador com sílica gel antes de serem ensaiados, para evitar que possuam níveis diferentes de umidade, ou seja, garantir a homogeneidade na execução dos ensaios.

Com base nas Equações (9) e (10), apresentadas na seção 2.6 e nas propriedades que constam no item 2.7, foram calculadas as constantes K para cada material. As constantes podem ser vistas na Tabela 3.4, esses valores serão utilizados para calcular a rotação de ensaio sob uma condição PV constante.

Tabela 3.4 - Valores das constantes relacionadas ao contato entre corpo e contra corpo.

Constante	Valor
L [mm]	20,00
R_1 [mm]	10,00
R_2 [mm]	-10,05
B [m^{-1}]	0,25
$K_{\text{aço}}$ [GPa^{-1}]	$4,72 \cdot 10^{-1}$
K_{PEUAPM} [GPa^{-1}]	$9,86 \cdot 10^{-1}$
K_{PEAD} [GPa^{-1}]	$7,30 \cdot 10^{-1}$
$K_{\text{PA 6.0}}$ [GPa^{-1}]	$4,71 \cdot 10^{-1}$
$K_{\text{PA 6.6}}$ [GPa^{-1}]	$4,16 \cdot 10^{-1}$
K_{POMI} [GPa^{-1}]	$2,83 \cdot 10^{-1}$

A execução desse tipo de ensaio não é normalizada e sim uma continuidade de estudo de um trabalho já desenvolvido na instituição.

3.4.1 Proposta 1

Foram realizados ensaios sem lubrificação e em atmosfera de laboratório não controlada, de longa duração com tempo total de 120 minutos, a explicação para esse tempo de ensaio será detalhada na seção 4.1.

Os ensaios foram realizados conforme a Tabela 3.5, Conforme Vale (2014) a proposta foi executar todos os ensaios sob a mesma condição Força Normal (F_N), condição PV_{\max} e condição $PV_{\text{médio}}$.

Tabela 3.5 - Planejamento dos ensaios para cada polímero (proposta 1I).

Variáveis	PEUAPM	PEAD	PA 6.0	PA 6.6	POM
Tempo [min]			120		
m_c [g]			3091,94		
F_N [N]			101,66		
a [mm]	4,35	3,96	3,50	3,40	3,13
P_{\max} [MPa]	0,74	0,82	0,92	0,95	1,03
$P_{\text{médio}}$ [MPa]	0,58	0,64	0,73	0,75	0,81
PV_{\max} [MPa.m.s ⁻¹]			0,62		
$PV_{\text{médio}}$ [MPa.m.s ⁻¹]			0,49		
V [m/s]	0,84	0,76	0,68	0,66	0,60
n [rpm]	802,00 ± 1	728,00 ± 1	645 ± 1	625 ± 1	577 ± 1
d [m]	6043 ± 1	5488 ± 1	4861 ± 1	4716 ± 1	4350 ± 1

Esta proposta se mostrou muito severa, destruindo alguns corpos de prova e impossibilitando as análises necessárias. Mais detalhes serão explicitados na Seção 4.1.

3.4.2 Proposta 2

A fim de minimizar a severidade da proposta 1, já discutida na seção anterior, a condição $PV_{\text{médio}}$ foi reduzida para 0,22. Tal valor foi determinado, após discussões com o professor orientador, o qual esse valor corresponde a mínima condição PV suficiente para as análises propostas na seção 3.1.

Foram constatados, após um ensaio de 120 min para cada componente polimérico, que todas as estabilizações se deram em menos de 70 min. Sendo

assim, para esta nova condição o tempo de ensaio foi reduzido para 70 minutos, conforme será detalhado na seção 4.2.

Os demais parâmetros definidos para essa proposta de ensaio podem ser vistos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Planejamento dos ensaios para cada polímero (proposta 2).

Variáveis	PEUAPM	PEAD	PA 6.0	PA 6.6	POM
Tempo [min]			70		
m_c [g]	1258,50	1258,50	709,91	709,91	709,91
F_N [N]	56,26	56,26	41,80	41,80	41,80
a [mm]	3,24	2,94	2,25	2,18	2,01
P_{max} [MPa]	0,55	0,61	0,59	0,61	0,66
$P_{média}$ [MPa]	0,43	0,48	0,47	0,48	0,52
PV_{max} [MPa.m.s ⁻¹]			0,62		
$PV_{médio}$ [MPa.m.s ⁻¹]			0,22		
V [m/s]	0,51	0,46	0,47	0,46	0,42
n [rpm]	484,00 ± 1	439,50 ± 1	451,60 ± 1	438,30 ± 1	404,10 ± 1
d [m]	3647 ± 1	3312 ± 1	3403 ± 1	3302 ± 1	3045 ± 1

A força normal e a velocidade ficaram diferentes para cada polímero para que fosse possível garantir a mesma condição PV e a praticamente a mesma distância de rolamento para cada polímero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo é observado o estudo dos materiais P.A 6.0, P.A 6.6, POM, PEUAPM e PEAD em deslizamento, sem lubrificação, contra cilindros de aço inoxidável AISI 304 em ensaio tipo mancal sobre eixo. Detalhes dos ensaios podem ser encontrados nas seções 3.4.1 e 3.4.2.

4.1 Proposta 1

A escolha dessa condição se deu a partir da análise dos resultados obtidos por Vale (2014). Na Figura 4.1 pode-se ver os gráficos de coeficiente de atrito em função do tempo, a partir de uma breve análise pode-se observar que a condição com menor dispersão dos dados foi a de nível 3, que foi justamente a escolhida, primeiramente, para a realização dos ensaios.

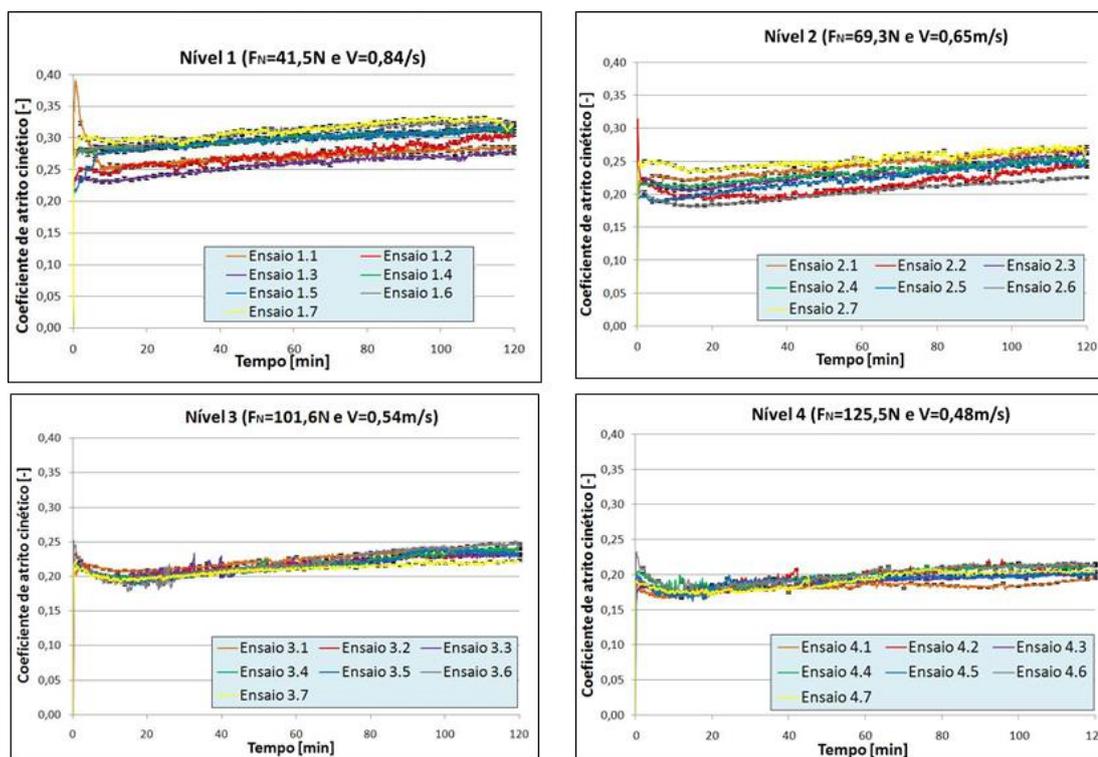


Figura 4.1 - Gráficos Coeficiente de Atrito x Tempo
Fonte: Vale (2014).

Nas Figuras 4.2 e 4.3 pode-se ver, respectivamente, os resultados de coeficiente de atrito e temperatura o qual foram obtidos a partir da realização de um ensaio com cada polímero na proposta de ensaio 1.

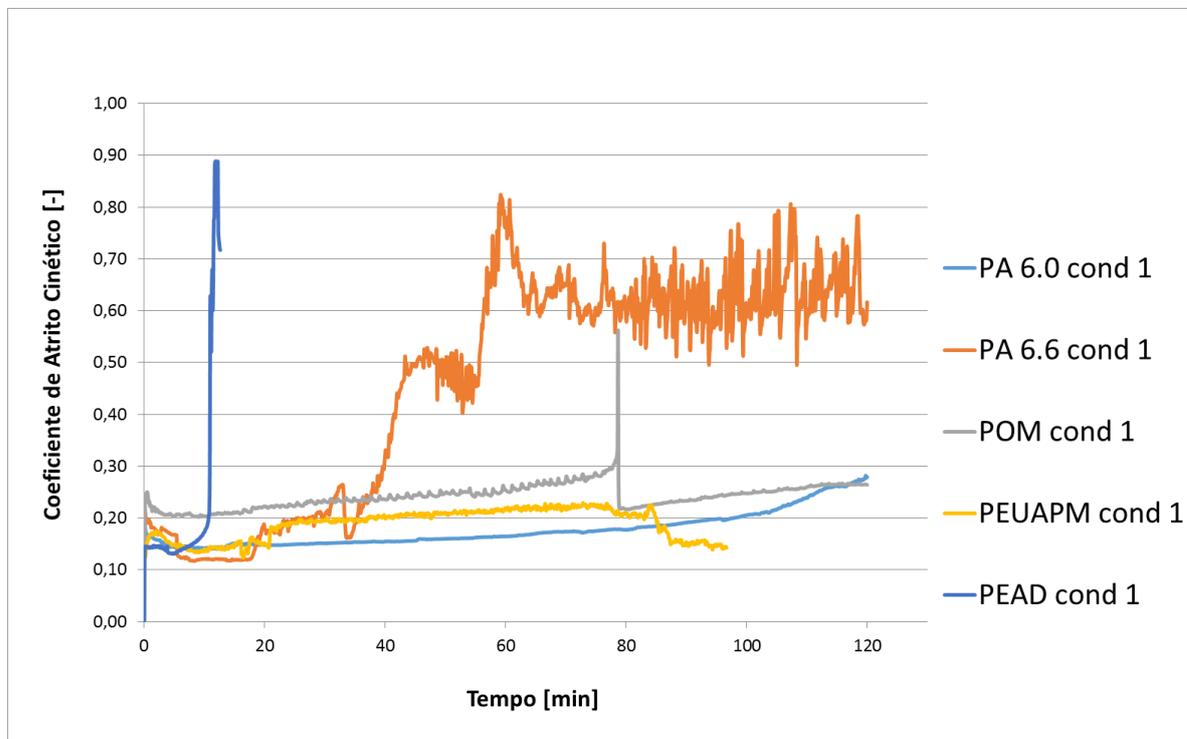


Figura 4.2 - Gráfico coeficiente de atrito condição 1

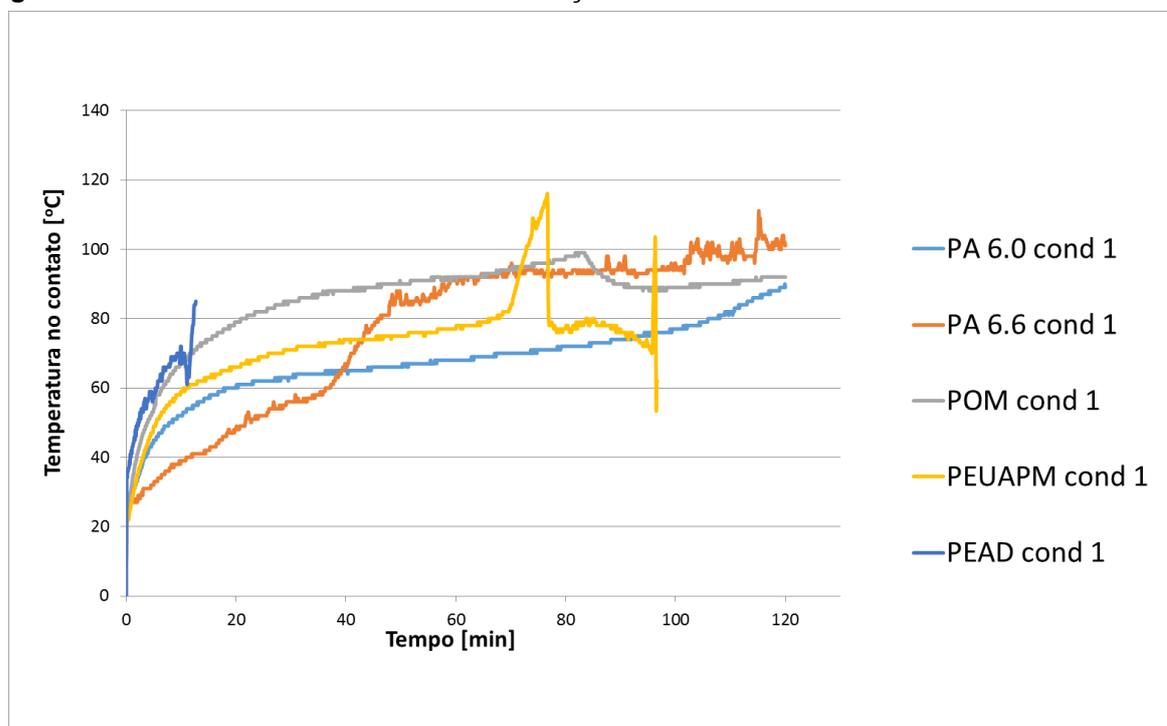


Figura 4.3 – Gráfico temperatura no contato condição 1

Tais resultados se mostraram não conclusivos, uma vez que houveram grandes dispersões sem observação de ponto de estabilização tanto para temperatura, quanto para o coeficiente de atrito e a não visualização do período de amaciamento característico de polímeros conforme mostra a Figura 2.6. Foi observado o surgimento de picos, o qual é apresentado no gráfico de coeficiente de atrito pelo tempo (Figura 4.2). Conclui-se que ocorreram devido ao travamento do eixo no mancal, ou seja, devido a força de atrito excessiva, dada pela condição $PV_{\text{médio}}$ (0,49) proposta por Vale (2014) estar acima da condição $PV_{\text{máx}}$.

Vale ressaltar que para o PEUAPM e PEAD não foi possível a conclusão do tempo total de ensaio, pois o desgaste que esses polímeros sofreram foram muito severos, como se observam nas Figuras 4.4 e 4.5.



Figura 4.4 - Desgaste excessivo PEAD após 20 minutos de ensaio



Figura 4.5 - Desgaste excessivo PEUAPM após 90 minutos de ensaio

Portanto, apesar de que para o PTFE essa condição PV ser aceitável (VALE, 2014), para todos os polímeros analisados nesse trabalho, a condição PV a qual foram ensaiados ultrapassou a condição $PV_{m\acute{a}x}$, fazendo com que os dados obtidos sejam não conclusivos. Essa situação pode ser constatada na Figura 2.23.

4.2 Proposta 2

Após a constatação do desgaste excessivo sofrido pelos polímeros conforme descrito na seção 4.1, foi reduzida a condição PV para a realização dos ensaios, para manter a proposta de cálculo do Coeficiente de Atrito e análise da temperatura e do desgaste. Os parâmetros utilizados para os ensaios de acordo com essa proposta podem ser vistos na Tabela 3.4.

Nos tópicos seguintes, serão discutidos os resultados obtidos após a realização dos ensaios de acordo com essa proposta.

4.2.1 Atmosfera do Laboratório

O monitoramento do laboratório foi feito com base nos valores médios da temperatura e da umidade relativa, o qual é apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4.1 - Valores de temperatura e umidade relativa do laboratório.

Nível	Temperatura [°C]	Umidade relativa [%]
PA 6.0	23,0 ± 1,7	79 ± 6
PA 6.6	24,0 ± 1,7	71 ± 15
POM	24,3 ± 0,6	76 ± 10
PEUAPM	21,7 ± 1,1	83 ± 5
PEAD	21,0 ± 0,8	89 ± 4

As variações na temperatura do laboratório, no presente trabalho, foram menores (cerca de $\pm 1^{\circ}\text{C}$) do que as encontradas por Vale (2014), sendo assim, pode-se afirmar que as variações de temperatura do laboratório não deve ter influência nos resultados obtidos.

A umidade relativa demonstrou dispersões de entre os ensaios devido as variações climáticas do laboratório, entretanto para minimizar possíveis efeitos de umidade nos ensaios, cada contra corpo foi deixado dessecador. Resultados de Vale (2014) para PTFE, não tiveram influência da umidade relativa em ensaios semelhantes, assim como ensaios de Silva *et al.* (1999), não demonstraram influência da variação da umidade relativa no valor do coeficiente de atrito para PEAD.

4.2.2 Coeficiente de atrito cinético

Dada a medição de carga para cada material, foi calculado o coeficiente de atrito cinético considerando os valores dos 60 minutos até 70 min de ensaios. Os valores são ditos médios, devido ao gráfico ser plotados de acordo com a média aritmética de 3 ensaios efetuados. O comportamento do coeficiente de atrito pode ser observado na Figura 4.6.

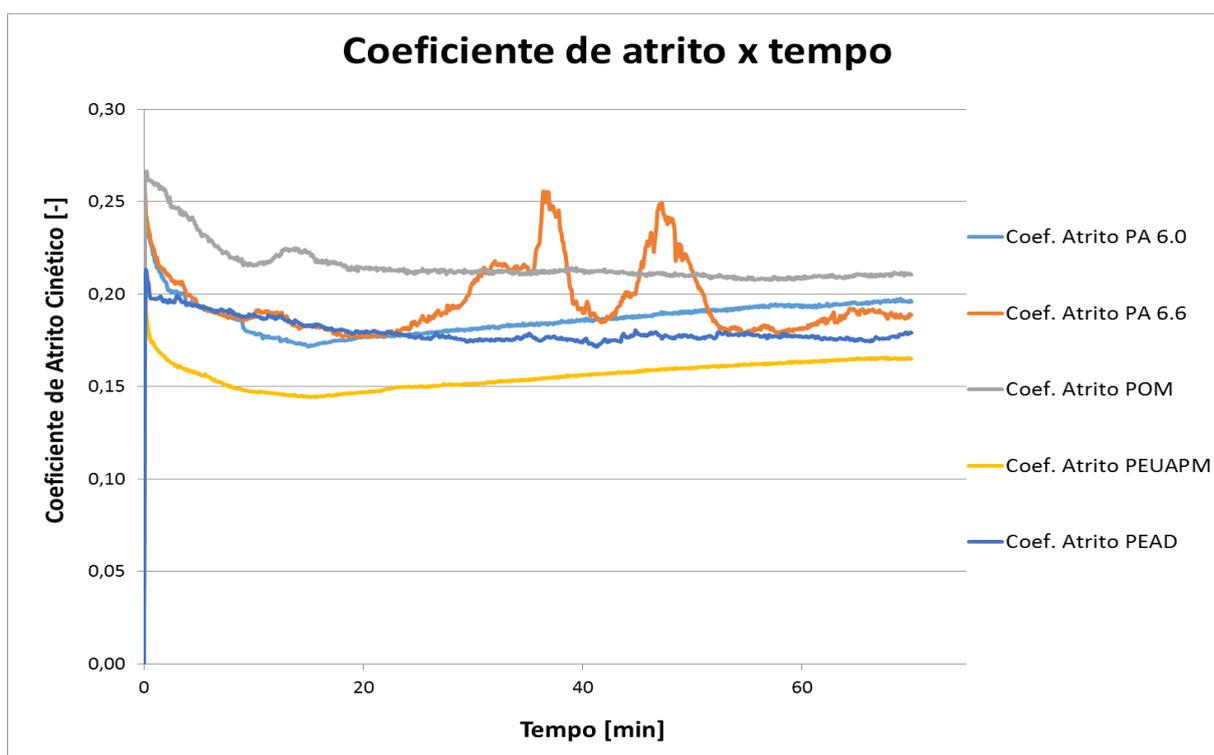


Figura 4.6 – Coeficiente de atrito dos ensaios.

Ao início de cada ensaio percebe-se que para todos os ensaios houve um aumento no valor do coeficiente de atrito cinético, tendendo a partir de alguns

minutos reduzirem até um ponto de estabilidade, como foi discutido na seção 2.2.2, esse é o chamado período de amaciamento.

Dentre os materiais analisados, o comportamento das poliamidas (PA 6.0 e PA 6.6) se mostrou semelhante ao comportamento do PEAD, podendo-se considerá-los estatisticamente iguais. Os picos observados na Figura 4.6 na curva da PA 6.6 podem ser relacionados com rachaduras encontradas nos corpos de prova, que são provenientes do processo de usinagem, as quais ocasionaram um aumento do atrito pontualmente.

Com relação ao coeficiente de atrito do POM, esse se mostrou muito maior, conseqüentemente, mais resistente ao deslizamento, com um valor de coeficiente médio de 0,23. Por fim, o PEUAPM foi menos resistente ao movimento. Como pode ser observado na Figura 4.7.

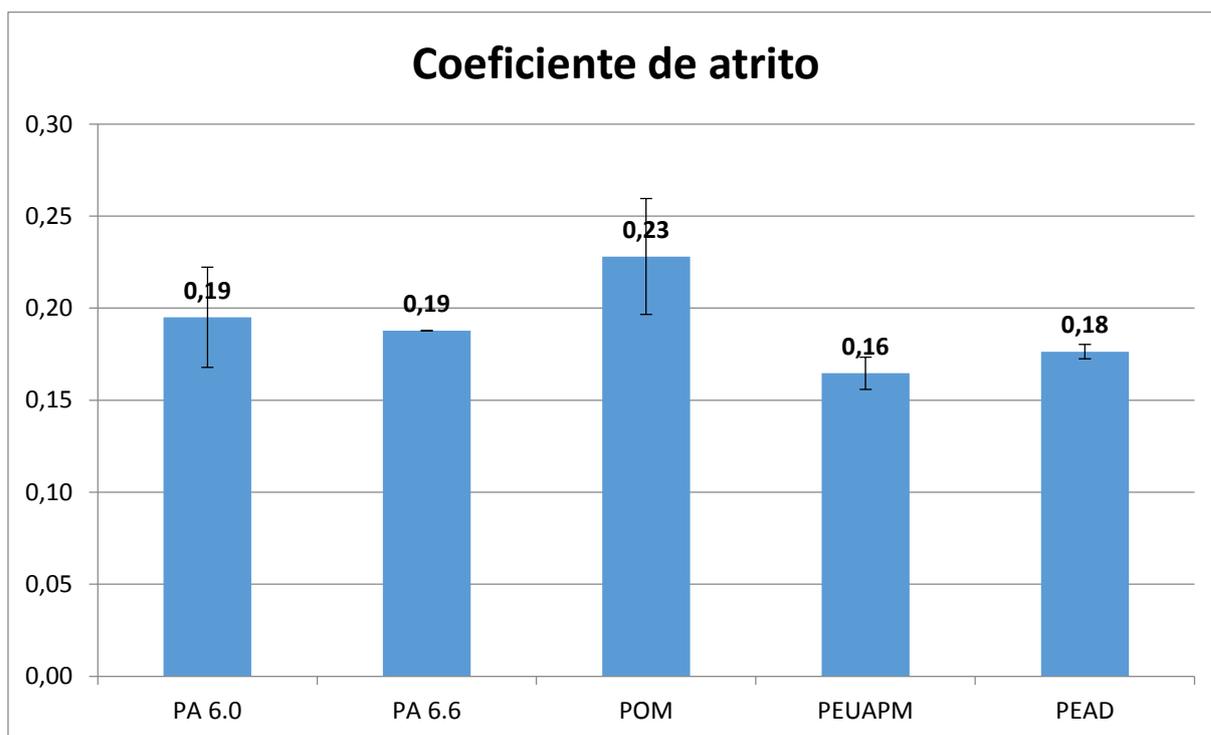


Figura 4.7 – Coeficiente de atrito dos ensaios.

Apesar do comportamento do coeficiente de atrito cinético ter influência de vários outros fatores, a propriedade da massa específica manteve uma relação de linearidade comparando com o valor do coeficiente de atrito. Analisando esse fato de acordo com a literatura ($R^2 = 0,9627$), ele se mostra pertinente tendo em vista que

na seção de contato polímero aço, existe maior quantidade de matéria por unidade de área. Essa relação pode ser observada na Tabela 4.2 e na Figura 4.8.

Tabela 4.2 - Valores de coeficiente de atrito e massa específica.

Polímero	Coeficiente de atrito	Massa Específica [g/cm ³]
PA 6.0	0,19 ± 0,03	1,13
PA 6.6	0,19 ± 0,00	1,14
POM	0,23 ± 0,03	1,42
PEUAPM	0,16 ± 0,01	0,93
PEAD	0,18 ± 0,00	0,95

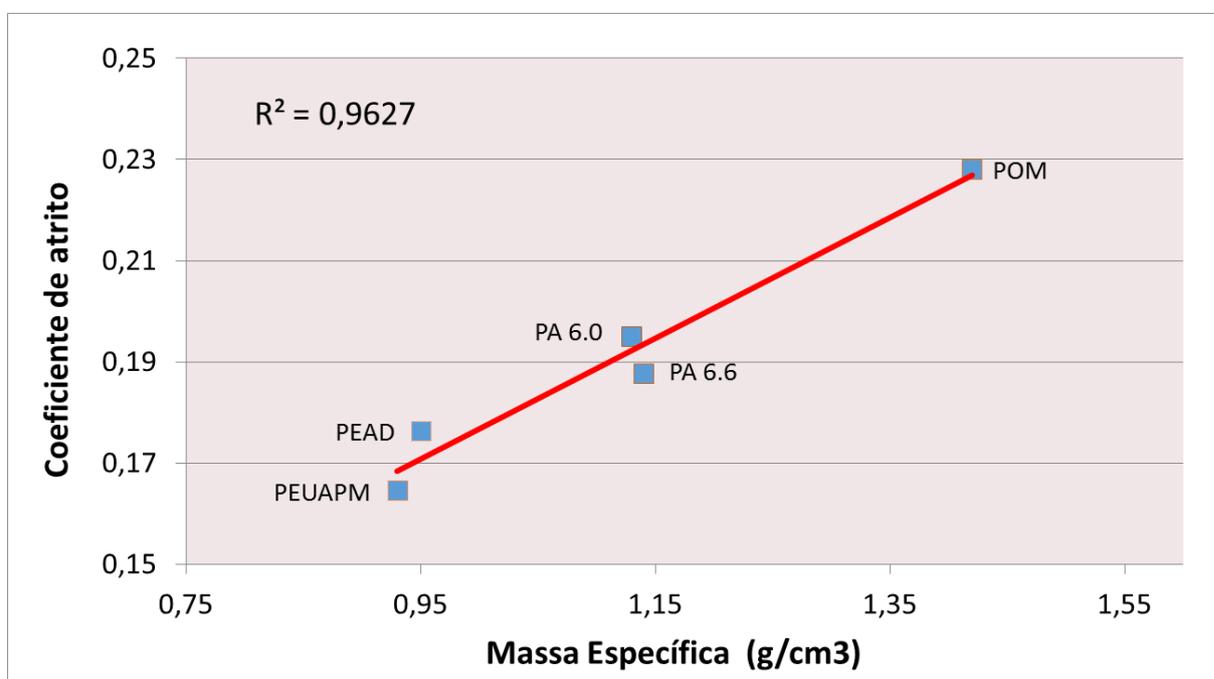


Figura 4.8 – Gráfico coeficiente de atrito em relação a massa específica.

A explicação do maior coeficiente de atrito ter se dado ao POM e o menor ao PEUAPM, está ligado, além da massa específica, às análises das ligações químicas desses materiais. O PEUAPM apresenta a menor polarização se comparado ao demais, seguido pelo PEAD, P.A 6,0, P.A 6,6 e finalmente o POM. A estrutura da cadeia de cada material não se mostrou relevante no estudo, pois todos possuem uma cadeia linear, conforme discutido na seção 2.7. Para a obtenção de uma análise conclusiva das propostas citadas, seria necessária a análise da estrutura

conformacional de cada polímero, podendo ficar, esta análise, como sugestão para novos projetos.

Houve uma disparidade dos resultados do coeficiente de atrito do POM e a P.A 6.0. Porém se analisado, existe uma discreta tendência de crescimento do coeficiente de atrito da poliamida e uma tendência de decréscimo para o poliacetal, convergindo com os resultados apresentados por Ünlü et. Al (2009), descritos na Figura 2.7.

Considerando P.A 6.6, POM e PEUAPM, foi percebido que mesmo em outra condição PV, os polímeros apresentados propiciaram um comportamento semelhante entre si, analisando os coeficientes de atrito e o reporte do artigo de Unal et al.(2004), apresentados na seção 2.2.2.

Sumarizando os resultados apresentados na literatura (seção 2.2.2) se mostraram coerentes com os resultados obtidos nos experimentos, em que o comportamento de ambas as poliamidas e o POM têm características semelhantes. O POM se demonstra com uma resistência ao movimento discretamente maior que as poliamidas, tendo uma relação considerável com a massa específica dentre os materiais analisados.

Os polietilenos tiveram comportamentos parecidos, entretanto o PEAD demonstrou um coeficiente de atrito cinético levemente maior que PEUAPM nos ensaios desenvolvidos. Se ambos forem comparados com às poliamidas e ao polietileno, tais se mostraram menos resistentes ao movimento. Características que condizem com estudos de Chen *et al.* (2004) apresentados na Seção 2.2.2.

4.2.3 Temperatura no contato

Os resultados de temperatura no contato para os cinco materiais estudados, são apresentados na Figura 4.9. Verifica-se uma estabilização da temperatura passada aproximadamente 40 minutos de ensaio.

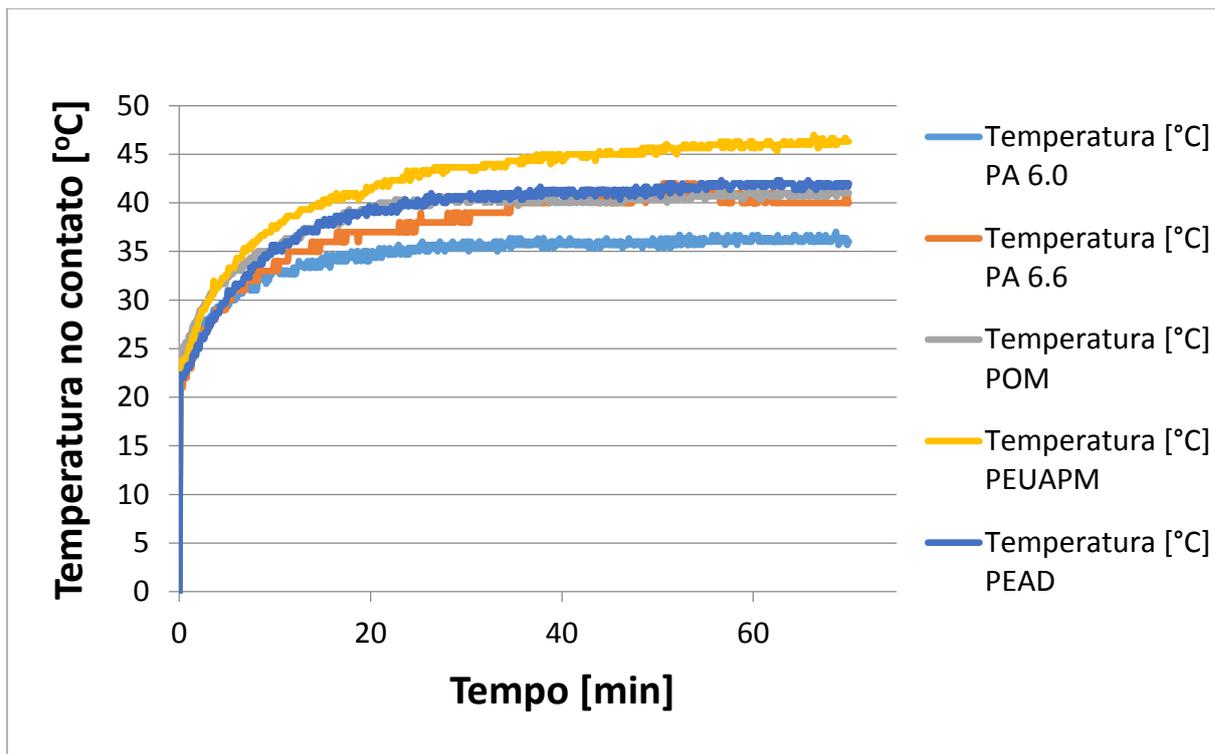


Figura 4.9 – Temperatura no contato dos ensaios.

O comportamento apresentado pode ser comparado com o descrito por Yamaguchi (1990) na Figura 2.19, explicitando que existe uma relação intrínseca entre a condição PV imposta a um determinado par tribológico e a temperatura no contato, conforme discutido na seção 2.5.3.

Observa-se a existência de um aumento da temperatura de contato até um patamar de estabilização, como consequência tem-se, também, a estabilização do coeficiente de atrito cinético. A temperatura de estabilização está em função a condição PV imposta, conforme já discutido na fundamentação teórica.

Os valores médios para temperatura são mostrados na Figura 4.10, com o intuito de avaliar-se a estabilização da temperatura no contato nos últimos 10 minutos de ensaio.

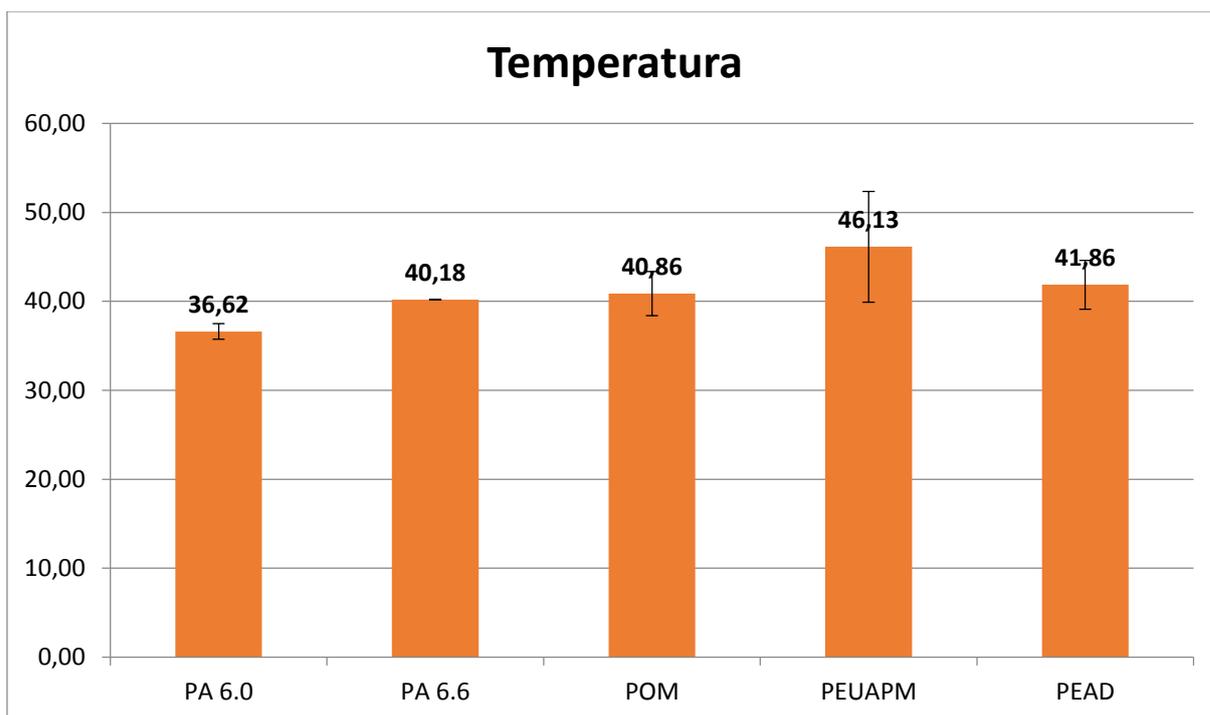


Figura 4.10 – Temperatura dos ensaios.

A explicação para o comportamento apresentado da temperatura no contato, foi baseada na proposta de que a condição PV é proporcional à taxa de energia dissipada em forma de calor (BHUSHAN, 2002). Os valores médios de temperatura foram próximos, em torno de 41 ± 5 °C.

Entretanto se as temperaturas forem analisadas ponto a ponto (Figura 4.9), a temperatura se mostra levemente desigual. A disparidade se dá mesmo em condições PV constantes e idênticas (Tabela 3.6) aos cinco materiais. Porém as estruturas e o comportamento de dissipação de energia não são semelhantes, ou seja, devido as características de condutibilidade térmica de cada material, conforme pode ser visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores de temperatura e condutividade térmica.

Polímero	Temperatura [°C]	Cond. Térmica [w/m.k]
PA 6.0	$36,62 \pm 0,87$	0,23
PA 6.6	$40,18 \pm 0,00$	0,23
POM	$40,86 \pm 2,48$	0,31
PEUAPM	$46,13 \pm 6,23$	0,40
PEAD	$41,86 \pm 2,75$	0,43

Observa-se que os resultados médios da Figura 4.10 contemplam uma leve tendência de valor maior de temperatura aos Polietilenos se comparados com as Poliamidas e ao POM, concordando com a proposta de Yamaguchi (1990) (Figura 2.25) em determinadas condições. Por fim fica impossível determinar uma relação da temperatura com o coeficiente de atrito devido aos diversos fatores que influenciam ambos os fenômenos como já foram explicitados na Seção 2.5.4.

4.2.4 Desgaste

4.2.4.1 Taxa de desgaste mássico médio

A taxa de perda mássica foi utilizada para mensurar o desgaste do par tribológico. Foi observado que houve perda mássica predominantemente nos polímeros. Fato que já era esperado devido a relevante diferença entre os módulos de elasticidade dos polímeros e do aço inox, tendo as deformações restringindo-se basicamente aos polímeros, gerando um maior dano à superfície e perda de massa deste por desgaste. Para efeito de cálculo e por limitação na precisão da balança (0,001g), a perda mássica do aço inox foi desconsiderada. Observam-se na Tabela 4.4 os valores da perda mássica para cada componente polimérico.

Tabela 4.4 - Valores de taxa de desgaste mássico média dos ensaios com duração de 70 minutos.

Material	Taxa de desgaste mássico média [g/h]	Força normal [N]	Velocidade de deslizamento [m/s]
PA 6.0	0,006 ± 0,002	41,80	0,47
PA 6.6	0,006 ± 0,001	41,80	0,46
POM	0,005 ± 0,001	41,80	0,42
PEUAPM	0,009 ± 0,002	56,26	0,51
PEAD	0,008 ± 0,002	56,26	0,46

A partir dos dados coletados, constata-se um crescimento do valor médio de taxa de desgaste com o incremento do carregamento normal, mesmo que para materiais diferentes. Lembrando que a aplicação da força ser diferente para determinados polímeros foi necessário para manter a condição $PV_{\text{médio}}$ constante conforme discutido na Seção 3.4.2. Tal fato também foi observado em ensaios semelhantes com o PTFE por Vale (2014) e conforme prevê a Equação (3). Para Hu

(1998), Bahadur e Tabor (1985), Lancaster *et al.* (1972), Briscoe (1981), Blanchet *et al.* (1998), a taxa de desgaste é aumentada com o incremento da força normal aplicada e da distância percorrida. Vale ressaltar também, que os valores de perda mássica mensurados são pequenos até para a precisão da balança.

Foi observada a maior resistência ao desgaste do poliacetal e de ambas as poliamidas, 6.0 e 6.6, se comparadas com os materiais com base de polietilenos, PEUAPM e PEAD. Ünlü *et al.* (2009) publicou resultados com condição PV ($0,13 \text{ Mpa.m.s}^{-1}$) e tempo de ensaios de 150 minutos, entretanto os resultados tiveram também uma maior resistência ao desgaste para o POM e poliamidas, e uma menor para o polietileno.

Os resultados se deram desta maneira devido as propriedades tribológicas envolvidas a cada material, como por exemplo, o coeficiente de atrito e a temperatura de contato. Tendo em vista a sua baixa escala (ordem de 10^{-3}) de desgaste para todos os materiais, não foi observada a formação de grande quantidade de partículas desprendidas.

4.2.4.2 Coeficiente dimensional de Archard

Para o cálculo do coeficiente dimensional de Archard, utilizou-se a Equação (3), considerando a massa perdida durante os 70 minutos de ensaio, a densidade fornecida pelo certificado de matéria-prima do fornecedor e a força normal utilizada durante o ensaio. Os valores para cada polímero podem ser vistos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Coeficiente dimensional de Archard

Material	Coeficiente dimensional de Archard (k) $\times 10^{-14} [\text{m}^3/(\text{N.m})]$
PA 6.0	$6,39 \pm 0,00$
PA 6.6	$6,53 \pm 0,00$
POM	$4,74 \pm 0,00$
PEUAPM	$8,09 \pm 0,00$
PEAD	$7,75 \pm 0,00$

De acordo com Ünlü *et al* (2008) e Ashby (1992) (Figura 2.21), o coeficiente dimensional de Archard para os polietilenos, poliamidas e poliacetal, ficaram com valores na ordem de $10^{-15} [\text{m}^3/(\text{N.m})]$. Sendo que o POM apresentou o menor valor, as poliamidas um valor intermediário e os polietilenos os valores mais elevados.

No presente trabalho, o coeficiente dimensional de Archard se concentrou em valores na ordem de 10^{-14} [$\text{m}^3/(\text{N.m})$], três possíveis explicações para essa diferença são: à pouca perda mássica, conforme evidenciado na Seção 4.2.4.1; a limitação da precisão da balança, a qual é na terceira casa decimal após a vírgula (Seção 3.1.2.2); a duração insuficiente do ensaio.

4.2.5 Análise de FTIR

Foi realizada a tentativa de análise de FTIR nos corpos poliméricos para verificar alterações devido ao ensaio de desgaste em grupos funcionais presentes em compostos orgânicos, grupo no qual os polímeros se enquadram.

Com relação ao resultado, eles se mostraram absolutamente não conclusivos. Foi feita a tentativa de análise de FTIR na superfície da P.A 6.0 que foi ensaiada, através da metodologia reflexiva, uma vez que, conforme dito no item 4.2.4.1, observaram-se poucas partículas de desgaste desprendidas dos polímeros durante os ensaios.

A análise não foi conclusiva, pois a intensidade refletida é muito pequena e se confunde com o ruído de fundo. Esse comportamento pode ser visto na Figura 4.11, a qual mostra que a transmitância, ou seja, quantidade de energia absorvida pelos corpos poliméricos varia muito em diferentes níveis de número de onda (frequência).

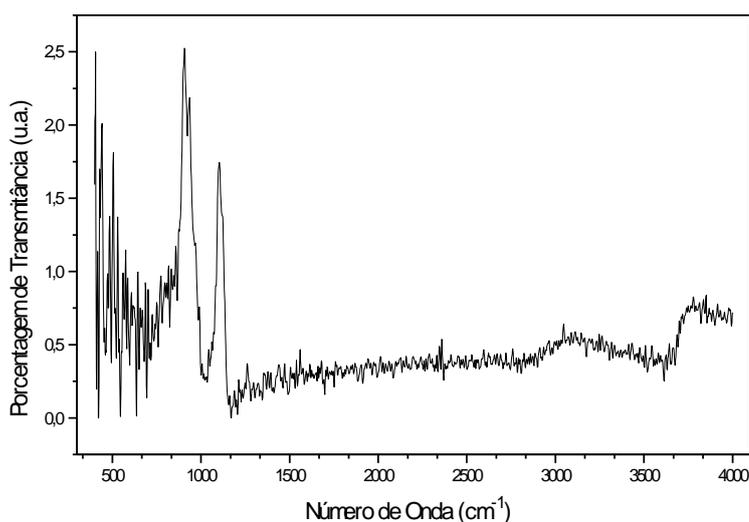


Figura 4.11 – Espectros obtido a partir da análise de FTIR na superfície do P.A 6.0

4.2.6 Alterações de topografia das superfícies submetidas ao desgaste

4.2.6.1 Aço Inoxidável

Na Tabela 4.6 pode-se ver os resultados das 6 análises de interferometria nos contra corpos de aço inoxidável, 1 análise no corpo de prova que não foi ensaiado e 5 análises realizadas nos contra corpos que foram ensaiados com cada polímero.

Tabela 4.6 - Resultados de topografia para o aço inoxidável

Parâmetro	Sem Ensaio	P.A 6.0	P.A 6.6	POM	PEUAPM	PEAD
Sa [μm]	1,07	1,06	1,01	1,03	1,09	1,08
Sq [μm]	1,28	1,27	1,25	1,28	1,32	1,29
Sz [μm]	5,88	6,23	5,92	5,36	6,33	5,88
Spd [mm^{-2}]	3012	2565	3422	4503	2749	3154
Sk [μm]	0,35	0,38	0,31	0,34	0,45	0,43

Nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 podem-se ver as imagens obtidas pela análise topográfica no aço inoxidável antes e após os ensaios.

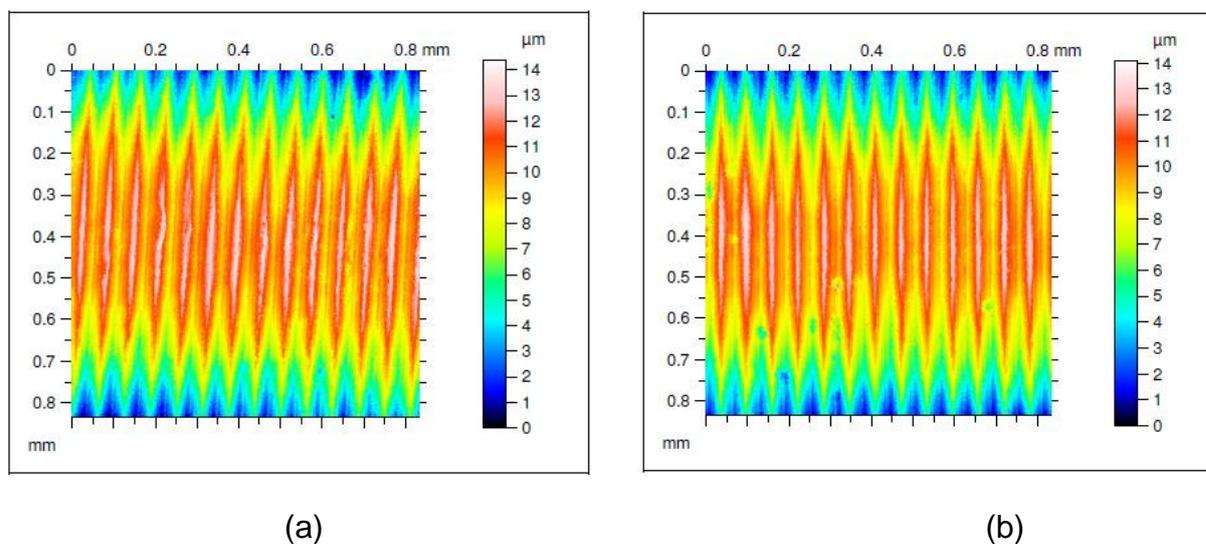
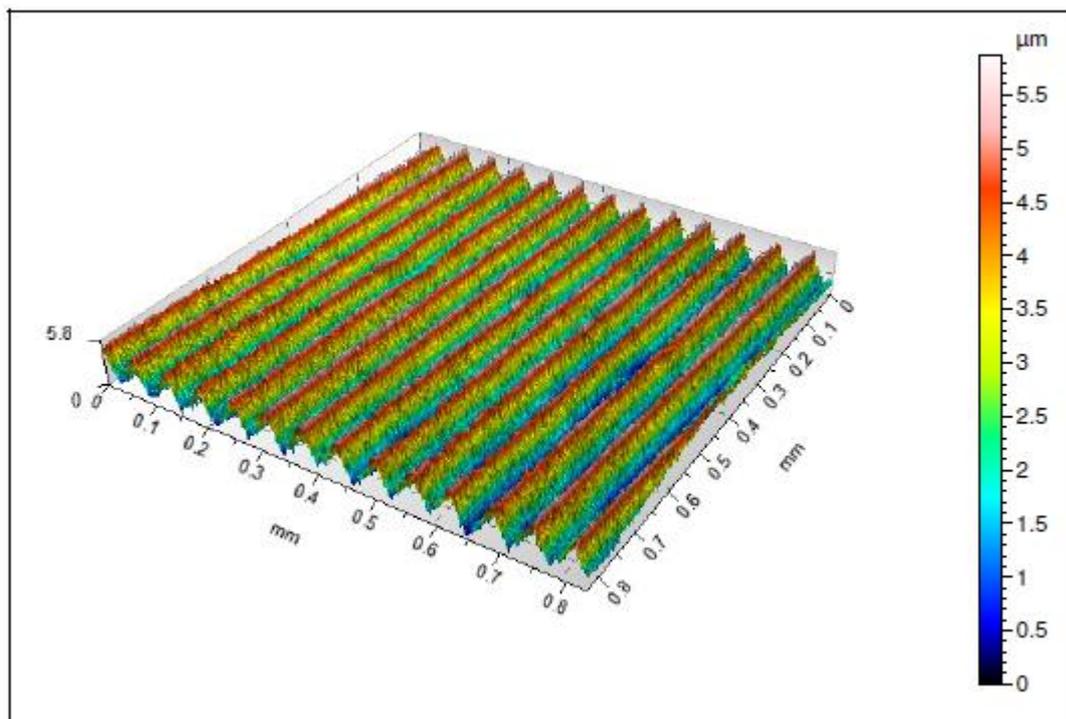
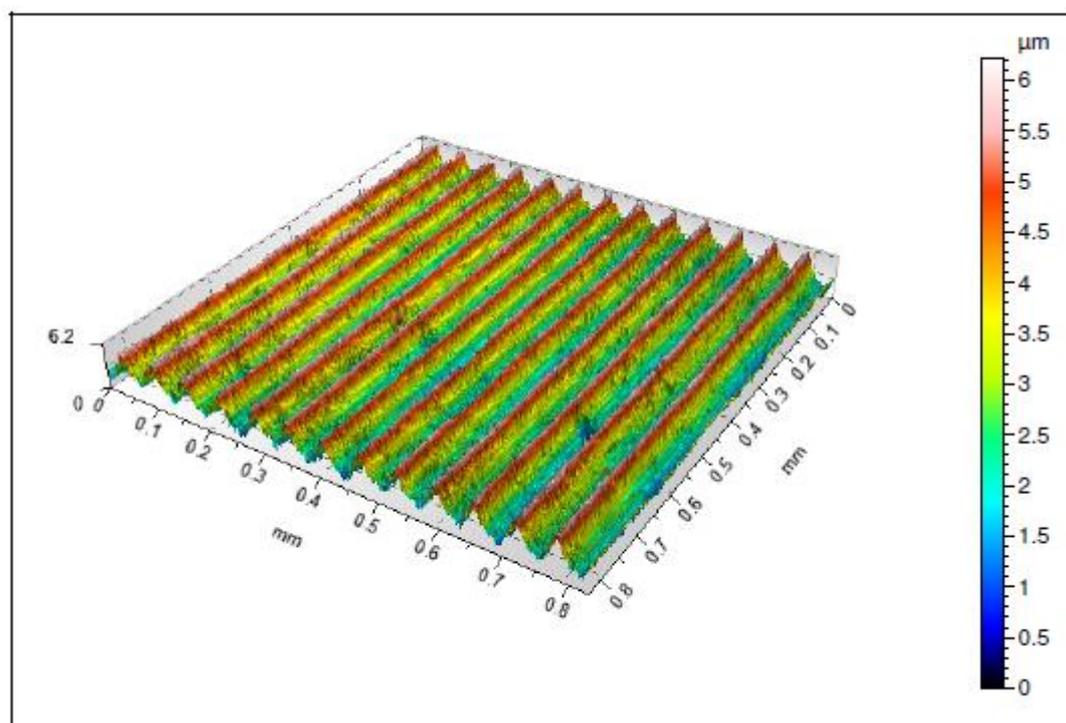


Figura 4.12 – Topografias do aço inoxidável: antes (a) e após o ensaio (b) em 3D

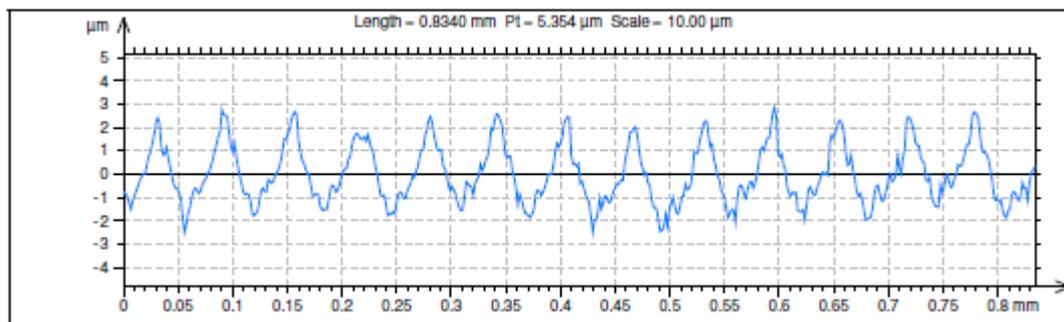


(a)

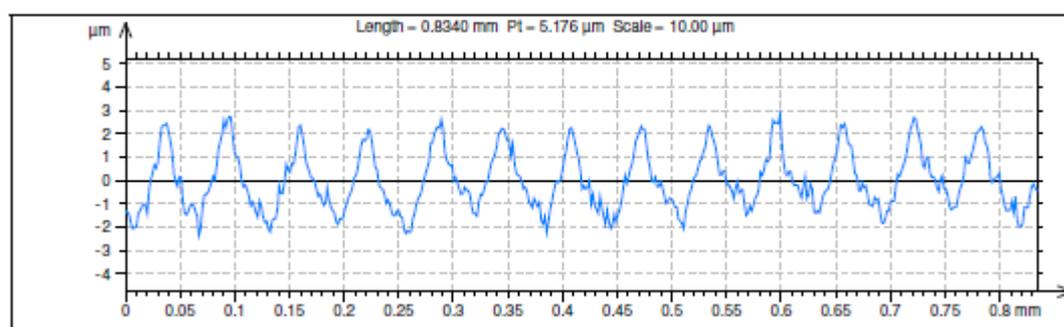


(b)

Figura 4.13 – Topografias do aço inoxidável: antes (a) e após o ensaio (b) em 3D



(a)



(b)

Figura 4.14 – Perfil de rugosidade do aço inoxidável: antes (a) e após o ensaio (b)

Também foram obtidas imagens de microscopia eletrônica por varredura (MEV) dos contra corpos de aço inoxidável. As imagens de um contra corpo que não sofreu desgaste e de um que foi ensaiado com o PEUAPM podem ser observadas nas Figuras 4.15 e 4.16, a seta em vermelho indica o sentido de deslizamento o qual foi submetido durante o ensaio.

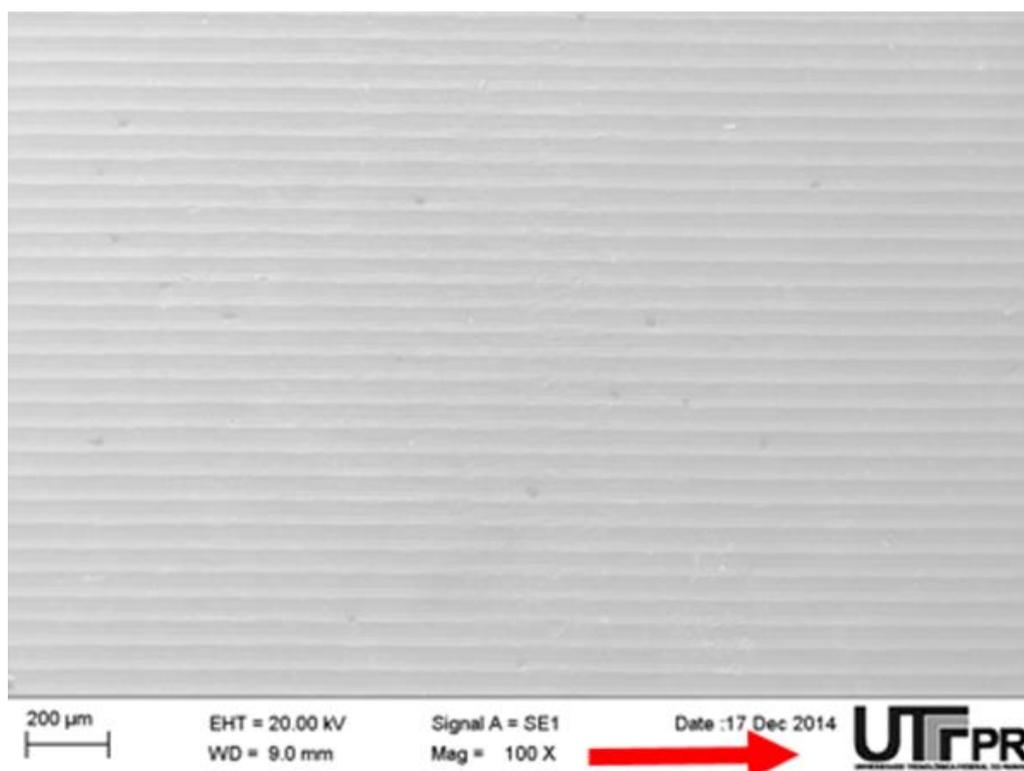


Figura 4.15 - MEV no Aço Inoxidável sem ser ensaiado

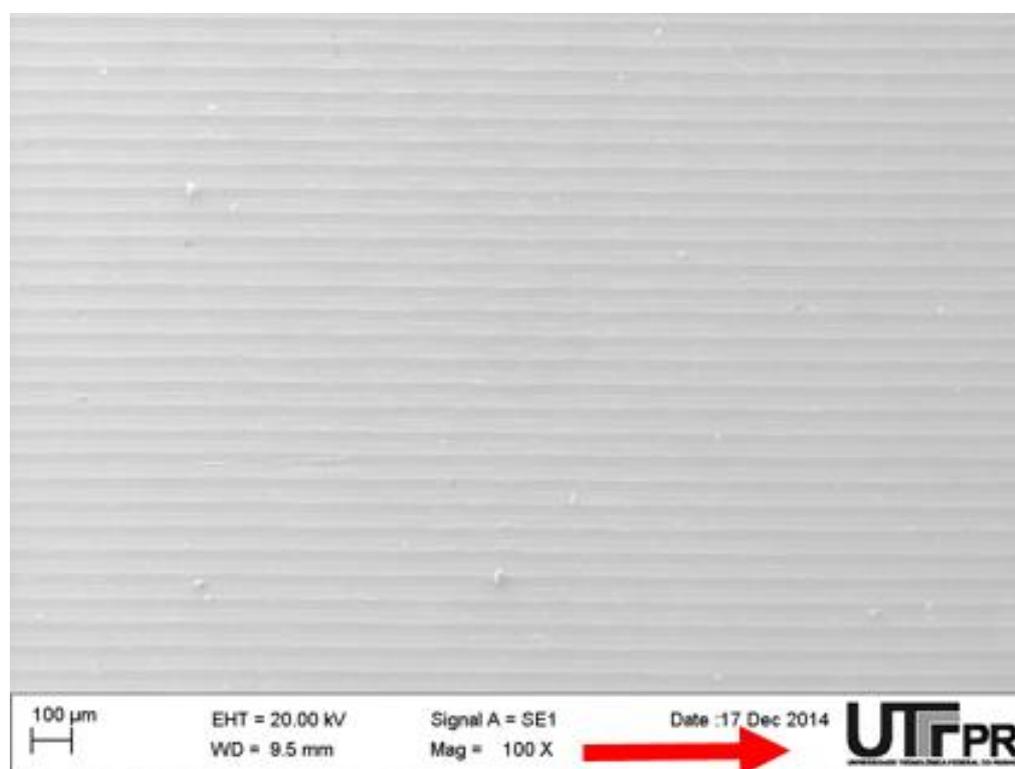


Figura 4.16 - MEV Aço Inoxidável ensaiado com PEUAPM

A partir da análise dos dados da Tabela 4.6 e das Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 da análise de interferometria para o aço inoxidável, se observou que em relação ao contra corpo que não foi ensaiado não houve grandes alterações em comparação ao contra corpos que foram submetidos ao ensaio.

Também se pode confirmar essa hipótese observando as imagens obtidas no MEV, o contra corpo não ensaiado em comparação com o que foi ensaiado com o polímero PEUAPM, o qual foi o polímero que se constatou maior taxa de desgaste mássico médio (Seção 4.2.4.1), não se observa diferença nas imagens, com exceção de algumas partículas, muito pequenas, dispersas na superfície do contra corpos, as quais não foram visualizadas sem o auxílio das imagens em MEV.

O principal motivo que explica a não diferença na interferometria é a grande diferença da dureza nas propriedades mecânicas entre o aço inoxidável e os polímeros. Já a adesão de pequenas partículas dos polímeros no aço é devido ao filme transferido ter aderido fortemente ao contra corpo, ocasionando também, uma baixa taxa de desgaste (HUTCHINGS, 1992).

4.2.6.2 Polímeros

Nas Figuras 4.17 a 4.21, podem ser vistas as topografias em 3D dos polímeros antes e após os ensaios.

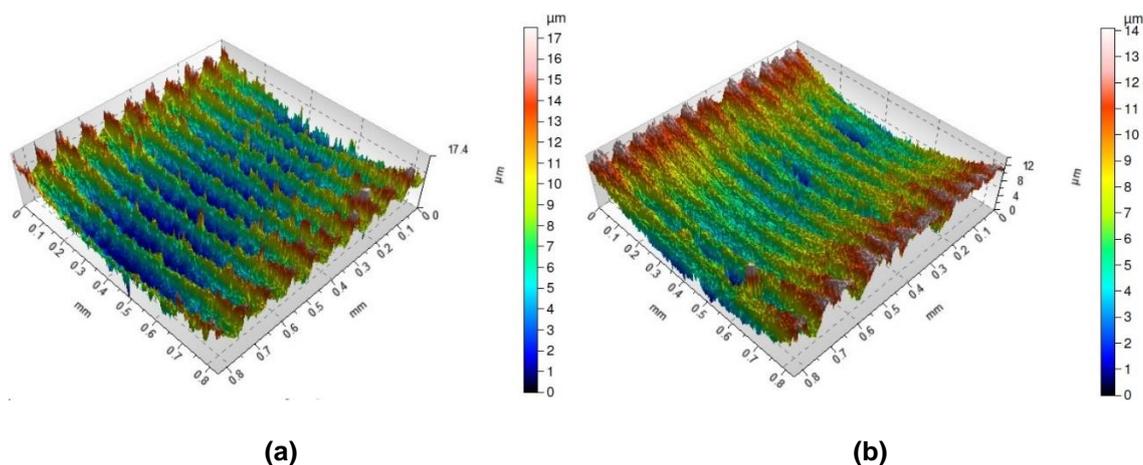
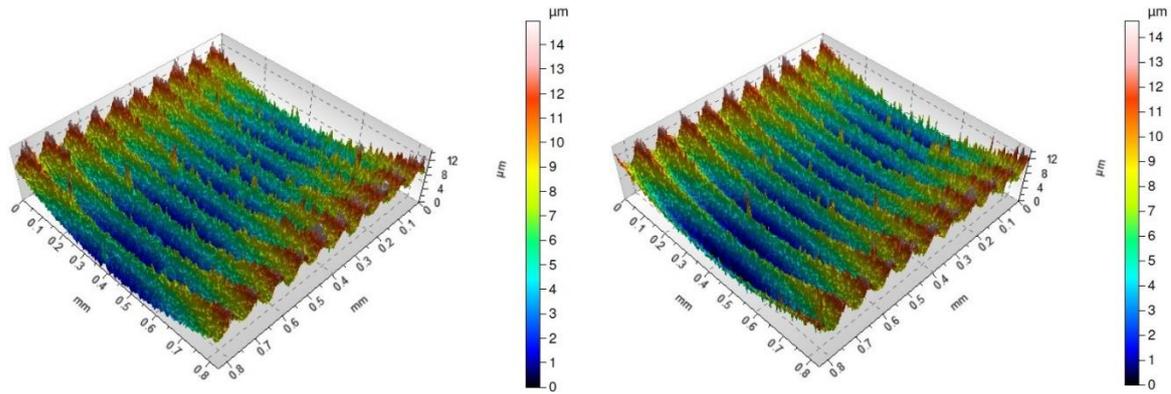


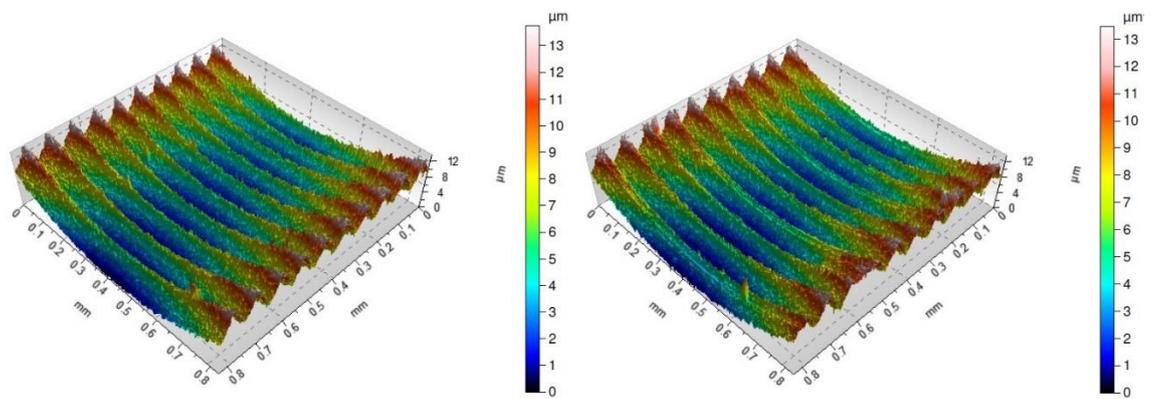
Figura 4.17 – Topografia do P.A 6.0 não ensaiado (a) e ensaiado (b)



(a)

(b)

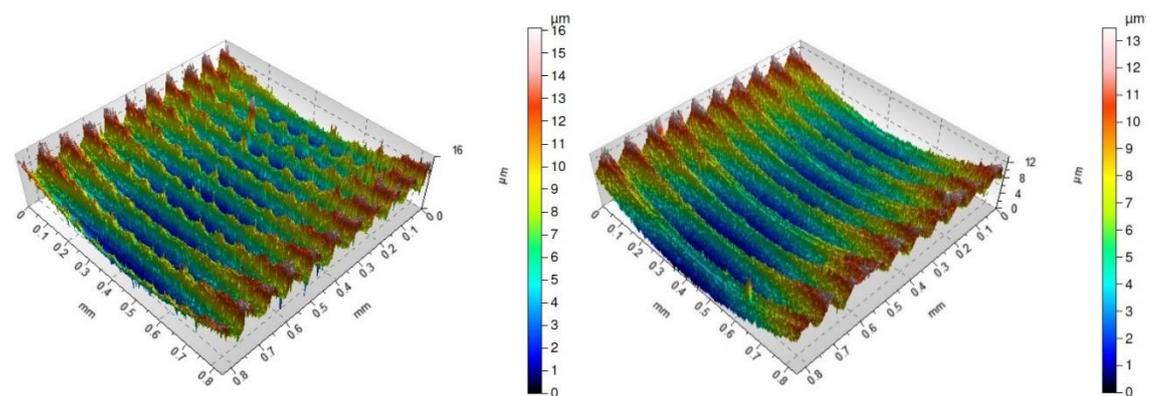
Figura 4.18 - Topografia do P.A 6.6 não ensaiado (a) e ensaiado (b)



(a)

(b)

Figura 4.19 - Topografia do POM não ensaiado (a) e ensaiado (b)



(a)

(b)

Figura 4.20 - Topografia do PEAD não ensaiado (a) e ensaiado (b)

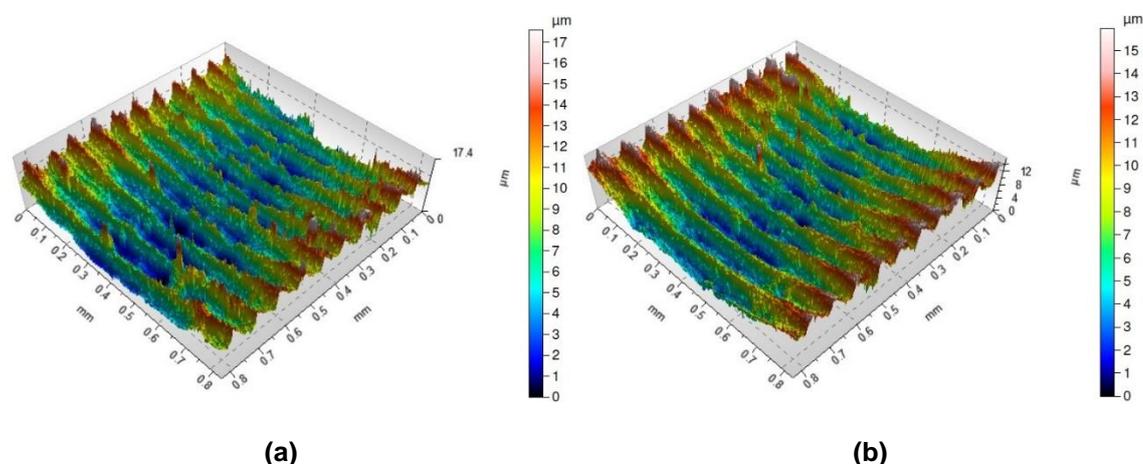


Figura 4.21 - Topografia do PEUAPM não ensaiado (a) e ensaiado (b)

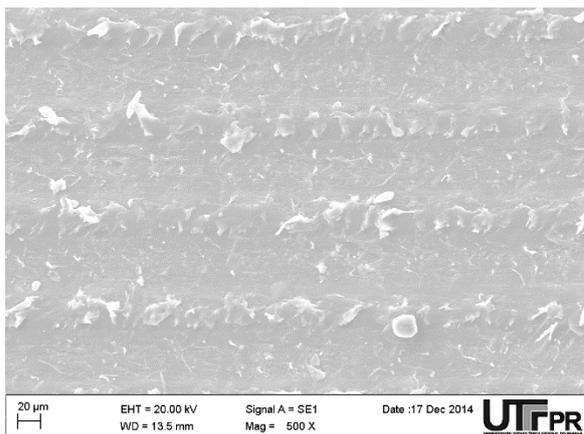
Observando as topografias em 3D, percebem-se de modo qualitativo um alisamento e remoção dos picos na superfície dos polímeros que foram ensaiados em relação aos que não foram ensaiados. Pode-se observar esse alisamento também quando comparamos os parâmetros obtidos. Na Tabela 4.7 têm-se os valores dos parâmetros dos polímeros que foram e dos que não foram ensaiados.

Tabela 4.7 - Resultados de topografia para os polímeros

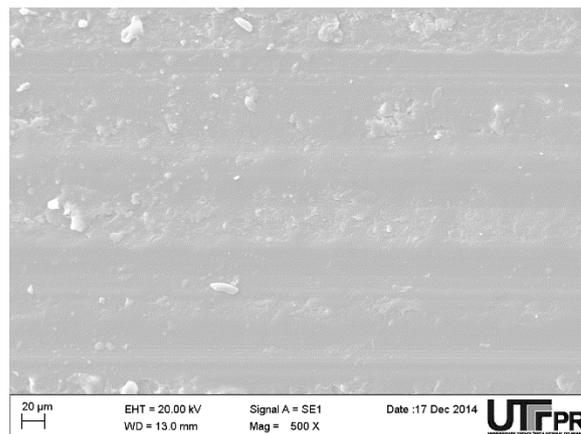
Parâmetro	Condição	P.A 6.0	P.A 6.6	POM	PEUAPM	PEAD
Sa [μm]	Não Ensaiado	1,91	1,45	1,48	1,68	2,07
	Ensaiado	1,15	1,42	1,39	1,61	1,94
Sq [μm]	Não Ensaiado	2,26	1,74	1,73	2,04	2,39
	Ensaiado	1,49	1,70	1,61	1,92	2,23
Sz [μm]	Não Ensaiado	23,75	16,19	10,85	21,14	22,30
	Ensaiado	15,25	17,87	11,09	18,44	13,66
Spd [mm^2]	Não Ensaiado	1741	1615	2071	1355	1381
	Ensaiado	1283	1581	2029	1109	1316
Sk [μm]	Não Ensaiado	0,67	0,56	0,28	0,50	0,46
	Ensaiado	-0,77	0,52	0,14	0,14	0,10

Comparando os valores da Tabela 4.7, realmente nota-se que para os parâmetros Spd e Sa houve redução para todos os polímeros, evidenciando o alisamento e remoção de picos da superfície ensaiada em comparação a não ensaiada.

Para melhor análise do tipo de desgaste que os polímeros sofreram e comprovar esse alisamento da superfície, foram feitas imagens no microscópio eletrônico de varredura. Percebeu-se, para todos os polímeros, que realmente houve um alisamento da superfície e um desgaste adesivo, como exemplo, para as poliamidas e o poliacetal, podem ser vistos nas Figuras 4.22 a 4.24 as imagens obtidas em MEV com aumento de 500x.

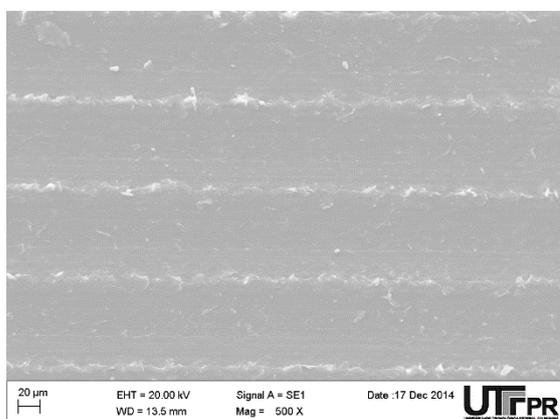


(a)

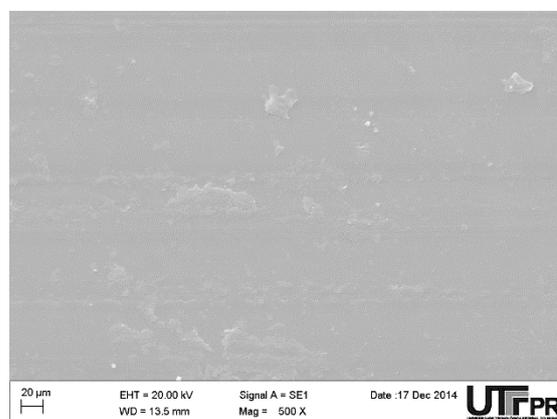


(b)

Figura 4.22 – Imagem em MEV do P.A 6.0 não ensaiado (a) e ensaiado (b) com 500x de aumento

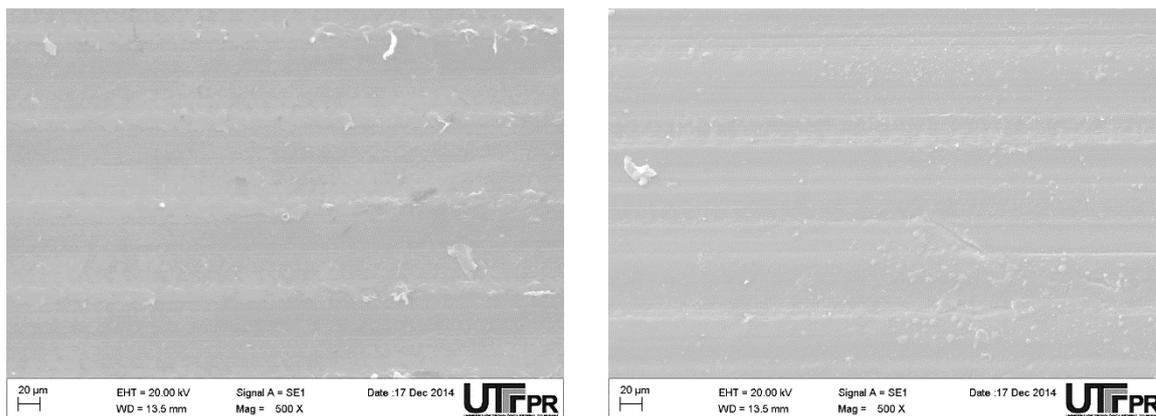


(a)



(b)

Figura 4.23 – Imagem em MEV do P.A 6.6 não ensaiado (a) e ensaiado (b) com 500x de aumento



(a)

(b)

Figura 4.24 – Imagem em MEV do POM não ensaiado (a) e ensaiado (b) com 500x de aumento

Dentre os 5 polímeros o poliacetal foi o que apresentou maior quantidade de partículas dispersas e aderidas ao polímero após o ensaio.

Nas Figuras 4.25 e 4.26, podem ser vistas imagens em MEV dos polietilenos com aumento de 50x.

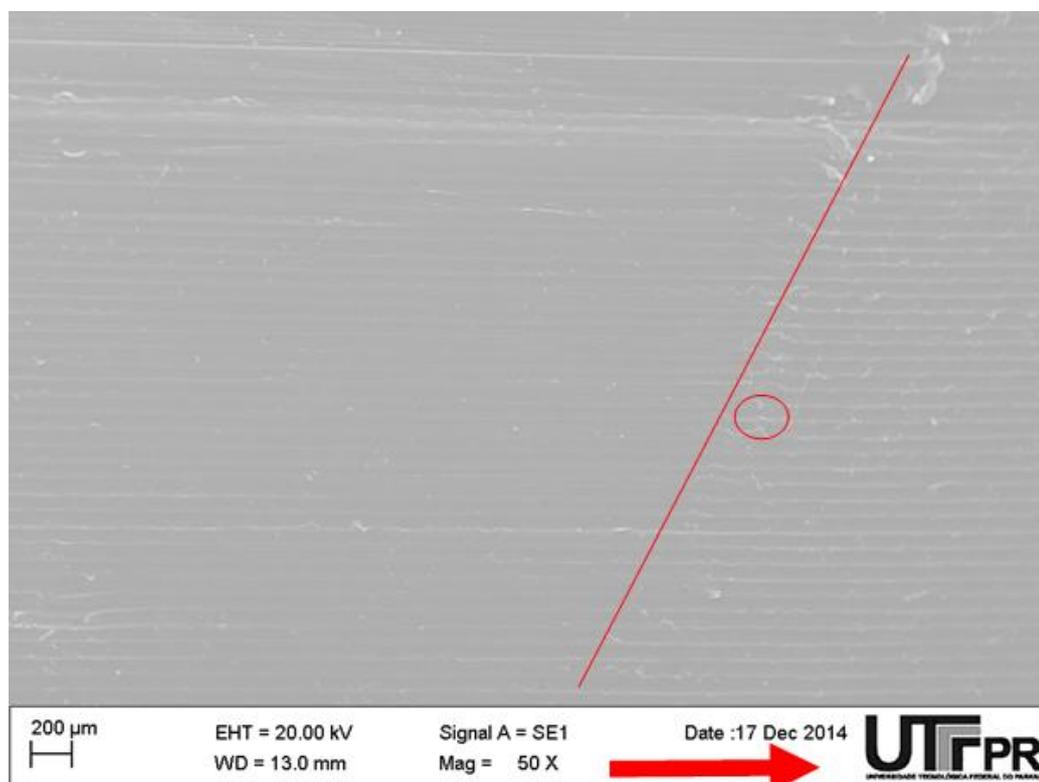


Figura 4.25 – Imagem em MEV do PEUAPM com 50x de aumento

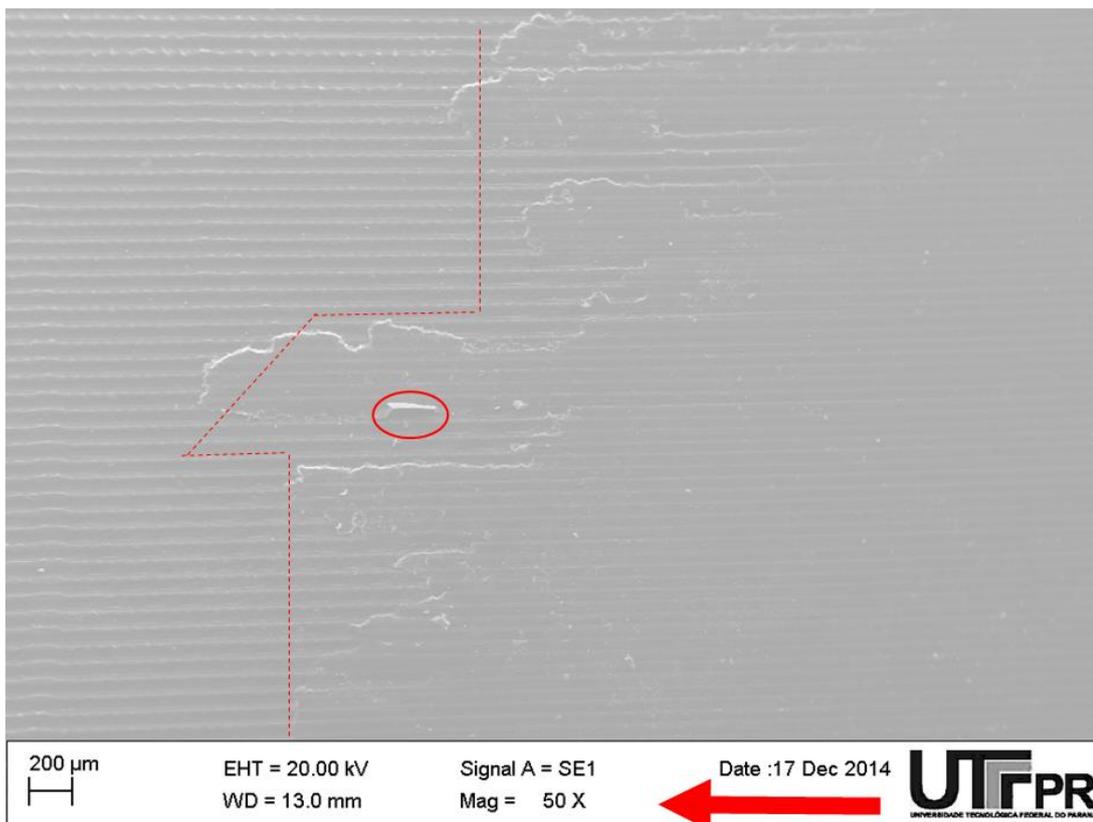


Figura 4.26 – Imagem em MEV do PEAD com 50x de aumento

Pode-se também observar nas Figuras 4.25 e 4.26, as linhas pontilhadas indicam a região aonde de transição aonde aconteceu o desgaste de acordo com o sentido de deslizamento indicado pela seta vermelha. É visível a diferença de alisamento da superfície da região desgastada e da não desgastada e é visível, também, avaliando o sentido de deslizamento, o acúmulo de pequenas partículas de desgaste na região de transição.

As regiões circuladas em vermelho nas Figuras 4.25 e 4.26 foram ampliadas e podem ser vistas nas Figuras 4.27 e 4.28.

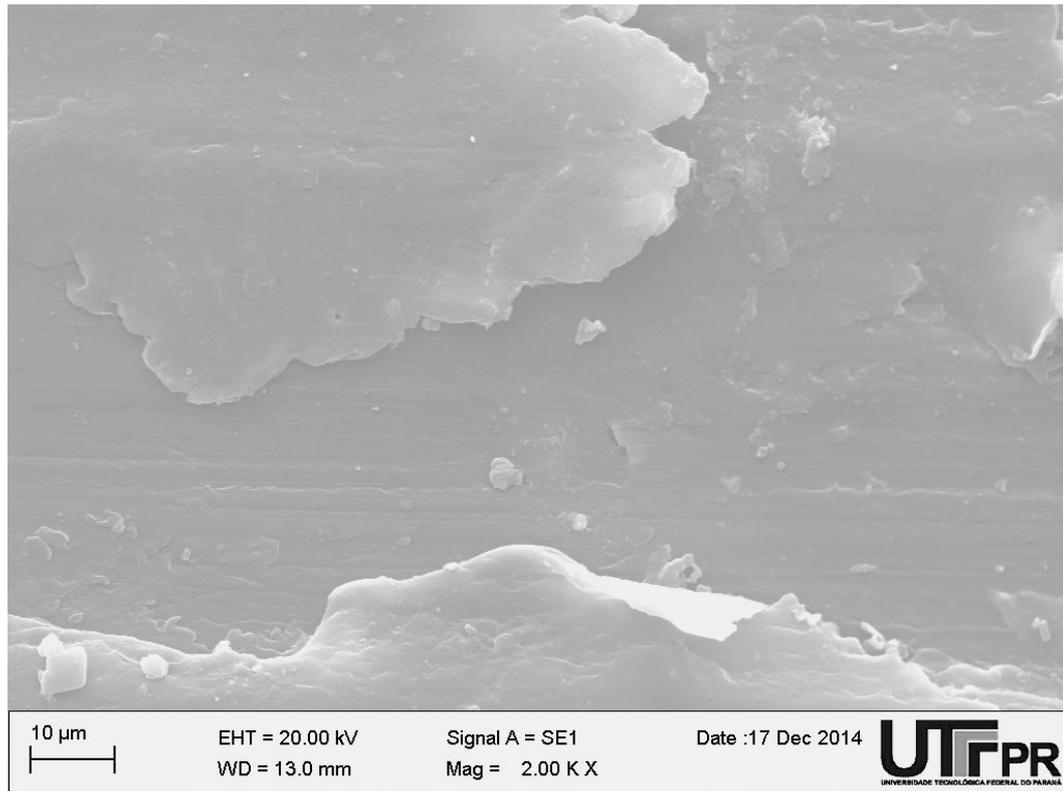


Figura 4.27 - Imagem em MEV do PEUAPM com 2000x de aumento

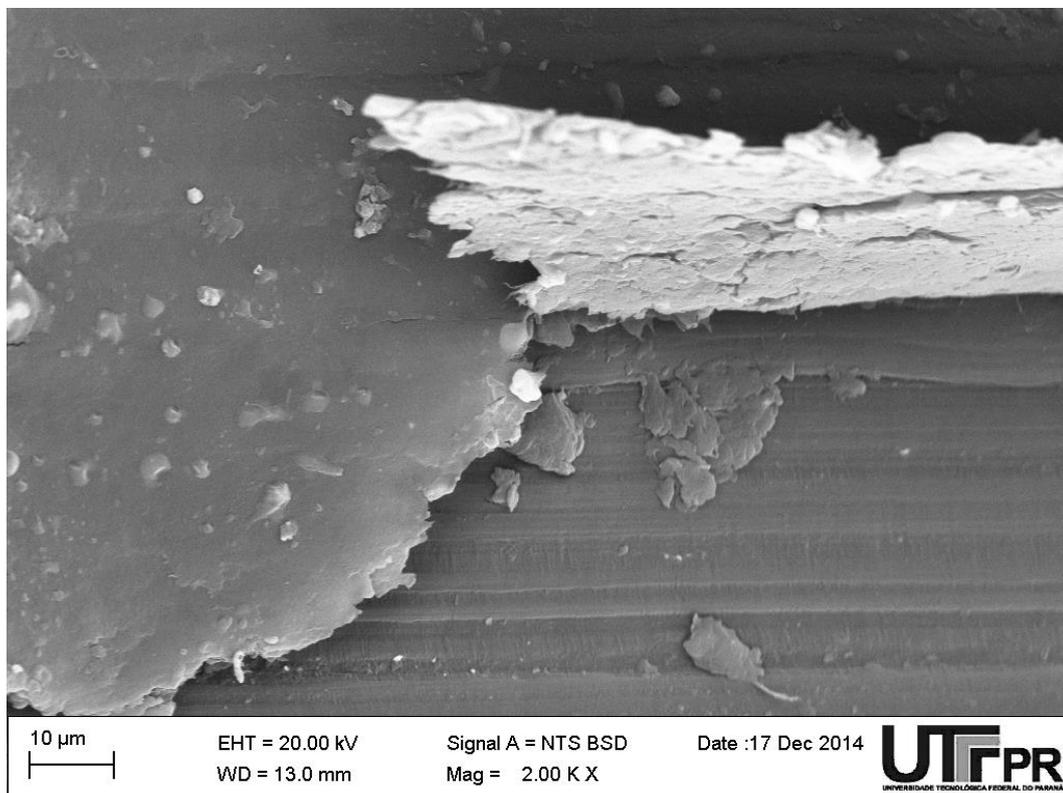


Figura 4.28 - Imagem em MEV do PEAD com 2000x de aumento

Nas Figuras 4.27 e 4.28 é possível observar um dobramento das partículas poliméricas ocasionando nos polietilenos. Este fato indica um início de desprendimento de filme.

É importante ressaltar que o tamanho das partículas de desgaste dos polietilenos, em comparação com os demais polímeros, é maior. Isso se deve a cadeia polimérica característica dos polietilenos, a qual é formada somente por ligações carbono-hidrogênio. Ligações que são mais fáceis de serem quebradas do que quando se tem algum radical OH ou NH.

Isso explica a maior taxa de desgaste sofrida, uma vez que partículas maiores são removidas mais facilmente do que partículas menores. O desprendimento de partículas maiores é explicado pela estrutura molecular linear dos polietilenos, sem a presença de radicais entre os peptídeos que formam a sua estrutura.

Nas Figuras 4.29 a 4.31, podem ser vistas imagens em MEV do P.A 6.0, P.A 6.6 e POM com 2000x de aumento, evidenciando a diferença de tamanho.

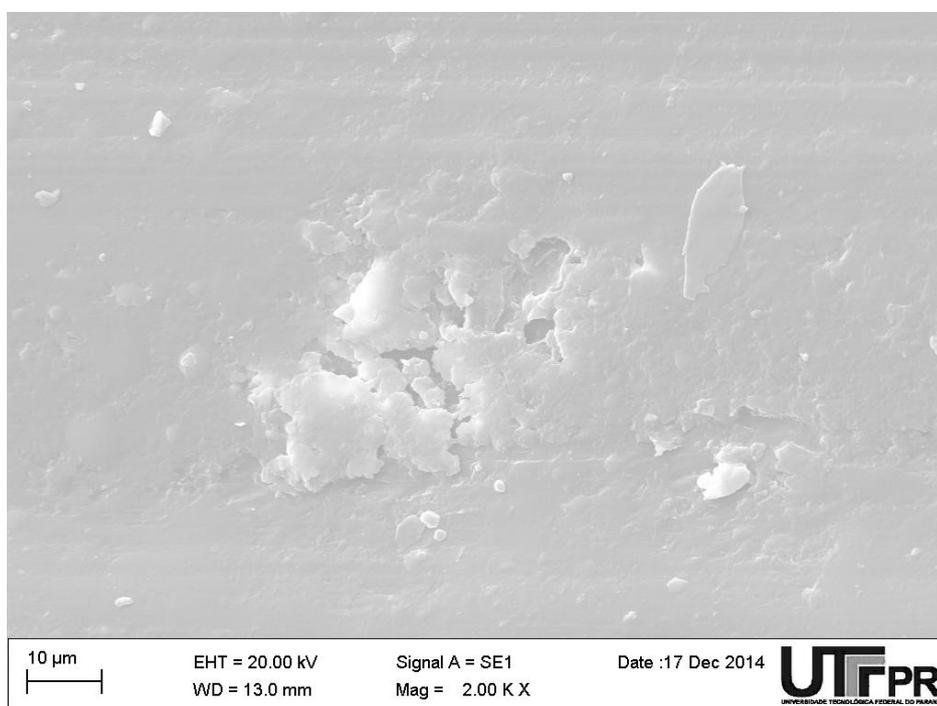


Figura 4.29 - Imagem em MEV do P.A 6.0 com 2000x de aumento

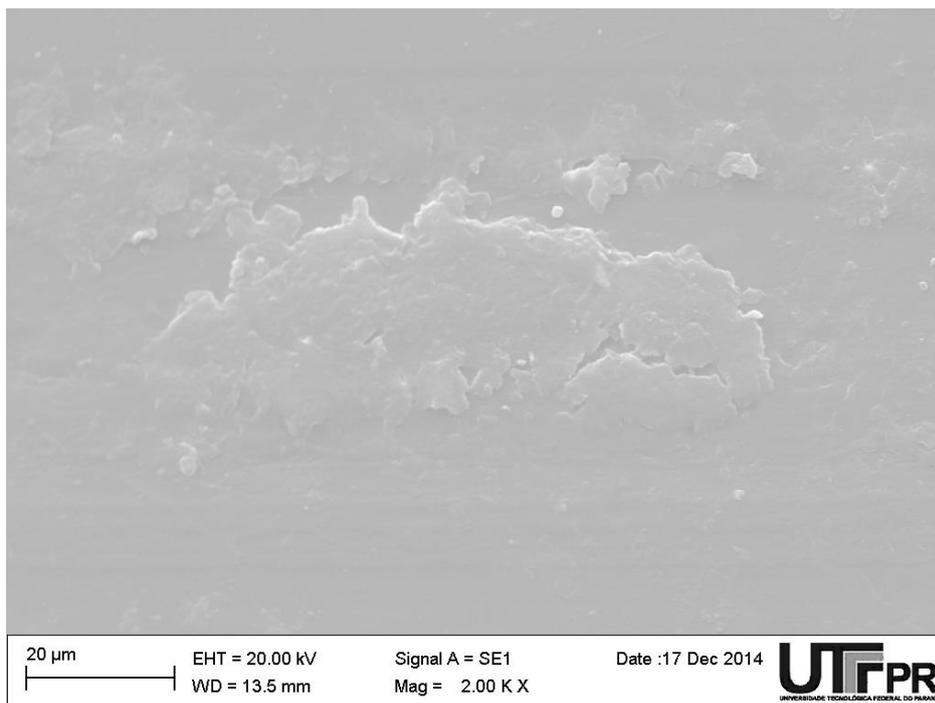


Figura 4.30 - Imagem em MEV do P.A 6.6 com 2000x de aumento

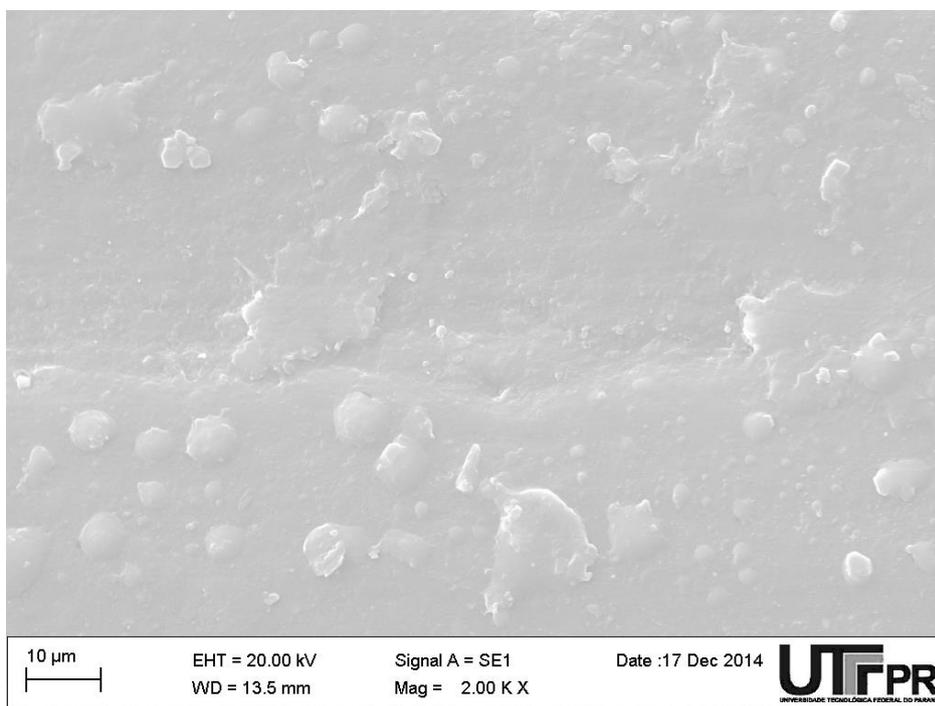


Figura 4.31 - Imagem em MEV do POM com 2000x de aumento

5 CONCLUSÕES

Desse trabalho de conclusão de curso, no qual foi estudado o comportamento tribológico de polímeros de engenharia (Poliâmidas 6.0 e 6.6, Poliacetal, Polietileno de ultra alto peso molecular e Polietileno de alta densidade) em deslizamento sem lubrificação contra o aço inoxidável, em ensaios tipo mancal sobre eixo com condição PV constante, concluiu-se que:

- ✓ Para a condição PV = 0,49 os polímeros sofreram um desgaste severo, impossibilitando as verificações propostas no objetivo do presente trabalho;
- ✓ Para a condição PV = 0,22, o coeficiente de atrito cinético estabilizou, após aproximadamente 60 minutos de ensaio para os 5 polímeros. O PEUAPM teve o menor coeficiente de atrito (0,16) e a POM teve o maior coeficiente de atrito (0,23).
- ✓ A temperatura no contato estabilizou após aproximadamente 40 minutos de ensaio e apresentou valores semelhantes para a PA 6.6, POM e PEAD, ficando na faixa de 41 ± 1 °C. Para o PA 6.0 obteve-se o menor valor dentre os polímeros e para o PEUAPM o maior valor.
- ✓ Os valores do coeficiente dimensional de Archard foram calculados e obteve-se valores na ordem de 10^{-14} [m²/(n.m)], cerca de 10 vezes maior do que presente na literatura. Associou-se esse erro à baixa taxa de desgaste mássico, à curta duração do ensaio e à precisão da balança.
- ✓ As topografias dos contra-corpos de aço inoxidável apresentaram-se de modo típico, com ondulações provenientes do processo de usinagem, e não tiveram alterações com os ensaios de desgaste.
- ✓ As topografias dos polímeros mostraram em geral um alisamento da superfície ensaiada em comparação com as não ensaiadas. Esse pode ser comprovado quantitativamente com os dados dos parâmetros de rugosidade obtidos a partir desse mesmo teste com IDLB.
- ✓ O mecanismo de desgaste que prevaleceu foi o desgaste adesivo. Para os polietilenos constatou-se um leve indício de levantamento de superfícies desgastadas.

- ✓ Percebeu-se uma diferença em relação ao tamanho das partículas de desgaste dos polímeros, sendo as dos polietilenos as maiores se comparadas aos demais polímeros.
- ✓ Para aplicações tribológicas, os materiais em geral se demonstraram apropriados para a condição PV da proposta 2 ($PV = 0,22$). A taxa de desgaste mássico se manteve pequena. Já a temperatura de trabalho se manteve entre a temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão.
- ✓ Comparando o preço dos polímeros comprados em barras de $\varnothing 30$ mm, O PEAD (R\$ 21,00/metro) teve um melhor custo benefício quando comparado com o PEUAPM (R\$ 62,00/metro). Entre a P.A 6.0 (R\$ 42,00/metro), P.A 6.6 (R\$ 55/metro) e o POM (R\$ 41,00/metro), Poliamida 6.0 se mostrou mais atrativa por apresentar um coeficiente de atrito menor entre eles combinado com uma taxa de desgaste semelhante e custo mais baixo.

6 REFERÊNCIAS

ARCHARD, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal Of Applied Physics*. v. 24, p. 981-988, 1953.

BAHADUR, S. TABOR, D. Role of fillers in the friction and wear behavior of high-density polyethylene. In: Lee LH, editor. *Polymer wear and its control*. ACS Symposium Series. Washington (DC): ACS; 1985.

BELI, V. A.; SVIRIDYONOK, A. I.; SMURUGOV, V. A.; NEVZOROV, V. V. Adhesive Wear of Polymers. Institute of the Mechanics of Metal-Polymer System. Outubro, p. 396-400, 1977.

BRISCOE BJ. Wear of polymers: an assay on fundamental aspects. *Tribol Int* 1981;

BHUSHAN, B. *Introduction to Tribology*. New York: John Wiley & Sons, 2002.

BLANCHET, T. PENG, AYL. NABLO, SV. Tribology of selectively irradiated PTFE surfaces. *Tribol Lett* 1998;

BLAU, Peter J. *Friction Science and Technology*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2009.

BRANKOVIC, M. Wear Mechanism. In: LABORATOIRE de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, 1998. Disponível em: <<http://servers.eclyon.fr/tribologie/HTML/english/mechanism.html>>. Acessado em: 19/07/2014.

CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CANGUNDO, E.M, *Avaliação Experimental da Condição Tribologica no Processo de Corte por Arranque de Aparas*. Lisboa, Portugal, 2009.

CHEN, Z.; LI, T; LIU, X ; LU, R ; Friction and Wear Mechanisms of Polyamide 66/High Density Polyethylene Blends. Department of Macromolecular Science, Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers MEC, Fudan University, Shanghai, 200433, China, 2004.

COUTINHO, F.M.B.; MELLO, I.L.; MARIA, L.C.S. *Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 13, no 1, p. 1-13, 2003

EZTM . A Sociedade de Capital Aberto Usina da Construção de Máquinas Pesadas da Cidade de Elektrostal; Mancal de Rolamento hidrostático. Disponível em <http://www.eztm.ru/images/924.jpg> acessado em 18 de julho de 2014

FACTORI, I.M.; Processamento e Propriedades de Compósitos de Poliamida 6.6 Reforçada com Partículas de Vdro Reciclado. São Paulo, 2009. Tese de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

FARIAS, A.; DELIJAICOV, S.; MELLO, J. D. B.; FILHO, M. S.; BATALHA, G. F.; Análise Funcional da Integridade Superficial no Processo de Torneamento Duro do Aço ABNT 8620 Cementado Através da Sua Medição Topográfica Superficial Belo Horizonte, 2009. V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOU, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H.; Roughness parameters. 2002. Journal of Material Processign Technology.
HUTCHINGS, Ian M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

HU, X. Tribological behavior of modified polyacetal against MC nylon without lubrication, Tribology Letters, 1998.

JUNIOR, R. F. M.; Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna. Curitiba, 2009. Dissertação de mestrado – Universidade Tecnológica federal do Paraná

KAR, M. K.; BAHADUR, S. Micromechanism of Wear at Polymer-Metal Sliding Interface. Wear. v. 46, p. 189-202, 1978.

KHODDAMZADEH, A.; LIU, R.; WU, X. Novel Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites with Newly Developed Tribaloy Alloy Additive for Sliding Bearing. Wear. v. 266, p. 646-657, 2009.

LANCESTER, JK. Polymer-based bearing materials: the rule of fillers and fiber reinforcement. Tribol Int 1972.

LUDEMA, K. C.; TABOR, D. The Friction and Visco-Elastic Properties of Polymeric Solids. Wear. v. 9, p. 329-348, 1966.

NITACETAL, 2014, Folder técnico Nitaplast (POM), Brasil

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. Rio de Janeiro: Bookman, 2004.

OLIVEIRA, C. J.; Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens. Belo Horizonte, 2004. Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

QUAGLINI, V.; DUBINI, P.; FERRONI, D.; POGGI, C. Influence of Counterface Roughness on Friction Properties of Engineering Plastics for Bearing Applications. *Materials and Design*. v.30, p. 1650-1658, 2009.

SHIGLEY, J. E; MISCHKE, C.R; BUDYNAS, R. G.;. Projeto de Engenharia Mecânica:. 7.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SILVA, C. H.; Degradação de UHMWPE e de POM Devido à Ação Tribológica Contra Aço Inoxidável e Alumina. 2003. 294f. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SILVA, C. H.; TANAKA, D. K.; SINATORA, A. The effect of load and relative humidity on friction coefficient between high density polyethylene on galvanized steel- preliminary results. *Wear*. v. 225, p. 339-342, 1999.

STACHOVIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. *Engineering Tribology*. 3. ed. EUA: Butterworth Heinemann, 2001.

TICONA, Catalogo, Acetal Copolymer (POM), Hostaform, Polymer materials, Ticona, Alemanha, 1997.

ÜNLÜ, B.S.; ATIK, E.; KÖKSAL, S.; Tribological properties of polymer-based journal bearings *Materials and Design* 30, 2009.

UNAL H.; SEN U, MIMAROG'LU; A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International* 37, 2004.

VALE, J. L.; Estudo do Comportamento Tribológico do Politetrafluoreno em Deslizamento Sem Lubrificação Contra Aço Inoxidável . Curitiba, 2014. Dissertação de mestrado – Universidade Tecnológica federal do Paraná.

YAMAGUCHI, YUKISABURO. *Tribology of Plastic Materials: Their Characteristics and Applications to Sliding Components*. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.

WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of Surface and Nanometrology*. London: Institute of Physics Publishing, 2003.

ZUM-GAHR, K. H. *Microstructure and Wear of Materials - Tribology Series, no.10* - Elsevier Science Publishers, 1987

ANEXO A – CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA: AÇO INOXIDÁVEL

**CERTIFICADO DE QUALIDADE**

CERTIFICADO Nº 2181 CLIENTE: MATHEUS

DATA: 26/06/14

IT EM	CORRIDA	QUANT.	DIMENSÕES	MATERIAL / LIGA	ACABAMENTO
01	HS7434		PÇ	BR RED 304 L 1"	DECAPADO

ANÁLISE QUÍMICA

ITEM	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
01	0.030	1.480	0.440	0.043	0.020	18.190	8.000

OBSERVAÇÕES

ITEM	
01	L.R.Mpa :666.000 , L.E. Mpa : 370.000 , Along: 49.000 .

** CERTIFICAMOS QUE OS DADOS ACIMA ESTÃO CORRETOS E QUE O(S)
CERTIFICADO(S) ORIGINAL (IS) ENCONTRA(M)-SE EM NOSSOS ARQUIVOS.

ANEXO B – CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA: POM



PAG COMERCIO E REPRESENTAÇÕES DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA

Rua Francisco Nunes, 523 – Rebouças - CEP: 80.215-000 – Curitiba/PR

CNPJ: 75.117.101/0001-46

I.E.: 101.34.470-35

Fone: (41) 3026-1634

Fax: (41) 3332-6075

Site: www.peage.com.br

E-mail: paq.vendas@peage.com.br

Curitiba, 29 de Maio de 2014

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 1.360/14 – H

A

Matheus Terplak Bee - CPF: 084.141.329-01

Curitiba - Pr

A/c: Sr(a). Matheus

Depto: Compras

Fone: 41 0000-0000

E-mail: engmatheusbee@gmail.com

Certificamos para os devidos fins que o material fornecido para a empresa acima, através da **NOTA FISCAL ELETRONICA Nº 033.933** de **29/05/2014** e abaixo discriminados, atendem as normas de propriedades para:

Cod.	Class. Fiscal	Descrição
133126	3916.9090	BARRA POM 30 x 150 MM

AS PROPRIEDADES ABAIXO REPRESENTAM VALORES DE CATÁLOGO

PROPRIEDADES	NORMA DIN/ASTM	UNIDADE	NITACETAL (POM)
FÍSICAS			
DENSIDADE	DIN 53479	g/cm ³	1,42
CALOR ESPECÍFICO	ASTM D3417	cal/°C*g	0,35
ABSORÇÃO DE ÁGUA	DIN 53715	%	0,3
MECÂNICA			
ALONGAMENTO NA RUPTURA	DIN 53457	%	40
MÓDULO DE ELASTICIDADE TRAÇÃO	DIN 53455	MPa	3100
MÓDULO DE ELASTICIDADE FLEXÃO	DIN 53455	MPa	2100
RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD	ASTM D256	J/m	30
DUREZA ROCKWELL	ASTM D785	--	R120
COEF. DE ATRITO DE DESLIZE p=0,05N/mm ² v=0,6m/s contra aço temp e retif.		--	0,32
TÉRMICAS			
PONTO DE FUSÃO	--	°C	165
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	DIN 52612	W/m.K	0,31
EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR	DIN 52328	10 ⁻⁵ / K	2~3
TEMPERATURA DE USO CONTÍNUO	--	°C	-30 à 100
RELAÇÃO DE INFLAMABILIDADE	UL 94	--	HB
ELÉTRICA			
RIGIDEZ DIELÉTRICA	DIN 53481	KV/mm	>50
CONSTANTE DIELÉTRICA ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	3,7
FATOR DE DISSIPAÇÃO ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	0,003
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	DIN 53482	Ohm/cm A 22,8°C 50% RH (ohm/cm)	10 ¹⁵
QUÍMICAS			
RESIST. A ACIDOS FRACOS	ASTM D543	--	Resiste a alguns
RESIST. A ACIDOS FORTES	ASTM D543	--	Atacado em altas concentrações
RESIST. A BASES FRACAS	ASTM D543	--	Boa
RESIST. A BASES FORTES	ASTM D543	--	Boa
RESIST. A SOLVENTES ORGANICOS	ASTM D543	--	Resiste à vários solventes a temperatura menor que 80°C

ATENÇÃO: Estes materiais não podem ser utilizados em aplicações médicas que envolvem implantes permanentes no corpo humano.

ANEXO C – CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA: PA 6.6



PAG COMERCIO E REPRESENTAÇÕES DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA

Rua Francisco Nunes, 523 – Rebouças - CEP: 80.215-000 – Curitiba/PR

CNPJ: 75.117.101/0001-46

I.E.: 101.34.470-35

Fone: (41) 3026-1634

Fax: (41) 3332-6075

Site: www.peage.com.br

E-mail: pag.vendas@peage.com.br

Curitiba, 29 de Maio de 2014

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 1.360/14 – H

Cod.	Class. Fiscal	Descrição
133123	3916.9090	BARRA PA6.6 30 X 150 MM

AS PROPRIEDADES ABAIXO REPRESENTAM VALORES DE CATÁLOGO

PROPRIEDADES	NORMA DIN/ASTM	UNIDADE	NITATEC (PA 6.6)
FÍSICAS			
DENSIDADE	DIN 53479	g/cm ³	1,14
ABSORÇÃO DE ÁGUA	DIN 53715	%	2,8
MECÂNICA			
RESIST. TRAÇÃO	DIN 53455	MPa	70
ALONGAMENTO NA RUPTURA	DIN 53457	%	60
MÓDULO DE ELASTICIDADE TRAÇÃO	DIN 53455	MPa	2000
MÓDULO DE ELASTICIDADE FLEXÃO	DIN 53455	MPa	2800
RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD	ASTM D256	J/m	28
DUREZA ROCKWELL	ASTM D785	--	R105
COEF. DE ATRITO DE DESLIZE P=0,05N/mm ² v=0,6m/s contra aço temp e retif.		--	0,35-0,42
TÉRMICAS			
PONTO DE FUSÃO	--	°C	245
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	DIN 52612	W/m.K	0,23
EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR	DIN 52328	10 ⁻⁵ / K	7
TEMPERATURA DE USO CONTÍNUO	--	°C	-40 à 110
RELAÇÃO DE INFLAMABILIDADE	UL 94	--	V2
ELETRICA			
RIGIDEZ DIELETRICA	DIN 53481	kV/mm	30
CONSTANTE DIELETRICA ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	3,9
FATOR DE DISSIPACÃO ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	0,02
QUÍMICAS			
RESIST. A ACIDOS FRACOS	ASTM D543	--	BOA
RESIST. A ACIDOS FORTES	ASTM D543	--	ATACADO
RESIST. A BASES FRACAS	ASTM D543	--	BOA
RESIST. A BASES FORTES	ASTM D543	--	BOA

ATENÇÃO: Estes materiais não podem ser utilizados em aplicações medicas que envolvem implantes permanentes no corpo humano.

ANEXO D – CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA: PA 6.0



PAG COMERCIO E REPRESENTAÇÕES DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA

Rua Francisco Nunes, 523 – Rebouças - CEP: 80.215-000 – Curitiba/PR

CNPJ: 75.117.101/0001-46

I.E.: 101.34.470-35

Fone: (41) 3026-1634

Fax: (41) 3332-6075

Site: www.peage.com.br

E-mail: pag.vendas@peage.com.br

Curitiba, 29 de Maio de 2014

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 1.360/14 – H

Cod. 133125 **Class. Fiscal** 3916.9090 **Descrição** BARRA PA6 30 X 150 MM

PROPRIEDADES	NORMA DIN/ASTM	UNIDADE	NITANYL (PA 6.0)
FÍSICAS			
DENSIDADE	DIN 53479	g/cm ³	1,13
CALOR ESPECÍFICO	ASTM D3417	cal/°C*g	0,4
ABSORÇÃO DE ÁGUA	DIN 53715	%	3
MECÂNICA			
RESIST. TRACÇÃO	DIN 53455	MPa	60
ALONGAMENTO NA RUPTURA	DIN 53457	%	70 a 200
MÓDULO DE ELASTICIDADE TRACÇÃO	DIN 53455	MPa	1800
MÓDULO DE ELASTICIDADE FLEXÃO	DIN 53455	MPa	2800
RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD	ASTM D256	J/m	50
DUREZA ROCKWELL	ASTM D785	--	R100
COEF. DE ATRITO DE DESLIZE p=0,05N/mm ² v=0,6m/s contra aço temp e retif.		--	0,38-0,45
TÉRMICAS			
PONTO DE FUSÃO	--	°C	220
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	DIN 52612	W/m.K	0,23
EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR	DIN 52328	10 ⁻⁵ / K	7
TEMPERATURA DE USO CONTÍNUO	--	°C	-40 à 100
RELAÇÃO DE INFLAMABILIDADE	UL 94	--	HB
ELÉTRICA			
RIGIDEZ DIELÉTRICA	DIN 53481	KV/mm	20-50
CONSTANTE DIELÉTRICA ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	3,7
FATOR DE DISSIPACÃO ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	0,02
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	DIN 53482	Ohm/cm A 22,8°C 50% RH (ohm/cm)	10 ¹¹
QUÍMICAS			
RESIST. A ACIDOS FRACOS	ASTM D543	--	BOA
RESIST. A ACIDOS FORTES	ASTM D543	--	ATACADO
RESIST. A BASES FRACAS	ASTM D543	--	BOA
RESIST. A BASES FORTES	ASTM D543	--	BOA
RESIST. A SOLVENTES ORGANICOS	ASTM D543	--	ATACADO POR FENÓIS E FORMOL

ATENÇÃO: Estes materiais não podem ser utilizados em aplicações médicas que envolvem implantes permanentes no corpo humano.

ANEXO E – CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA: PEAD



PAG COMERCIO E REPRESENTAÇÕES DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA

Rua Francisco Nunes, 523 – Rebouças - CEP: 80.215-000 – Curitiba/PR

CNPJ: 75.117.101/0001-46

I.E.: 101.34.470-35

Fone: (41) 3026-1634

Fax: (41) 3332-6075

Site: www.peage.com.br

E-mail: pag.vendas@peage.com.br

Curitiba, 29 de Maio de 2014

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 1.360/14 – H

Cod.	Class. Fiscal	Descrição
133123	3916.90.90	BARRA PEAD 30 X 150 MM

AS PROPRIEDADES ABAIXO REPRESENTAM VALORES DE CATÁLOGO

PROPRIEDADES	NORMA DIN/ASTM	UNIDADE	NITALEN (PEAD)
FÍSICAS			
DENSIDADE	DIN 53479	g/cm ³	0,95
CALOR ESPECÍFICO	ASTM D3417	cal/°C*g	0,55
ABSORÇÃO DE ÁGUA	DIN 53715	%	<0,01
MECÂNICA			
RESIST. TRAÇÃO	DIN 53455	MPa	24-31
ALONGAMENTO NA RUPTURA	DIN 53457	%	400-800
MÓDULO DE ELASTICIDADE TRAÇÃO	DIN 53455	MPa	1000-1400
MÓDULO DE ELASTICIDADE FLEXÃO	DIN 53455	MPa	1000-1400
RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD	ASTM D256	J/m	110
DUREZA ROCKWELL	ASTM D785	--	R65
COEF. DE ATRITO DE DESLIZE $\rho=0,05\text{N/mm}^2$ $v=0,6\text{m/s}$ contra aço temp e retif.		--	0,29
TÉRMICAS			
PONTO DE FUSÃO	--	°C	130
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	DIN 52612	W/m.K	0,35-0,43
EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR	DIN 52328	10 ⁻³ / K	-17
TEMPERATURA DE USO CONTÍNUO	--	°C	-30 à 80
RELAÇÃO DE INFLAMABILIDADE	UL 94	--	HB
ELÉTRICA			
RIGIDEZ DIELÉTRICA	DIN 53481	KV/mm	>50
CONSTANTE DIELÉTRICA ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	2,3
FATOR DE DISSIPACÃO ATÉ 1KHz	DIN 53483	--	0,0002
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	DIN 53482	(ohm/cm) a 22,8°C 50% RH	10 ¹⁵
QUÍMICAS			
RESIST. A ACIDOS FRACOS	ASTM D543	--	Excelente
RESIST. A ACIDOS FORTES	ASTM D543	--	Atacado em altas concentrações
RESIST. A BASES FRACAS	ASTM D543	--	Excelente
RESIST. A BASES FORTES	ASTM D543	--	Excelente
RESIST. A SOLVENTES ORGANICOS	ASTM D543	--	Resiste à vários solventes a temper. menor que 80°C

ATENÇÃO: Estes materiais não podem ser utilizados em aplicações medicas que envolvem implantes permanentes no corpo humano.

ANEXO F – CERTIFICADO DE MATERIA PRIMA: PEUAPM



PAG COMERCIO E REPRESENTAÇÕES DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA

Rua Francisco Nunes, 523 – Rebouças - CEP: 80.215-000 – Curitiba/PR

CNPJ: 75.117.101/0001-46

I.E.: 101.34.470-35

Fone: (41) 3026-1634

Fax: (41) 3332-6075

Site: www.peage.com.br

E-mail: pag.vendas@peage.com.br

Curitiba, 29 de Maio de 2014

CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 1.360/14 – H

Cod.	Class. Fiscal	Descrição
133122	3916.1000	BARRA UHMW 30 X 150 MM

AS PROPRIEDADES ABAIXO REPRESENTAM VALORES DE CATÁLOGO

PROPRIEDADES	NORMA DIN/ASTM	UNIDADE	NITADUR (UHMW)
FÍSICAS			
DENSIDADE	D 53479	g/cm ³	0,93
CALOR ESPECÍFICO	D 53417	CAL/°C*G	0,48
ABSORÇÃO DE ÁGUA	D 53715	%	0
MECÂNICA			
RESISTENCIA TRACÇÃO	D 53455	Mpa	30
ALONGAMENTO NA RUPTURA	D 53457	%	350
MÓDULO DE ELASTICIDADE EM TRACÇÃO	D 53455	Mpa	800
MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FLEXÃO	D 256/D 785	Mpa	1000
RESISTÊNCIA AO IMPACTO izod		J/m	Não quebra
DUREZA ROCKWELL			R 70
COEFICIENTE DE ATRITO DE DESLIZE P=0,05N/mm ² V=0,6m/s CONTRA AÇO TEMP. E RETIF.			0,15
TÉRMICAS			
PONTO DE FUSÃO		°C	133
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	D 52612	W/m.K	0,4
EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR	D 52328	10 ⁵ / K	15
TEMPERATURA DE USO CONTÍNUO		°C	- 40 à 80
RELAÇÃO DE INFLAMABILIDADE	UL 94	--	HB
ELÉTRICA			
RIGIDEZ DIELÉTRICA	D 53481	KV/mm	90
CONSTANTE DIELÉTRICA ATÉ 1KHz	D 53483	--	2,30
FATOR DE DISSIPAÇÃO ATÉ 1KHz	D 53483	--	0,32
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	D 53482	Ohm/cm	10 ¹⁸
QUÍMICAS			
RESIST. A ACIDOS FRACOS	D 543	--	Excelente
RESIST. A ACIDOS FORTES	D 543	--	Atacado em alta concentração
RESIST. A BASES FRACAS	D 543	--	Excelente
RESIST. A BASES FORTES	D 543	--	Excelente
RESIST. A SOLVENTES ORGANICOS	D 543	--	Resiste a vários solventes a temperatura e concentração

ATENÇÃO: Estes materiais não podem ser utilizados em aplicações medicas que envolvem implantes permanentes no corpo humano.

Atenciosamente

ENGº AFONSO GRÖTZNER NETO