

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**ARTHUR CURTI SANTANA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO POLI-ÉTER-  
ÉTER-CETONA (PEEK) EM ENSAIO TIPO MANCAL SOBRE EIXO  
SEM LUBRIFICAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

**LONDRINA**

**2019**

**ARTHUR CURTI SANTANA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO POLI-ÉTER-  
ÉTER-CETONA (PEEK) EM ENSAIO TIPO MANCAL SOBRE EIXO  
SEM LUBRIFICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz do Vale

**LONDRINA**

**2019**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria  
Nome da Coordenação  
Nome do Curso



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO POLI-ÉTER-ÉTER-  
CETONA (PEEK) EM ENSAIO TIPO MANCAL SOBRE EIXO SEM LUBRIFICAÇÃO**  
por

**ARTHUR CURTI SANTANA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 12 de julho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

João Luiz do Vale  
Prof.(a) Orientador(a)

---

Amadeu Lombardi Neto  
Membro titular

---

Jéderson da Silva  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## AGRADECIMENTOS

Estas palavras dedico a todos que tiveram parte, de diferentes maneiras, na realização deste trabalho. Peço desculpas antecipadamente àqueles que não são mencionados neste texto pois foram muitos os colaboradores, mas tenham certeza que estão em meu pensamento e têm minha gratidão.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. João Luiz do Vale, que me guiou com sabedoria nos caminhos não só da tribologia, mas também na vida.

Agradeço à aluna de engenharia mecânica do Campus Curitiba, Heloísa Colli Moreira, pelo grande esforço empregado na caracterização dos corpos de prova.

Ao Eng. Fernando Ribeiro de França, diretor executivo da empresa Susip, e ao torneiro Cesar Milleo de Castro Filho que prontamente se dispuseram para realização da usinagem dos corpos de prova.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva, responsável do LASC (laboratório de Superfícies e Contato) da UTFPR Campus Curitiba, por disponibilizar a Máquina de Atrito Cinético, essencial para realização deste estudo.

Ao Prof. Dr. Janksyn Bertozzi, chefe do departamento de Química, da UTFPR Campus Londrina, que dispôs do laboratório e materiais para preparação e análise dos corpos de prova.

Ao técnico Carlos Henrique Gianjacomio pelo auxílio na utilização dos equipamentos do laboratório de química.

Ao técnico Fillipe de Carvalho Bernardino pelo auxílio na realização das análises FTIR e DSC, realizadas nos laboratórios da Engenharia de Materiais da UTFPR Campus Londrina.

Ao Prof. Dr. André Luis da Silva, pelas considerações no período de realização dos ensaios.

Aos membros do departamento de manutenção da UTFPR Campus Londrina que auxiliaram com ferramentas e materiais para a montagem da bancada de ensaio e ao Alexandre que doou a tampa de MDF da bancada.

Ao Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto pela orientação e auxílio com o regulamento, normas e procedimentos para realização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram em toda a minha formação nas diversas áreas.

Por fim, agradeço a meu pai, minha mãe e minha irmã, por serem fonte de amor, incentivo e inspiração na minha vida.

## RESUMO

SANTANA, Arthur Curti. **Estudo do comportamento tribológico do poli-éter-éter-cetona (PEEK) em ensaio tipo mancal sobre eixo sem lubrificação.** 2019. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

O PEEK é um polímero de engenharia relativamente novo e que possui poucos estudos endereçados na literatura. Entre suas características notórias estão a capacidade e operação em temperaturas elevadas para polímeros e o baixo desgaste em deslizamento sem lubrificação. Nesse trabalho, é realizado um ensaio consistindo no deslizamento de um modelo mancal polimérico de PEEK sobre eixo de aço inoxidável, realizado com variações na carga normal e na velocidade de deslizamento, mas mantendo condição PV (produto entre pressão e velocidade) constante e igual a 2. Os ensaios tiveram duração de 120 min, e foi verificado para o coeficiente de atrito, a existência dos períodos de amaciamento, transição e estabilização. O amaciamento ocorre, aproximadamente, durante os primeiros 15 min de ensaio, seguido pela transição que ocorre até 110 min. Os valores de coeficiente de atrito durante o período de estabilização foram estatisticamente iguais, com valor de 0,4, para todas as condições. O contra corpo de aço inoxidável não apresentou alterações topográficas significativas, enquanto que o corpo de PEEK sofreu grandes alterações na topografia. Mesmo assim, utilizando uma balança com precisão de 0,0001 g, não foi observado alteração mássica no corpo de prova após ensaio, indicando que apesar de ter sofrido desgaste, o material não foi completamente removido. Uma metodologia foi proposta para quantificação da perda mássica através de análises por IDLB (interferometria de luz branca). Os mecanismos de desgaste foram avaliados e verificou-se que o principal foi o desgaste adesivo, evidenciado pelas deformações plásticas, partículas de desgaste poliméricas amassados no corpo de prova e filme polimérico nas áreas de transição da pista de desgaste. Verificou-se mudanças de características físico-químicas, evidenciando que não houve alteração nas ligações atômicas do polímero, mas que houve aumento do grau de cristalização devido à reorientação das cadeias poliméricas mais superficiais.

**Palavras-chave:** Atrito. Desgaste. PEEK. Deslizamento sem lubrificação. Mancal.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Representação da unidade repetida que compõe o PEEK. ....	17
Figura 2.2 - Representação esquemática de uma matriz polimérica contendo parte cristalina e parte amorfa. ....	18
Figura 2.3 - Influência da temperatura na curva tensão-deformação do PEEK em tração. ....	19
Figura 2.4 - Volume específico contra Temperatura para material polimérico totalmente amorfo (curva A), semicristalino (curva B) e cristalino (curva C). $T_v$ é a temperatura de transição vítrea e $T_f$ , a temperatura de fusão. ....	20
Figura 2.5 - Área de contato real entre superfícies em contato. ....	21
Figura 2.6 - À direita, componente de atrito adesivo. À esquerda, componente de atrito de deformação. ....	22
Figura 2.7 - Duas regiões principais atuantes no atrito entre um corpo duro contra substrato polimérico em deslizamento relativo. ....	23
Figura 2.8 - Diagrama esquemático mostrando a relação entre o coeficiente de atrito em função da carga e da rugosidade das superfícies para cilindros em cruz de PMMA deslizando sem lubrificação. ....	23
Figura 2.9 - Mecanismo de formação, e transferência, de filme transferido do PTFE para o contra corpo. ....	25
Figura 2.10 - Mecanismo de transferência normal de polímeros, ou, <i>lumpy transfer</i> . ....	26
Figura 2.11 - Mecanismos de desgaste abrasivo. ....	27
Figura 2.12 - PV limite para contato poliamida-poliamida e Aço-poliamida. ....	28
Figura 2.13 - Valores de temperatura para diferentes valores de PV. ....	29
Figura 2.14 - Exemplos de curvas P-V mostrando os limites de operação para diferentes tipos de buchas de mancal com taxa de desgaste de 25 $\mu\text{m}$ por 100 h (sob carga unidirecional). A: termoplásticos, B: PTFE, C: PTFE + Enchimento, D: Bronze poroso + PTFE + Pb, E: PTFE/vidro/compósito termoendurecido, F: termoendurecido reforçado + $\text{MoS}_2$ , G: termoendurecido / carbono – grafita + PTFE. ....	30
Figura 2.15 - Distribuição de pressão em contato do tipo linha entre cilindros côncavo e convexo. ...	31
Figura 2.16 - Taxa de desgaste específico de PEEK puro para diferentes viscosidades de fusão em diferentes condições PV. ....	32
Figura 2.17 - Coeficiente de atrito de PEEK puro para diferentes viscosidades de fusão em diferentes condições PV. ....	33
Figura 2.18 – Valores de coeficiente de atrito (a) e taxa de desgaste (b) para diferentes velocidades e cargas para PEEK amorfo contra aço. ....	33
Figura 2.19 – Evolução do coeficiente de atrito sob mesma carga em diferentes velocidades para PEEK amorfo contra aço. ....	34
Figura 2.20 – Vista de topo da pista de desgaste para as condições (T1) de [9N e 0,2m/s]; (T2) de [9N e 0,8m/s]. ....	34
Figura 2.21 – Perfil central da pista de desgaste na condição [9N e 0,2m/s]. ....	35
Figura 2.22 – Morfologia da superfície desgastada, obtida por MEV, nas condições: (a) 9N e 1,1m/s; (b) 9N e 1,4m/s. ....	35
Figura 2.23 – Superfície do PEEK amorfo no centro da pista de desgaste, sob condições de (a) [1N e 0,2m/s]; (b) [1N e 1,1m/s] . ....	36
Figura 2.24 – Padrões de XRD para material superfície do PEEK antes e após ensaios à temperaturas diferentes. ....	37
Figura 2.25 – Variações do (a) coeficiente de atrito e (b) taxa de desgaste específica em diferentes temperaturas. ....	37
Figura 2.26 – Imagens por MEV da (A) superfície antes do ensaio e (B-F) após ensaios de desgaste à temperatura: (B) 25°C, (C) 100°C, (D) 150°C, (E) 200°C e (F) 250°C . ....	38

Figura 2.27 – Valores de coeficiente de atrito obtidos em função do tempo para quatro condições de força e velocidades diferentes sob $PV_{méd} = 0,46 \text{ MPa.m.s}^{-1}$ constante. ....	39
Figura 2.28 – Representação esquemática do comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio com PTFE.....	40
Figura 2.29 – Níveis de coeficiente de atrito nos últimos 20 min de ensaio para quatro condições de força normal.....	41
Figura 2.30 – Relação entre taxa de desgaste mássico e a raiz da força normal ( $FN0,5$ ) para as quatro condições de ensaio. ....	41
Figura 2.31 – Topografias do aço inoxidável e do PTFE, obtidas por IDBL por Vale (2014): (a) aço antes do ensaio; (b) aço após o ensaio; (c) PTFE antes do ensaio; (d) PTFE após o ensaio onde a seta vermelha indica direção do deslizamento. ....	42
Figura 2.32 – Espectros obtidos por FTIR do PTFE não submetido ao ensaio de desgaste e de filmes transferidos sob condição de maior carga. ....	43
Figura 2.33 – Curvas de fluxo de calor em função da temperatura para (a) material do corpo de PTFE não ensaiado; (b) superfície do PTFE ensaiada no nível 1; (c) filme multicamadas do PTFE ensaiado também no nível 1. ....	44
Figura 2.34 – Volume de material desgastado para um material PEEK em diferentes condições de deslizamento sob mesma pressão e velocidade. ....	44
Figura 2.35 – Imagens obtidas por MEV do filme de PEEK transferido para o contra corpo de aço sob pressão de 5,1 MPa e mesma velocidade. As setas indicam a direção do deslizamento. ....	45
Figura 3.1 – Dimensões do corpo de PEEK: (a) Detalhes de fabricação; (b) Vista em perspectiva. ....	47
Figura 3.2 – Dimensões do contra corpo de aço inoxidável AISI 304L: (a) Detalhes de fabricação; (b) vista em perspectiva.....	47
Figura 3.3 – Corpo de prova de PEEK seccionado para caracterizações após ensaio. ....	48
Figura 3.4 – 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. ....	48
Figura 3.5 – Vista explodida da montagem do corpo e contra corpo na MAC. ....	49
Figura 3.6 – Diagramas de corpo livre: (a) da haste de carga; (b) do corpo de prova. ....	50
Figura 3.6 – Corpos de prova de PEEK recobertos em ouro e fixados em suporte de alumínio para realização de análise por MEV.....	52
Figura 3.7 – Corpos de prova de PEEK recobertos em ouro e fixados em suporte de alumínio para realização de análise por MEV.....	53
Figura 4.1 – Coeficiente de atrito em função do tempo nas condições: (a) Condição 1: $F_n = 35 \text{ N}$ e $V = 0,77 \text{ m/s}$ ; (b) Condição 2: $F_n = 56 \text{ N}$ e $V = 0,61 \text{ m/s}$ ; (c) Condição 3: $F_n = 82 \text{ N}$ e $V = 0,50 \text{ m/s}$ ; (d) Condição 4: $F_n = 108$ e $V = 0,44 \text{ m/s}$ . ....	55
Figura 4.2 - Comportamento médio do coeficiente de atrito em função do tempo em cada condição de ensaio. ....	57
Figura 4.3 – Coeficiente de atrito médio em função do tempo dos ensaios de PEEK e PTFE.....	58
Figura 4.4 – Comparação entre coeficiente de atrito e força normal no: (a) início do ensaio (2 min); (b) final do amaciamento (14 min); (c) final do ensaio (110 min). ....	59
Figura 4.5 – Topografia típica do aço inoxidável, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste: (a) em vista superior; (b) em 3D. ....	60
Figura 4.6 – Perfil de rugosidade axial típico do aço inoxidável, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste. ....	60
Figura 4.7 – Imagens obtidas por MEV da superfície do aço inoxidável: (a) antes do ensaio; (b) magnificação de 200x; (c) magnificação de 1000x. ....	61
Figura 4.8 – Topografia típica do aço inoxidável, obtidas por IDLB, após ensaio de desgaste na condição 4: (a) em vista superior; (b) em 3D. ....	62
Figura 4.9 – Perfil de rugosidade axial típico do aço inoxidável, obtido por IDLB, após ensaio de desgaste na condição 4. ....	62
Figura 4.10 – Imagem obtida por MEV: (a) PEEK (mais escuro) aderido ao contra corpo (mais claro) ensaiado na condição 4; (b) idem. ....	63

Figura 4.11 – Distribuição da altura dos picos na superfície do aço inoxidável (a) antes e (b) após ensaio na condição 3. ....	63
Figura 4.12 – Distribuição da altura dos picos na superfície do aço inoxidável (a) antes e (b) após ensaio na condição 4. ....	64
Figura 4.13 – Topografia típica do PEEK antes do ensaio, obtida por IDLB, em: (a) vista superior; (b) 3D. ....	65
Figura 4.14 – Perfil de rugosidade axial típico do PEEK, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste. ....	66
Figura 4.15 – Imagens obtidas por MEV da superfície do típica do PEEK: (a) antes do ensaio; (b) idem. ....	67
Figura 4.16 – Superfície do PEEK em vista superior, obtida por IDLB, após do ensaio: (a) na condição 1; (b) na condição 2; (c) na condição 3; (d) na condição 4. ....	68
Figura 4.17 – Perfil de rugosidade axial do PEEK, obtido por IDLB, após ensaio de desgaste na: (a) condição 1; (b) condição 2; (c) condição 3; (d) condição 4. ....	69
Figura 4.18 – Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK após ensaio de desgaste na condição 4: (a) na pista de desgaste; (b) idem; (c) maior magnificação na partícula aderida. ....	70
Figura 4.19 – Área da pista de desgaste analisada por EDX. ....	71
Figura 4.20 – Distribuição da altura dos picos na superfície do PEEK (a) antes e (b) após ensaio na condição 4. ....	72
Figura 4.21 – Parâmetros de rugosidade do PEEK antes e após ensaio nas 4 condições. ....	73
Figura 4.22 – Representação esquemática da alteração de uma aspereza ocasionada pelo ensaio. ....	74
Figura 4.23 – Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK na pista de desgaste após ensaios: (a) na condição 1; (b) na condição 2; (c) na condição 3; (d) na condição 4. ....	75
Figura 4.24 – Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK nas áreas de transição após ensaios: (a) início da pista de desgaste na condição 1; (b) final da pista de desgaste na condição 1; (c) início da pista de desgaste na condição 3; (d) final da pista de desgaste na condição 3. ....	76
Figura 4.25 – Imagens obtidas por MEV da pista de desgaste do corpo de prova de PEEK: (a) em ensaio interrompido na condição 4; (b) idem. ....	77
Figura 4.26 – Distribuição da altura dos picos na superfície do PEEK (a) antes e (b) após ensaio interrompido na condição 4. ....	78
Figura 4.27 – Imagem típica, obtida por IDLB, de área de desgaste na pista de desgaste. ....	80
Figura 4.28 – Representação esquemática da área indicada por IDLB. ....	80
Figura 4.29 – Taxa específica de desgaste, calculada a partir do modelo apresentado, para cada condição de ensaio. ....	82
Figura 4.30 – Espectro de interesse da análise Ftir do PEEK antes e após ensaio na condição 4. ....	83
Figura 4.31 – Curvas de fluxo de calor em função da temperatura em uma análise DSC para as superfícies de PEEK antes e após ensaio na condição 4. ....	84



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
DSC	Calorimetria explanatória diferencial ( <i>Differential Scanning Calorimetry</i> )
EDX	Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
HDPE	Polietileno de alto peso molecular
IDLB	Interferometria de luz branca
LASC	Laboratório de superfícies e contato
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MAC	Máquina de atrito cinético
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PE	Polietileno
PET	Poli tereftalato de etileno
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PMMA	Polimetil-metacrilato
POM	Poli(tereftalato de etileno)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoretileno
UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular
XRD	Difração de raio X ( <i>X-ray diffraction</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_r$	Área real de contato [m <sup>2</sup> ]
$a$	Metade da largura da região de contato do tipo cilindro-cilindro [mm]
$C_{mh}$	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]
$E^*$	Módulo de elasticidade composto [GPa]
$E_1$	Módulo de elasticidade do contra corpo [GPa]
$E_2$	Módulo de elasticidade do corpo [GPa]
$F_N$	Força normal aplicada na interface do contato do par tribológico [N]
$L$	Comprimento do contato entre 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 de aplicação das cargas [mm]
$L_w$	Distância do centro de giro até o ponto de aplicação da carga normal no corpo [mm]
$m_B$	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]
$P_{máx}$	Pressão máxima do contato entre corpo e contra corpo [MPa]
$P_{méd}$	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 <sup>-1</sup> ]
$PV_{máx}$	Condição máxima para o parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]
$PV_{méd}$	Condição média para o parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]
$R$	Raio composto [mm]
$R_1$	Raio externo do contra corpo [mm]
$R_2$	Raio interno do corpo [mm]
$t$	Tempo de duração do ensaio de desgaste [min]
$T_g$	Temperatura de fusão [°C]
$T_v$	Temperatura de transição vítrea [°C]
$V$	Velocidade de deslizamento no contato [m/s]
$x_c$	Grau de cristalinidade da estrutura polimérica [%]
$\epsilon_u$	Elongação do material até a ruptura [-]
$\mu$	Coefficiente de atrito do par tribológico [-]
$\nu_1$	Coefficiente de Poisson do contra corpo [-]
$\nu_2$	Coefficiente de Poisson do corpo [-]
$\sigma_u$	Tensão de ruptura à tração [Mpa]
$\Delta H_m$	Entalpia de fusão medido em DSC [J/g]
$\Delta H^o$	Entalpia de fusão do PEEK totalmente cristalino [J/g]

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS E DO PEEK.....	16
2.1.1 Estrutura Química.....	16
2.1.2 Cristalinidade.....	17
2.1.3 Peso Molecular.....	18
2.1.4 Comportamento Mecânico dos Polímeros.....	19
2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE TRIBOLOGIA.....	21
2.2.1 Contato entre Sólidos.....	21
2.2.2 Atrito.....	22
2.2.3 Desgaste adesivo.....	24
2.2.4 Desgaste abrasivo.....	27
2.2.5 Condição PV.....	27
2.2.6 Distribuição de pressão em contato côncavo-convexo entre dois cilindros.....	30
2.3 COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS POLÍMEROS E DO PEEK.....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 MATERIAIS.....	46
3.2 TRIBÔMETRO.....	48
3.2.1 Modelo de atrito cinético para as condições geométricas da MAC.....	49
3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO E PARÂMETROS.....	51
3.3.1 Caracterização topográfica.....	52
3.3.2 Microscopia eletrônica de varredura.....	53
3.3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	53
3.3.4 Calorimetria Explanatória Diferencial (DSC).....	54
3.3.5 Avaliação de alteração mássica.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1 COEFICIENTE DE ATRITO.....	55
4.2 AVALIAÇÃO TOPOGRÁFICA.....	59
4.2.1 Aço Inoxidável AISI 304L.....	59
4.2.2 PEEK.....	65
4.2.3 Alterações Topográficas em Ensaio Interrompido.....	77
4.3 QUANTIFICAÇÃO DA PERDA MÁSSICA.....	78
4.4 ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS.....	82
5 CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS.....	88
ANEXO A – CERTIFICAÇÃO DO FORNECIMENTO DO PEEK.....	92
ANEXO B – CERTIFICAÇÃO DO FORNECIMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L..	93

## 1 INTRODUÇÃO

Aproximadamente 70% das paradas de máquinas são atribuídas à degradação de superfície, e em 39, 40 e 54% das paradas em redutores, motores elétricos e rolamentos, respectivamente, a má lubrificação de componentes está associada (CARDOSO, 2012). Enquanto isso, mundialmente, 105.000 GWh de energia elétrica foram usados em 2009 para superar o atrito somente em maquinário de produção de papel. Isto é equivalente a 381.000 TJ de energia consumida anualmente (HOLMBERG *et al.*, 2013). Sendo assim, peças que apresentem boa resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito se tornam economicamente atrativas ao reduzir as paradas de máquinas e o consumo energético.

Nos dias de hoje, cada vez mais e mais máquinas trabalham sob condições severas de carga e temperatura (WU *et al.*, 2016). Na maioria destes sistemas é utilizado um arranjo entre metais, devido às características mecânicas destes materiais. Entretanto, em condições menos severas, o contato durante o deslizamento pode ocorrer entre metal e polímero. Este é um arranjo desejável tanto devido à incompatibilidade química dos materiais impossibilitando sua junção atômica ou molecular, minimizando o desgaste adesivo, quanto a boa condução de calor por parte do material metálico (BAHADUR, 2000), possibilitando que o sistema tribológico opere em condições PV<sup>1</sup> razoáveis.

Além destas características apresentadas anteriormente, materiais poliméricos apresentam peso relativamente menor que metais, excelente habilidade de auto lubrificação, design versátil e facilidade de produção. Desta maneira, estes materiais estão cada vez mais sendo aplicados onde atrito e desgaste são problemas cruciais, assim como em mancais de rolamento, sapatas de freio, engrenagens e componentes de vedação e etc. (BRISCOE e SINHA, 2008; LIN *et al.* 2018).

Dentre os polímeros, aqueles que apresentam melhores propriedades mecânicas, térmicas ou tribológicas e que são obtidos e formados por métodos mais elaborados, elevando seu custo, são denominados polímeros de engenharia (WIEBECK e HARADA, 2005). O poli(tereftalato de etileno) (POM), polietileno de ultra

---

<sup>1</sup> A condição PV é o produto da pressão de contato e da velocidade de deslizamento, sendo uma medida da severidade imposta ao contato (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

alto peso molecular (UHMWPE) e o politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon, são considerados polímeros de engenharia. O póli-éter-éter-cetona (PEEK) também é considerado um polímero de alto desempenho devido a sua capacidade de auto lubrificação, alta resistência à corrosão, baixo peso específico e boas características térmicas (KOIKE *et al.*, 2012). Este polímero tende a apresentar baixo desgaste, mas seu coeficiente de atrito pode ser relativamente alto - quando comparado a outros polímeros - com valores próximos de 0,3 (BRISCOE e SINHA, 2008). Além disto, apresenta elevada dureza em relação a outros polímeros e boa resistência à fadiga em altas temperaturas (ZHANG *et al.*, 2004). Todas estas características fazem do PEEK um material atrativo em sistemas como mancais de deslizamento.

Do ponto de vista de projeto de máquinas e seleção de materiais, um entendimento do desempenho tribológico de materiais poliméricos, baseados em testes com geometrias específicas, é comumente demandado (LIN *et al.* 2018). Ressalta-se, que não somente diferentes geometrias são relevantes na resposta tribológica de um tribossistema envolvendo polímeros, como também as condições de ensaio (força normal e velocidade), o que evidencia o interesse por configurações de ensaios que sejam mais próximas da aplicação real do material (LAUX e SCHWARTZ, 2013). Soma-se a esta consideração, que especificamente em relação ao PEEK, observa-se uma lacuna em pesquisas comparando diferentes configurações em diferentes condições de serviço (LIN *et al.* 2018). A grande maioria dos estudos relacionados a questões de desgaste do PEEK foram feitos com o ensaio padronizado de pino sobre disco (LAUX e SCHWARTZ, 2013).

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento tribológico do PEEK em deslizamento sem lubrificação, contra o aço inoxidável AISI 304L em ensaio do tipo mancal sobre eixo. Neste ensaio, são avaliados o coeficiente de atrito cinético, o desgaste por variação mássica, a taxa de desgaste, variações na composição química do polímero bem como no perfil topográfico e os mecanismos associados ao desgaste.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O PEEK é considerado um polímero de engenharia de alto desempenho por possuir boas características mesmo operando à altas temperaturas (ZALANIK *et al*, 2016). Sua composição permite ser utilizado em sistemas de atrito sem lubrificação, o que acaba diminuindo a necessidade de manutenção e tornando-o economicamente atrativo (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). Sistemas sem lubrificação contribuem na redução de custos de manutenção, enquanto que a chance de uma falha por falta de lubrificação obviamente diminuí. Além da questão econômica, é sabido que o uso e descarte incorreto de líquidos lubrificantes apresentam riscos para o ambiente (VIVEIROS, 2000).

Como já mencionado, em relação às pesquisas endereçadas sobre o PEEK, observa-se uma grande lacuna; principalmente no que se refere a estudos com abordagem tribológica. Desta forma, estudar este material em um ensaio que simula as condições reais de operação entre um mancal de deslizamento e um eixo mostra-se relevante.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS E DO PEEK

Esta seção aponta características gerais dos polímeros que apresentam influência na área tribológica e caracteriza o PEEK dentro destas.

#### 2.1.1 Estrutura Química

Os polímeros são longas ligações de hidrocarbonetos que são compostos, em sua maioria, por átomos de hidrogênio, oxigênio e carbono, e suas ligações intramoleculares são covalentes, podendo estas serem simples, duplas ou triplas. Estas longas moléculas dos polímeros são compostas por entidades estruturais chamadas meros, as quais se repetem sucessivamente ao longo da cadeia. O termo monômero refere-se à pequena molécula a partir da qual um polímero é sintetizado (CALLISTER, 2012). Os polímeros podem se apresentar em estruturas de cadeias lineares, ramificadas, com ligações cruzadas ou em rede e isto é determinado pelas características de sua estrutura molecular. Quando caracterizados por cadeias lineares, os polímeros podem apresentar uma quantidade maior de ligações de van der Waals e de hidrogênio entre suas cadeias. A estruturação destas, apresenta influência no coeficiente de atrito assim como o grau de simetria da estrutura molecular do polímero, que é determinado a partir da linha de carbonos principal. A unidade repetida do poli-éter-éter-cetona (PEEK) está representada na Figura 2.1.

Em termos de propriedades térmicas, o PEEK é considerado um termoplástico com propriedades análogas ao poli(etileno tereftalato) (PET) (BLUNDELL E OSBORN, 1983). Os termoplásticos amolecem quando são aquecidos, e endurecem quando são resfriados – processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Em uma escala molecular, conforme a temperatura é elevada, as forças de ligação secundárias diminuem (pelo maior movimento das moléculas), tal que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. Além disso, os termoplásticos são relativamente macios (CALLISTER, 2012).

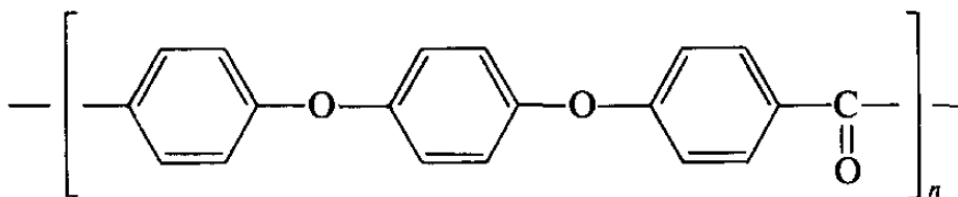


Figura 2.1 - Representação da unidade repetida que compõe o PEEK.

Fonte: Jones, Leach e Moore (1985)<sup>2</sup>

O PEEK é quimicamente classificado como um polímero aromático linear da família dos *polyaryletherketone* (STOLARSKI, 1992). Também apresenta elevado grau de simetria, e isto apresenta influência nas propriedades de desgaste e atrito do PEEK, conceitos que são detalhados nas seções 2.2.3 e 2.2.2, respectivamente.

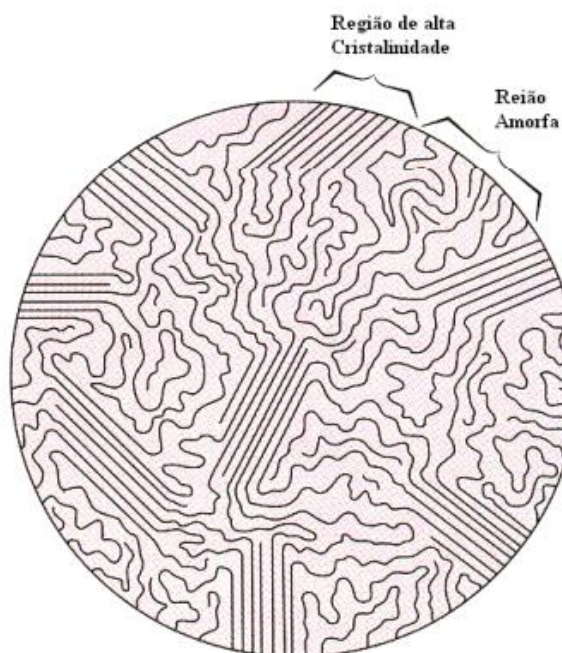
### 2.1.2 Cristalinidade

A cristalinidade é a compactação de cadeias moleculares que se organizam em um arranjo atômico ordenado. A Figura 2.2 mostra esquematicamente uma matriz polimérica contendo regiões em que as cadeias poliméricas estão ordenadas e desordenadas. Comumente, o grau de cristalinidade pode variar desde completamente amorfo até aproximadamente 95% cristalino. A massa específica de um polímero cristalino será maior que a de um polímero amorfo com a mesma massa molar, uma vez que as cadeias estarão mais densamente compactadas na estrutura cristalina. (CALLISTER, 2012). Um polímero real não é capaz de apresentar cristalinidade 100% devido a fatores como polidispersão (que mede a diferença do peso molecular entre as moléculas do polímero) e “defeitos”, como por exemplo o fim de cadeias (KURTZ, 2012).

---

<sup>2</sup> Todas as Figuras e Tabelas sem identificação explícita da fonte foram produzidas pelo autor deste trabalho.





**Figura 2.2 - Representação esquemática de uma matriz polimérica contendo parte cristalina e parte amorfa.**

**Fonte: Adaptado de Callister (2002)**

O grau de cristalinidade de um polímero não é fixo e constante, mas apresenta dependências com a estrutura química da molécula, o arranjo da cadeia molecular, e, especialmente no PEEK, seu histórico térmico durante o processamento (KURTZ, 2012). O PEEK é capaz de apresentar um grau de cristalinidade de até aproximadamente 48%, embora é mais comum encontrar valores abaixo de 30% (JONES, LEACH e MOORE, 1985). Valores menores de cristalinidade podem ser obtidos no PEEK ao realizar um resfriamento rápido (*quench*) durante sua fabricação (KURTZ, 2012).

### **2.1.3 Peso Molecular**

O peso molecular dos polímeros é um parâmetro que tem influência em diferentes propriedades como, por exemplo, o limite de resistência à tração e a temperatura de fusão, que aumentam conforme o peso molecular aumenta (NORTON, 2013).

### 2.1.4 Comportamento Mecânico dos Polímeros

As propriedades de interesse dos polímeros como módulo de elasticidade, resistência à tração e porcentagem de alongamento na falha, que variam drasticamente de polímero para polímero (BRISCOE e SINHA, 2008), assim como outras propriedades, estão definidas nesta seção.

As características mecânicas dos polímeros apresentam grande dependência com a temperatura em níveis próximos à temperatura ambiente, resultando em grande alteração das propriedades mecânicas com baixa variação de temperatura. A Figura 2.3 apresenta a curva tensão-deformação para o PEEK em diferentes valores de temperatura, indicando a grande influência deste fator à sua resposta mecânica.

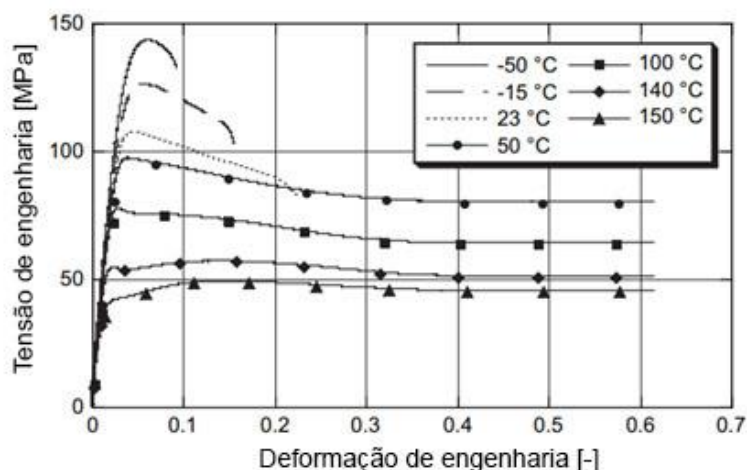
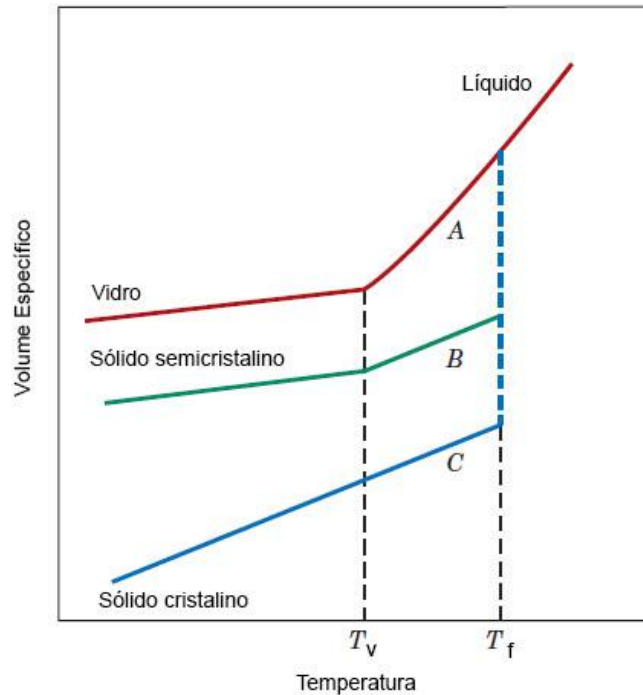


Figura 2.3 - Influência da temperatura na curva tensão-deformação do PEEK em tração.

Fonte: Adaptado de Rae, Brown e Orler (2007)

Outro comportamento característico e relevante em relação aos polímeros é a viscoelasticidade, que é a condição em que um polímero apresenta uma combinação de comportamento elástico e viscoso quando em temperaturas intermediárias. Polímeros viscoelásticos apresentam uma dependência da taxa de deformação para determinar seu comportamento. Quando a tensão é aplicada de forma gradual e contínua, o polímero se comporta como um líquido de alta viscosidade, em contrapartida, quando a tensão é aplicada de forma instantânea o comportamento apresentado é de deformação elástica. Um polímero amorfo pode se comportar como um vidro em temperaturas baixas, como um sólido com as características de uma borracha em temperaturas intermediárias e como um líquido viscoso conforme a temperatura é aumentada ainda mais (CALLISTER, 2012).

A temperatura do polímero na qual seu comportamento passa de emborrachado para um de estado rígido, quando no resfriamento, é determinada temperatura de transição vítrea (CALLISTER, 2012). Além de propriedades mecânicas como a característica de resposta a esforços, o volume específico também se altera conforme a temperatura, como demonstrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Volume específico por Temperatura para material polimérico totalmente amorfo (curva A), semicristalino (curva B) e cristalino (curva C).  $T_v$  é a temperatura de transição vítrea e  $T_f$ , a temperatura de fusão.**

**Fonte: Adaptado de Callister (2012)**

Desta maneira, a temperatura de transição vítrea se torna um parâmetro importante na caracterização do material, determinando regiões de trabalho referentes à temperatura. O PEEK possui  $T_v$  de 143°C e  $T_f$  de 340°C (KOIKE *et al.*, 2012).

Para o presente estudo, é esperado uma elevação da temperatura conforme o ensaio ocorrer. Valores de temperatura foram monitorados para o ensaio de PTFE em condições semelhantes de operação por Vale (2014). Devido à similaridade entre os materiais, como já mencionado, espera-se que valores de temperatura para este estudo do PEEK não ultrapassem 90°C.

## 2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE TRIBOLOGIA

### 2.2.1 Contato entre Sólidos

Quando estudadas em uma escala suficientemente reduzida, todas as superfícies apresentam irregularidades. Mesmo em superfícies extremamente lisas, as irregularidades se apresentarão em escala molecular ou até atômica (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Devido à existência de picos e vales na superfície de todos os materiais, a área de contato real entre dois sólidos é apenas uma porção da área de contato aparente. O contato real entre sólidos só se aproxima da área aparente quando sob carga excessivamente elevadas. A área de contato real é, portanto, distribuída em algumas micro áreas de contato e é função da carga entre os dois sólidos. Quando a carga é elevada, a área de contato real aumenta devido ao aumento do número de micro áreas de contato, e não devido a um aumento médio de área nos contatos já estabelecidos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001). Uma representação do contato entre superfícies rugosas, ressaltando micro áreas de contato, se encontra na Figura 2.5. Nomeiam-se asperezas, as imperfeições e irregularidades das superfícies que realizam contato (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

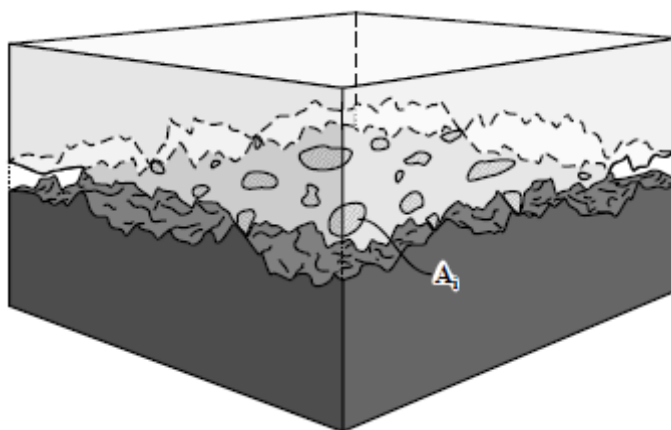


Figura 2.5 - Área de contato real entre superfícies em contato.

Fonte: Stachowiak e Batchelor (2001)

### 2.2.2 Atrito

Atrito é definido como a resistência que um corpo encontra ao se movimentar sobre outro. Esta definição abrange duas classes importantes de movimento relativo: deslizamento e rolamento (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). Atrito também é definido como a dissipação de energia entre corpos deslizando entre si (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001). Esta dissipação de energia acontece por elevação na temperatura e geração de ruídos.

Um modelo bastante empregado na descrição do comportamento do coeficiente de atrito em deslizamento sem lubrificação sugere que o atrito entre polímeros pode ser atribuído a duas fontes principais: uma parcela de atrito por deformação, que envolve a energia necessária para deformar as asperezas em contato para que haja o deslizamento; e outra parcela de atrito por adesão, causado pelo contato entre corpo e contra corpo (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). A parcela de adesão apresenta dependência com parâmetros de dureza, estrutura molecular, temperatura de transição vítrea e cristalinidade do polímero, rugosidade da superfície do contra corpo e interações químicas e eletrostáticas entre contra corpo e polímero (BRISCOE e SINHA, 2008). A Figura 2.6 apresenta as componentes do atrito esquematicamente.

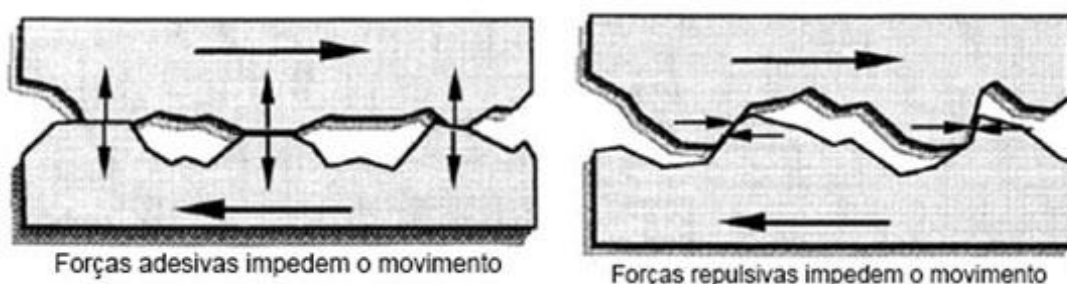
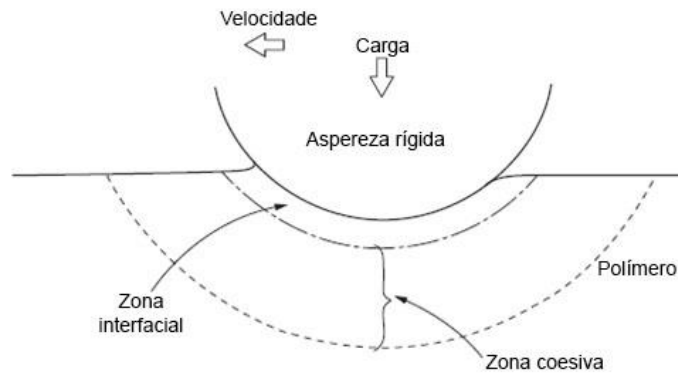


Figura 2.6 - À direita, componente de atrito adesivo. À esquerda, componente de atrito de deformação.

Fonte: Adaptado de Blau (2008)

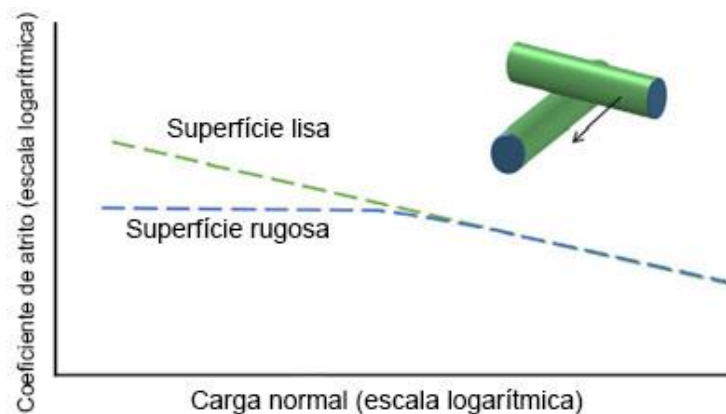
Tanto a componente adesiva quanto a de desgaste apresentam origem e efeitos complexos e devem ser abordadas separadamente para uma melhor compreensão. Desta maneira, discorre-se sobre ambas nas seções 2.2.3 e 2.2.4. A Figura 2.7 apresenta as zonas de ocorrências destes dois termos do atrito ocorrendo simultaneamente. A zona interfacial apresenta a parcela de adesão enquanto que a zona coesiva apresenta a parcela de deformação.



**Figura 2.7 - Duas regiões principais atuantes no atrito entre um corpo duro contra substrato polimérico em deslizamento relativo.**

**Fonte: Adaptado de Briscoe (1981)**

Para pequenas cargas e superfícies moderadamente rugosas, onde a área real de contato se mantém uma pequena fração da área nominal de contato e é diretamente proporcional ao carregamento, o coeficiente de atrito é, portanto, constante e independente do nível de carregamento. A Figura 2.8 demonstra esse caso no qual dois cilindros em cruz, que foram submetidos ao processo de torneamento para obter uma superfície moderadamente rugosa, são atritados sob cargas baixas. Entretanto, com o aumento da carga ou a diminuição da rugosidade, é visto que o coeficiente de atrito diminuí. Sobre estas condições, embora a força de atrito se mantenha proporcional a área real de contato, a área não se mantém proporcional a carga normal (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).



**Figura 2.8 - Diagrama esquemático mostrando a relação entre o coeficiente de atrito em função da carga e da rugosidade das superfícies para cilindros em cruz de PMMA deslizando sem lubrificação.**

**Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017)**

Em cargas elevadas ou superfícies lisas, a deformação elástica nos pontos de contato dos cilindros é tão elevada que asperezas se “unem”, aproximando a situação

de um contato de uma única aspereza. Para uma única aspereza esférica, deformada elasticamente, a área de contato será proporcional a força de carregamento elevada ao expoente  $2/3$ , e este mesmo expoente é aplicado ao contato elástico entre cilindros (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Desta maneira, tem-se a seguinte relação:

$$\mu \propto \frac{A_r}{F_N} \propto \frac{F_N^{2/3}}{F_N} \propto F_N^{-1/3} \quad (1)$$

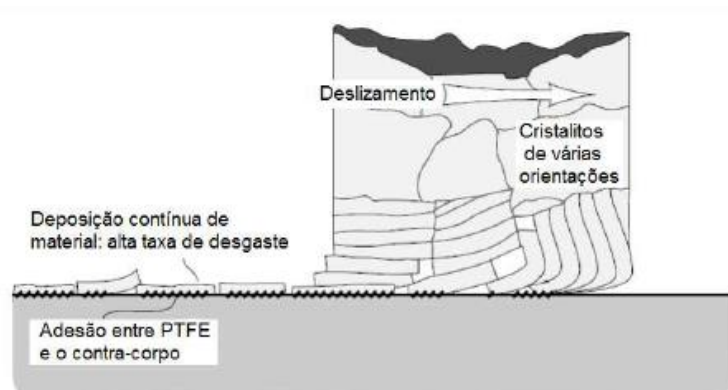
A relação apresentada na equação (1), foi proposta por Archard (1957) e demonstra que o coeficiente de atrito entre polímeros para carregamentos elevados e superfícies pouco rugosas é relacionado com o carregamento elevado a  $-1/3$ .

### 2.2.3 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo surge da quebra de junções ligadas adesivamente ocorrendo devido ao movimento relativo entre as superfícies em contato (KAR e BAHADUR, 1978). Este tipo de desgaste ocorre preferencialmente quando a superfície do contra corpo é lisa, e envolve a transferência de uma camada polimérica para a superfície mais dura e sua subsequente remoção como partículas de desgaste (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017), devido ao cisalhamento causado pela passagem da aresta de uma aspereza do corpo pelo filme depositado (LAUX e SCHWARTZ, 2013).

Como será visto a seguir, o mecanismo de deposição de material polimérico pode acontecer de diferentes maneiras. A literatura não apresenta um estudo específico sobre o mecanismo do PEEK, portanto, são apresentados mecanismos de desgaste de polímeros. Por fim, compara-se a semelhança do PEEK com os polímeros que apresentam tais mecanismos a fim de propor o modo de desgaste adesivo do PEEK.

O deslizamento do PTFE contra uma superfície metálica mais dura resultará no desgaste do material devido a adesão e conseqüente desprendimento de camadas transferidas para o contra corpo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001). O mecanismo de desgaste adesivo do PTFE é apresentado na Figura 2.9.



**Figura 2.9 - Mecanismo de formação de filme transferido do PTFE para o contra corpo.**

**Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2001)**

No caso do PTFE, as camadas desprendidas do polímero não se quebram ao se transferir para o contra corpo (BELYI *et al.*, 1977). Este mecanismo de desgaste é pouco encontrado em outros polímeros. Entretanto, o polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) são alguns dos polímeros que também apresentam este mecanismo. Acredita-se que esta similaridade ocorra, pois, estes polímeros, assim como o PTFE, possuem cadeias moleculares “suaves”; em outras palavras, não apresentam ramificações e nem dobras em suas cadeias poliméricas (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

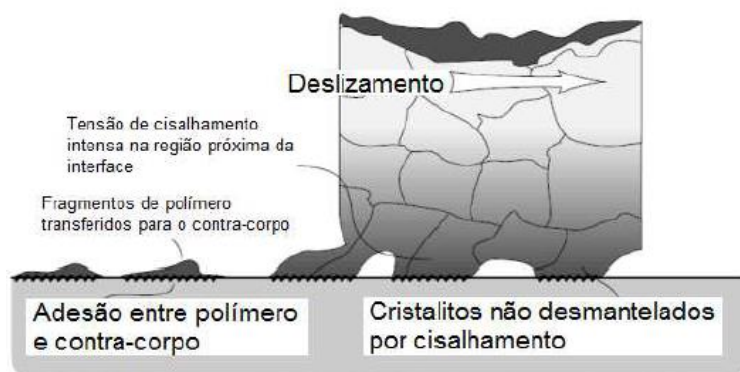
Este mecanismo de desgaste característico do PTFE, ocorre em fases. Após uma primeira camada ser transferida para o contra corpo, o deslizamento ocorrerá entre o corpo e o filme transferido no contra corpo, ocasionando assim, diminuição do coeficiente de atrito (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). O coeficiente de atrito estático do PTFE, HDPE e UHMWPE antes do deslizamento é 50% maior que o coeficiente de atrito cinético. Isto é causado pela força adicional necessária para iniciar a transferência de filme (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

Desta maneira, estes materiais poliméricos que apresentam a transferência de filme como mecanismo de desgaste, e possuem baixo coeficiente de atrito, fazem parte da classe de materiais que operam com lubrificação sólida.

Outro mecanismo de desgaste, que ocorre com a maioria dos polímeros, é a transferência de fragmentos ou pedaços de material para o contra corpo. Este fenômeno é conhecido como mecanismo de transferência normal ou “*lumpy transfer*”, e é apresentado na Figura 2.10. O tamanho dos fragmentos transferidos é de aproximadamente 1 $\mu$ m de diâmetro médio. Por ter um tamanho reduzido, o fragmento não apresenta capacidade de carga grande, e desta maneira, diferentemente do



mecanismo do PTFE, não contribui positivamente para o atrito e o desgaste em contatos de deslizamento (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).



**Figura 2.10 - Mecanismo de transferência normal de polímeros, ou, *lumpy transfer*.**

**Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2001)**

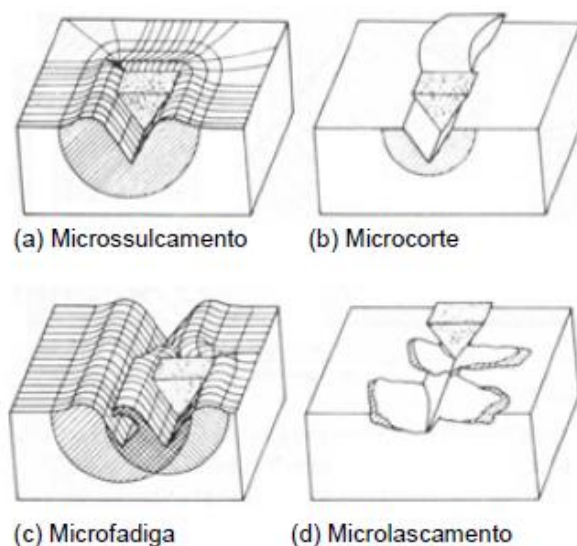
Como já apresentado na seção 2.1.1, o PEEK possui uma cadeia molecular polimérica linear, semelhante ao PTFE, UHMWPE e HDPE, desta maneira, acredita-se que o mecanismo de desgaste do PEEK é mais semelhante à transferência de filmes do que transferência normal.

A adesão resulta primeiramente de forças fracas intermoleculares – pontes de hidrogênio e forças de van der Waals – que também são responsáveis pela atração entre as cadeias poliméricas no substrato do polímero. As interações moleculares entre a camada polimérica superficial e o contra corpo metálico são, frequentemente, mais fortes do que as interações moleculares do substrato. Disto, resultam efeitos como a transferência de filmes poliméricos para o contra corpo em um sistema de deslizamento. O início deste efeito, bem como sua influência no decorrer do deslizamento, apresenta grande influência para valores de coeficiente de atrito e desgaste. Com a adesão do material polimérico à superfície do contra corpo, ocorre a separação devido ao movimento relativo de deslizamento, gerando o filme transferido. A camada polimérica transferida tende a aumentar de tamanho com a continuidade do deslizamento. Esta, eventualmente se desprende, e pode apresentar orientação das cadeias na mesma direção do deslizamento. A taxa de desgaste é governada pela taxa de remoção de filme transferido do contra corpo, ao invés de taxa de material polimérico transferido para o filme. Há evidências de que polímeros apresentam relutância para transferências adicionais de material polimérico para seu filme transferido, e se o filme transferido ao contra corpo se aderir fortemente, a taxa de desgaste será baixa (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

### 2.2.4 Desgaste abrasivo

Diferentemente do desgaste por adesão, o desgaste abrasivo ocorre quando a superfície do contra corpo é rugosa. Desta maneira, as asperezas contidas na superfície do contra corpo deformam o polímero em escalas significativas. O nível de deformação define o tipo de desgaste que o material sofrerá. Se a deformação for elástica, o desgaste ocorre por fadiga, enquanto que, se houver deformação plástica, o desgaste será abrasivo (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

O desgaste abrasivo pode ser classificado em quatro mecanismos de desgaste. Estes são: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microlascamento (ZUM-GAHR, 1987), apresentados esquematicamente na Figura 2.11. A remoção de material por microsulcamento ou microcorte pode acontecer com a passagem de uma partícula abrasiva ou aspereza do material mais duro pelo material mais mole. A microfadiga está relacionada a passagem sucessiva da aspereza pelo material mais mole, e o microlascamento é a remoção completa de um grão que possui baixa força de ligação entre os grãos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).



**Figura 2.11 - Mecanismos de desgaste abrasivo.**

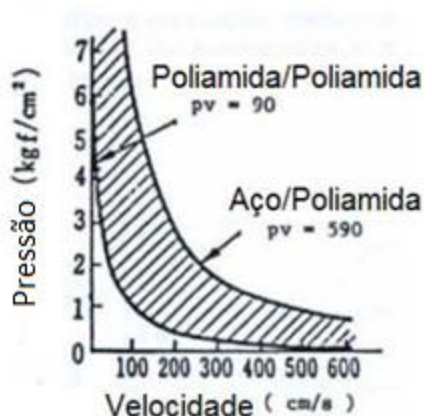
**Fonte: Adaptado de Zum-Gahr (1987)**

### 2.2.5 Condição PV

Um parâmetro capaz de quantificar a severidade de um contato é o parâmetro PV. Este parâmetro é frequentemente utilizado em condições de deslizamento com

pouca ou nenhuma lubrificação (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). Este parâmetro, nada mais é que o produto entre a pressão média de contato  $P$  (carga dividida pela área real de contato) e  $V$ , que é a velocidade de deslizamento. Desta maneira, sua unidade é  $\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Quando comparado aos metais, os polímeros apresentam baixo ponto de fusão e baixa condutividade térmica. Desta maneira, a temperatura é um fator limitante do sistema de contato polímero-metal. O parâmetro PV apresenta forte relação com a temperatura conforme seus valores se elevam, e classifica-se como “PV limitante” o valor mínimo de PV para o qual o polímero não continuará em deslizamento usual devido à fusão. A Figura 2.12 apresenta valores de PV limitantes para poliamida contra poliamida e aço contra poliamida.

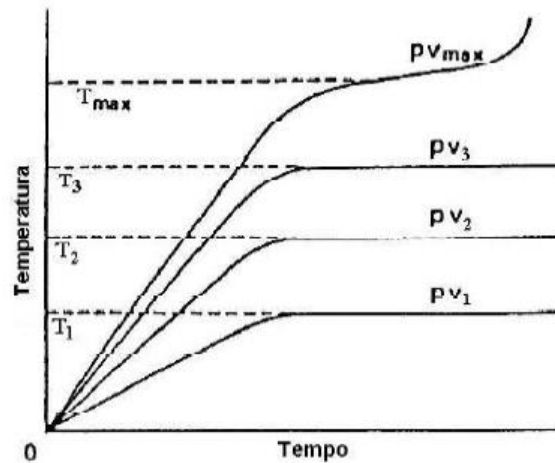


**Figura 2.12 - PV limite para contato poliamida-poliamida e Aço-poliamida.**

**Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990)**

Nota-se que ao substituir um dos corpos por aço, o valor de PV limite é aumentado consideravelmente. Isto se dá, pois, o aço dissipa grande parte do calor gerado pelo contato, mantendo assim, a temperatura em níveis menores quando comparados ao mesmo valor de PV para o contato poliamida-poliamida.

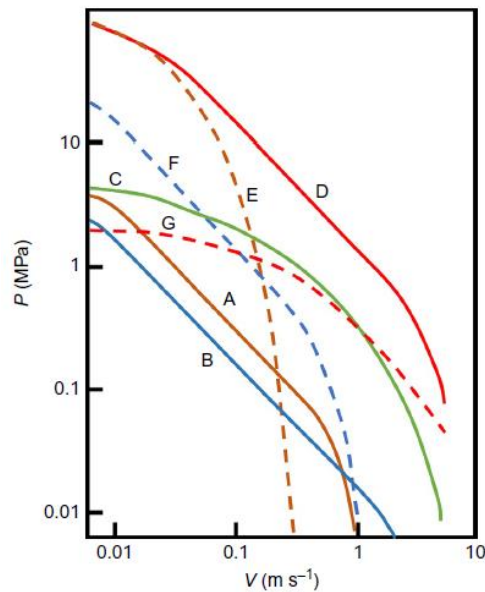
A Figura 2.13 mostra a relação entre a temperatura e valores de PV diferentes com o passar do tempo. Para valores de PV inferiores ao PV limite, a temperatura apresenta crescimento inicial até atingir um patamar ao qual se estabiliza no tempo. Para a condição PV limite ou acima, a temperatura se eleva rapidamente após um período, resultando na fusão do material e consequente falha do sistema.



**Figura 2.13 - Valores de temperatura para diferentes valores de PV.**

**Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990)**

Embora o parâmetro PV apresente boa capacidade de caracterização, é importante lembrar que para cargas elevadas, o material falha por escoamento, enquanto que para velocidades elevadas, a falha ocorra devido à temperatura por atrito. Apenas regimes médios de PV apresentam valores razoáveis para dimensionamentos de peças (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). A Figura 2.14 apresenta curvas para diferentes materiais em sistema de mancal de deslizamento sem lubrificação.

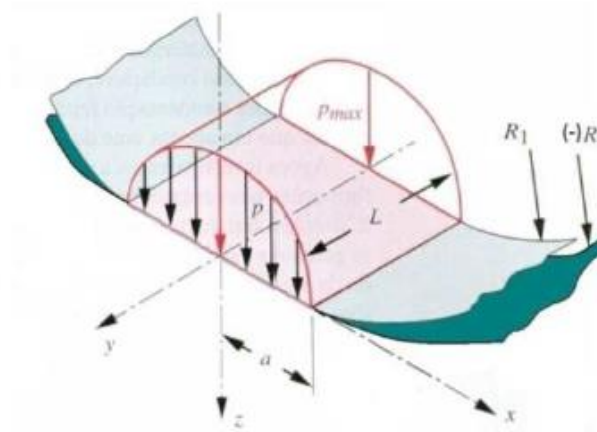


**Figura 2.14 - Exemplos de curvas P-V mostrando os limites de operação para diferentes tipos de buchas de mancal com taxa de desgaste de 25  $\mu\text{m}$  por 100 h (sob carga unidirecional). A: termoplásticos, B: PTFE, C: PTFE + Enchimento, D: Bronze poroso + PTFE + Pb, E: PTFE/vidro/compósito termoendurecido, F: termoendurecido reforçado + MoS<sub>2</sub>, G: termoendurecido / carbono – grafita + PTFE.**

**Fonte: Hutchings e Shipway (2017)**

### **2.2.6 Distribuição de pressão em contato côncavo-convexo entre dois cilindros**

Para uma adequada análise do tribossistema deve-se buscar entendimento quantitativo sobre a distribuição de pressão (NORTON, 2013). Em termos deste trabalho, utilizar-se-á o contato elástico de linha, aplicável a duas superfícies cilíndricas com os eixos paralelos entre si. A Figura 2.15 demonstra um modelo de contato entre dois cilindros com carga normal. A distribuição de pressão assume a forma de um prisma elíptico de largura  $2a$  enquanto que a zona de contato terá um formato retangular (NORTON, 2013).



**Figura 2.15 - Distribuição de pressão em contato do tipo linha entre cilindros côncavo e convexo.**

**Fonte: Adaptado de Norton (2003)**

A pressão máxima, que ocorre no centro do contato, e pressão média são definidas nas equações (2) e (3).

$$p_{m\acute{a}x} = \left( \frac{F_N E^*}{L\pi R} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$p_{m\acute{e}d} = \frac{F_N}{A_{nom}} = \frac{F_N}{2aL} \quad (3)$$

Onde  $R$  e  $E^*$  se definem pelas equações (4) e (5).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \quad (5)$$

$F_N$  é a carga aplicada ao conjunto, enquanto que  $E$  é o módulo de elasticidade referente a cada material.  $R$  representa o raio de cada cilindro, e tendo em vista o modelo a ser utilizado neste trabalho, o raio  $R_2$  terá valor negativo, pois trata-se de uma superfície côncava. Por fim, a constante  $\nu$  representa o coeficiente de Poisson,  $L$  é o comprimento do contato. A medida  $a$ , que representa a largura do contato pode ser calculada a partir da equação (6).

$$a = \left( \frac{F_N 4R}{L\pi E^*} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Com a largura definida, a distribuição de pressão possui um formato elipsoide e é dada pela equação (7).

$$p(x) = p_{m\acute{a}x} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (7)$$

### 2.3 COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS POLÍMEROS E DO PEEK

Esta seção objetiva levantar, na literatura, características do PEEK e de outros polímeros em relação às propriedades mencionadas nas seções 2.1 e 2.2.

No caso do PEEK, o peso molecular pode guardar relação com a taxa de desgaste, enquanto que o coeficiente de atrito, aparenta não ser influenciado por esta propriedade. Conforme visto por Lu e Friedrich (1995), em um ensaio do tipo pino sobre disco não lubrificado, a taxa de desgaste tende a diminuir em condições PV iguais com o aumento na viscosidade de fusão. A propriedade de viscosidade de fusão está relacionada com a força necessária para fazer o polímero escoar por um orifício a uma determinada temperatura, e está relacionada diretamente com o peso molecular, ou seja, quanto maior a viscosidade de fusão, maior o peso molecular. A Figura 2.16 apresenta os resultados obtidos para diferentes valores de viscosidade de fusão sobre condições PV semelhantes.

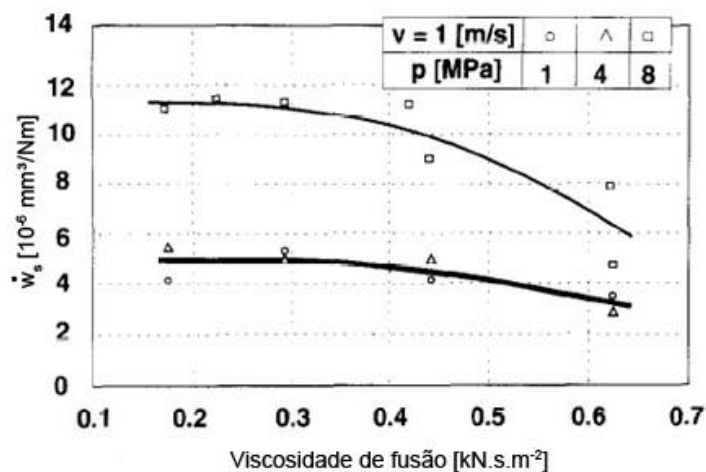


Figura 2.16 - Taxa de desgaste específico de PEEK puro para diferentes viscosidades de fusão em diferentes condições PV.

Fonte: Adaptado de Lu e Friedrich (1995)

Já o coeficiente de atrito, conforme constatado pelos autores do artigo, não apresentou tendência significativa com o peso molecular, conforme visto na Figura 2.17.

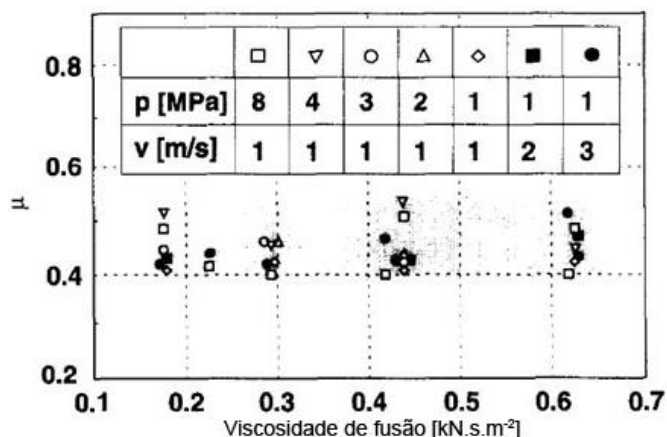


Figura 2.17 - Coeficiente de atrito de PEEK puro para diferentes viscosidades de fusão em diferentes condições PV.

Fonte: Adaptado de Lu e Friedrich (1995)

O coeficiente de atrito foi estudado mais profundamente por Zhang *et al.* (2008) em um ensaio de esfera sobre disco, no qual verificaram que para certos valores de carga normal, o mecanismo de deformação devido ao deslizamento apresentava grande variação, resultando em um comportamento complexo do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste, como pode ser visto na Figura 2.18. Esta, apresenta valores médios após a estabilização do coeficiente de atrito.

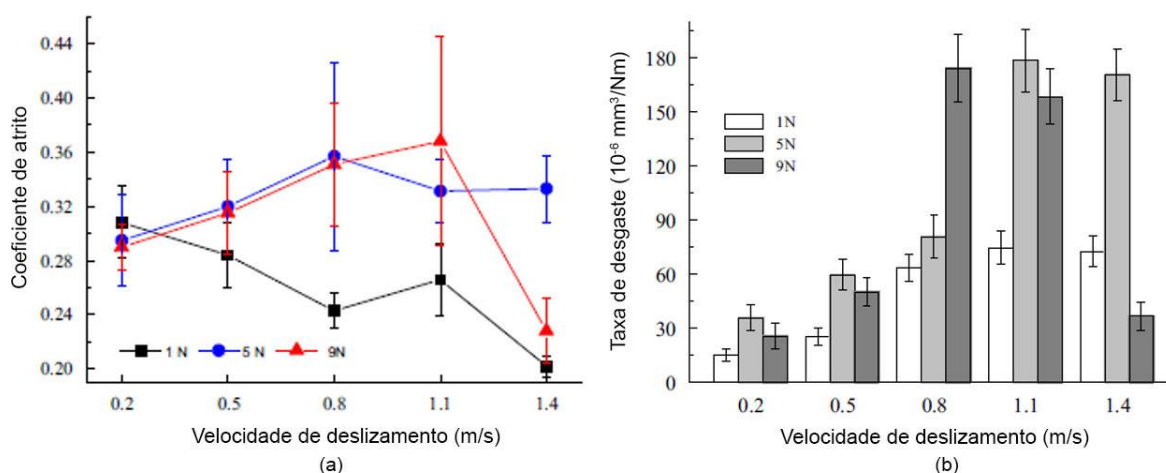


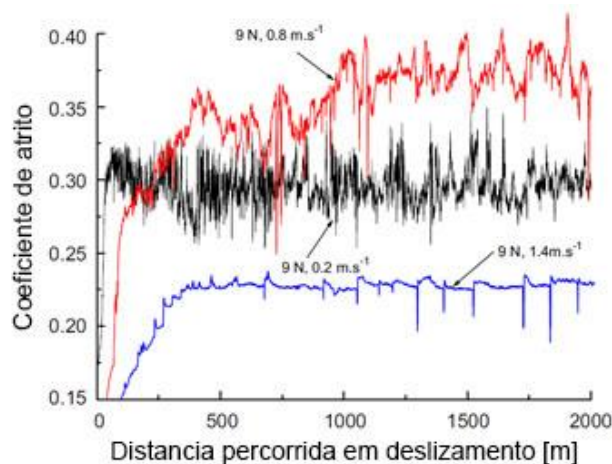
Figura 2.18 – Valores de coeficiente de atrito (a) e taxa de desgaste (b) para diferentes velocidades e cargas para PEEK amorfo contra aço.

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2008)

Para a carga de 9N e com velocidades diferentes, a evolução do coeficiente de atrito é apresentada na Figura 2.19. Nota-se um período de adaptação do sistema até que o coeficiente de atrito se estabilize, este período é chamado de amaciamento (*running-in*). Também, verifica-se uma amplitude maior para a velocidade de 0,8 m/s,



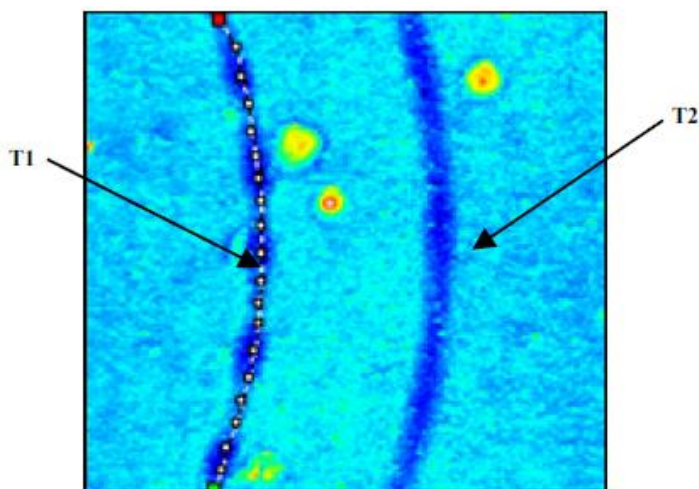
enquanto que um acréscimo ou uma diminuição na velocidade ocasionam uma maior estabilidade do coeficiente de atrito durante o ensaio.



**Figura 2.19 – Evolução do coeficiente de atrito sob mesma carga em diferentes velocidades para PEEK amorfo contra aço.**

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2008)

O perfil topográfico da superfície desgastada em duas condições de velocidade sob mesma carga é apresentado na Figura 2.20. Para a condição de [9N e 0,2 m/s], obteve-se o perfil topográfico na pista de desgaste demarcada pela linha tracejada da Figura 2.20, que é apresentado na Figura 2.21.

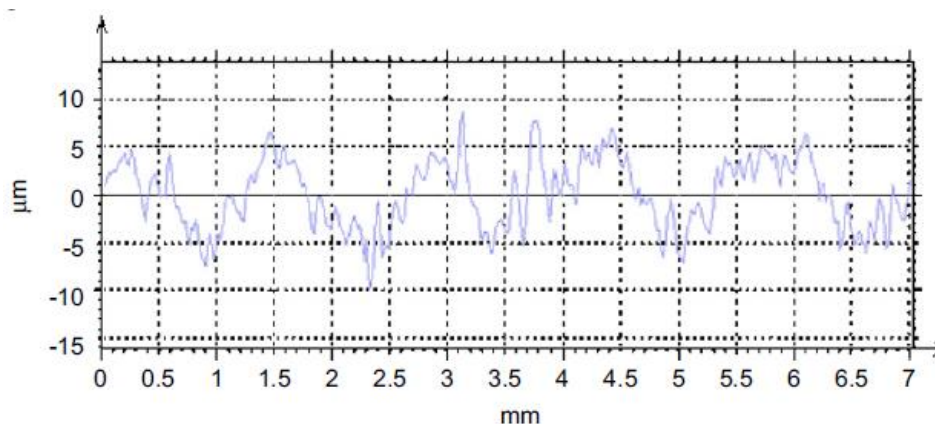


**Figura 2.20 – Vista de topo da pista de desgaste para as condições (T1) de [9N e 0,2m/s]; (T2) de [9N e 0,8m/s].**

Fonte: Zhang *et al.* (2008)

É pontuado uma frequência constante entre os picos e vales na pista de desgaste. Este efeito é atribuído ao arrasto característico de deformações

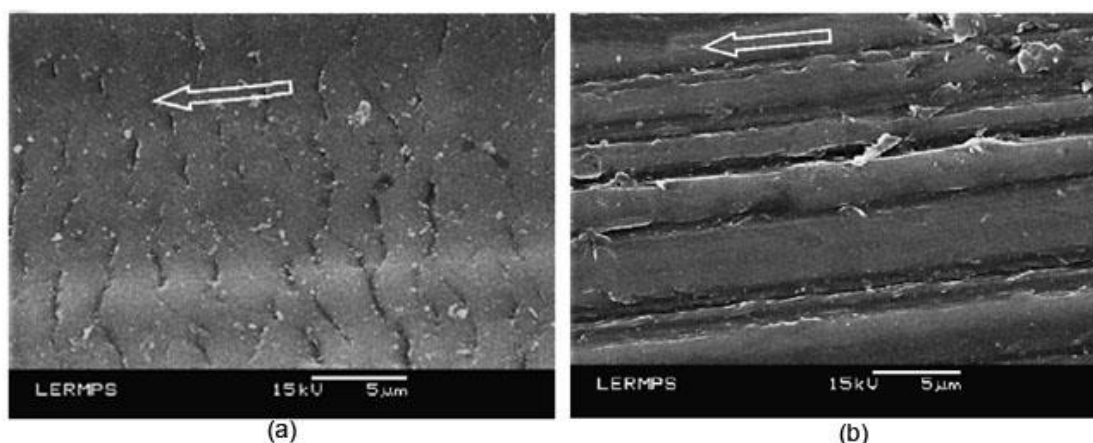
viscoelásticas, na qual há uma deformação da parte coesiva, ocasionando o arrasto do contra corpo no filme.



**Figura 2.21 – Perfil central da pista de desgaste na condição [9N e 0,2m/s].**

**Fonte: Zhang et al. (2008)**

A superfície apresentou mecanismos de desgaste diferentes conforme a variação da velocidade. Na Figura 2.22(a) é possível ver que as deformações ocasionaram um perfil ondulado. O autor atribui esse efeito a uma deformação muito superior da superfície paralela ao deslizamento ao substrato abaixo da superfície. Essa diferença na deformação ocasiona um “atraso” na deformação ocasionando estas dobras com formato de onda.



**Figura 2.22 – Morfologia da superfície desgastada, obtida por MEV (microscopia eletrônica de varredura), nas condições: (a) 9N e 1,1m/s; (b) 9N e 1,4m/s.**

**Fonte: Zhang et al. (2008)**

Na condição exposta pela Figura 2.22(b), nota-se linhas de desgaste bem definidas e na direção do deslizamento, sugerindo que o mecanismo de atrito e desgaste dominante, em condições de velocidade de deslizamento elevadas, é o de micro-corte (ZHANG et al.,2008).

Sendo assim, é proposto a existência de duas velocidades críticas, para uma mesma carga, que modificam os efeitos governantes do atrito. O primeiro valor crítico de velocidade é tal que, para valores menores que este, o escoamento viscoso do material apresenta severa influência. O segundo, corresponde à velocidade para qual valores maiores, não mais apresentam dissipação de energia interna como um componente significativo para contribuição da força de atrito. Entre estes valores críticos, é possível que exista uma velocidade na qual o polímero apresentará um alto coeficiente de atrito e desgaste, conforme exposto na Figura 2.19 (ZHANG *et al.*, 2008).

Em condições de cargas inferiores, o mecanismo de desgaste principal verificado foi o desgaste por fadiga, no qual, as asperezas do filme polimérico chocavam-se contra as do contra corpo, e a repetição deste efeito ocasionou fadiga em volta destas asperezas, até que as micro zonas foram eliminadas do substrato em forma de partículas de desgaste. As Figura 2.23, obtida por MEV, apresentam a superfície desgastada do PEEK sob condições de carga baixa.

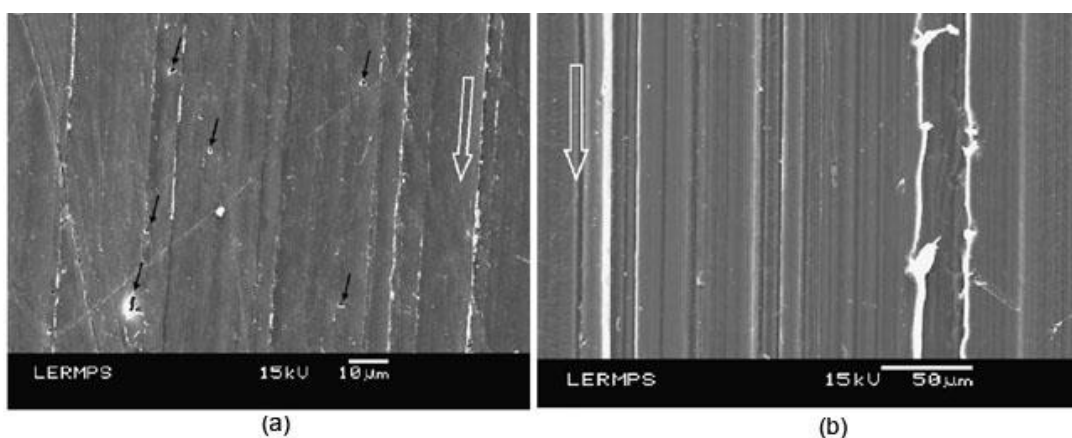


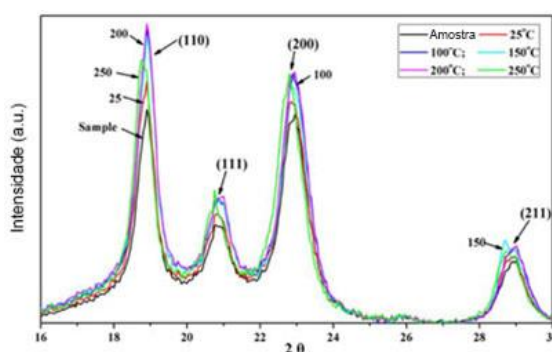
Figura 2.23 – Superfície do PEEK amorfo no centro da pista de desgaste, sob condições de (a) [1N e 0,2m/s]; (b) [1N e 1,1m/s] .

Fonte: Zhang *et al.* (2008)

A seta branca indica a direção de deslizamento enquanto que as setas pretas da Figura 2.23(a) indicam pontos onde ocorreram o desprendimento de partículas ocasionado pelo mecanismo de fadiga. Com um aumento na velocidade, o desgaste se torna mais severo, como pode ser observado na Figura 2.23(b).

Wang *et al.* (2017) verificaram em um ensaio tipo esfera sobre disco com movimento recíproco, através de uma análise XRD (difração de raio X), uma alteração da cristalinidade na superfície de PEEK desgastado. Nesta análise, foi verificado que o sistema cristalino predominante do PEEK, o ortorrômbico, caracterizado por quatro

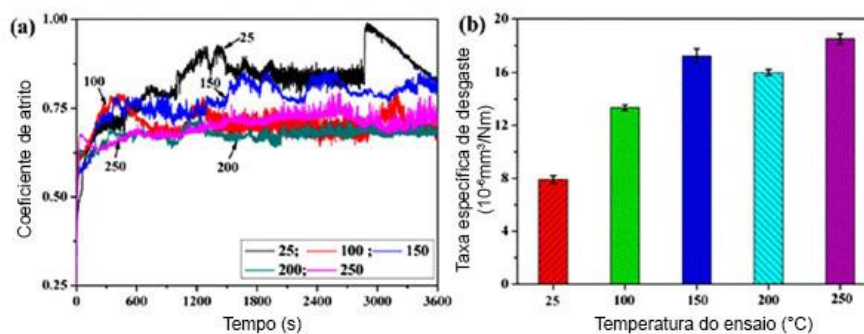
picos típicos a valores de  $2\theta$  de  $18,8^\circ$ ,  $20,8^\circ$ ,  $22,9^\circ$  e  $28,9^\circ$ , correspondendo aos planos cristalinos (110), (111), (200) e (211) respectivamente. Há um aumento da intensidade dos picos na superfície do PEEK com o aumento da temperatura do corpo até os  $200^\circ\text{C}$ . Após esta temperatura, a intensidade decresce, mas mesmo assim é maior do que à temperatura ambiente. Na Figura 2.24, é possível verificar que este aumento da intensidade de raios-X ocorre em todos os planos cristalinos. Isto é classificado pelos autores como um aumento da cristalinidade do material, sendo que este, é tido por aumentar a resistência ao desgaste (WANG *et al.*, 2017).



**Figura 2.24 – Padrões de XRD para material superfície do PEEK antes e após ensaios à temperaturas diferentes.**

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

Entretanto, também foi verificado um aumento na taxa de desgaste específico do PEEK com o aumento da temperatura, como pode ser verificado na Figura 2.25(b). Desta forma, conclui-se que, apesar do aumento da cristalinidade e a possibilidade deste efeito aumentar a resistência ao desgaste, o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do PEEK apresenta maior influência sobre a taxa específica de desgaste.



**Figura 2.25 – Variações do (a) coeficiente de atrito e (b) taxa de desgaste específica em diferentes temperaturas.**

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

A Figura 2.25(a) apresenta a variação do coeficiente de atrito do PEEK durante o ensaio a temperaturas diferentes. Há uma mudança perceptível do coeficiente de atrito após a temperatura de 150°C. Atribui-se a isso à transição vítrea do PEEK, que ocorre à 143°C, como já apresentado. Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK antes do desgaste e após o desgaste são apresentadas na Figura 2.26. Pela figura, nota-se uma mudança do mecanismo de desgaste após a temperatura de 150°C, com o surgimento de trincas (WANG *et al.*, 2017)

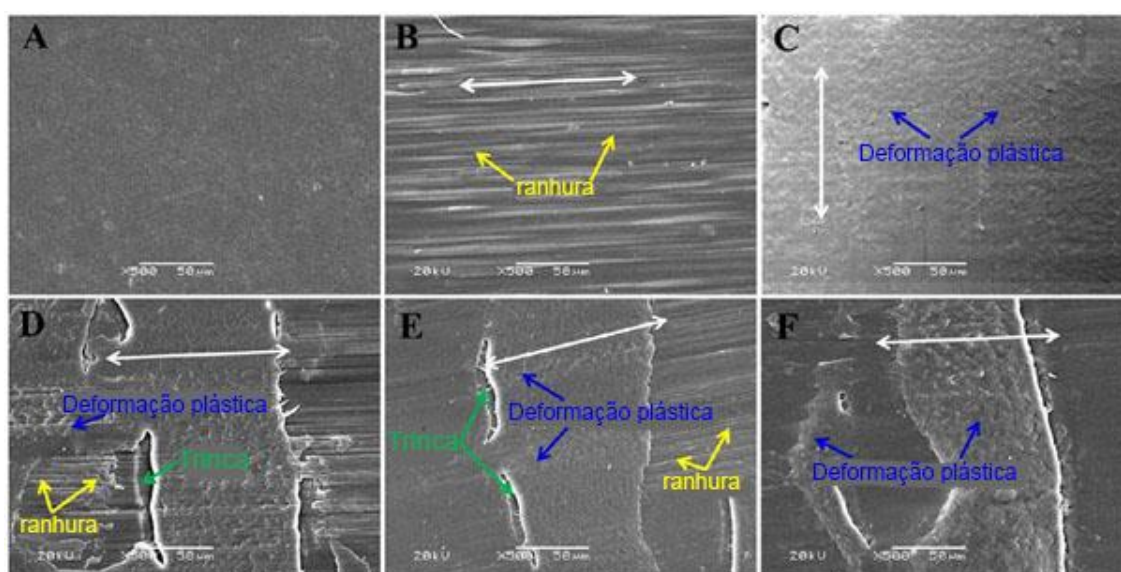


Figura 2.26 – Imagens por MEV da (A) superfície antes do ensaio e (B-F) após ensaios de desgaste à temperatura: (B) 25°C, (C) 100°C, (D) 150°C, (E) 200°C e (F) 250°C .

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

Vale (2014) realizou um estudo com ensaio tipo mancal de deslizamento sobre eixo<sup>3</sup> utilizando PTFE como polímero ensaiado em condição sem lubrificação. Resultados do coeficiente de atrito obtidos em quatro condições de força e velocidade diferentes, com produto  $PV_{méd}$  constante, estão apresentados na Figura 2.27.

É proposto um período de amaciamento, no qual a primeira camada de filme polimérico é transferida para o contra corpo de aço. Este período acontece durante os primeiros 10 min de ensaio, e é seguida pelo período de transição, a qual apresenta crescimento do coeficiente de atrito. Realizaram-se testes de significância para encontrar o período de estabilização do sistema, e foi verificado com 95% de

<sup>3</sup> Este estudo, ainda que endereçado ao PTFE, tem grande relevância para este trabalho, pois o tribômetro utilizado é o mesmo (vide seção 3.2).

confiança, que a estabilização ocorreu nos últimos 20 min de ensaio para todos os casos (VALE, 2014). Uma representação esquemática deste comportamento é apresentada na Figura 2.28.

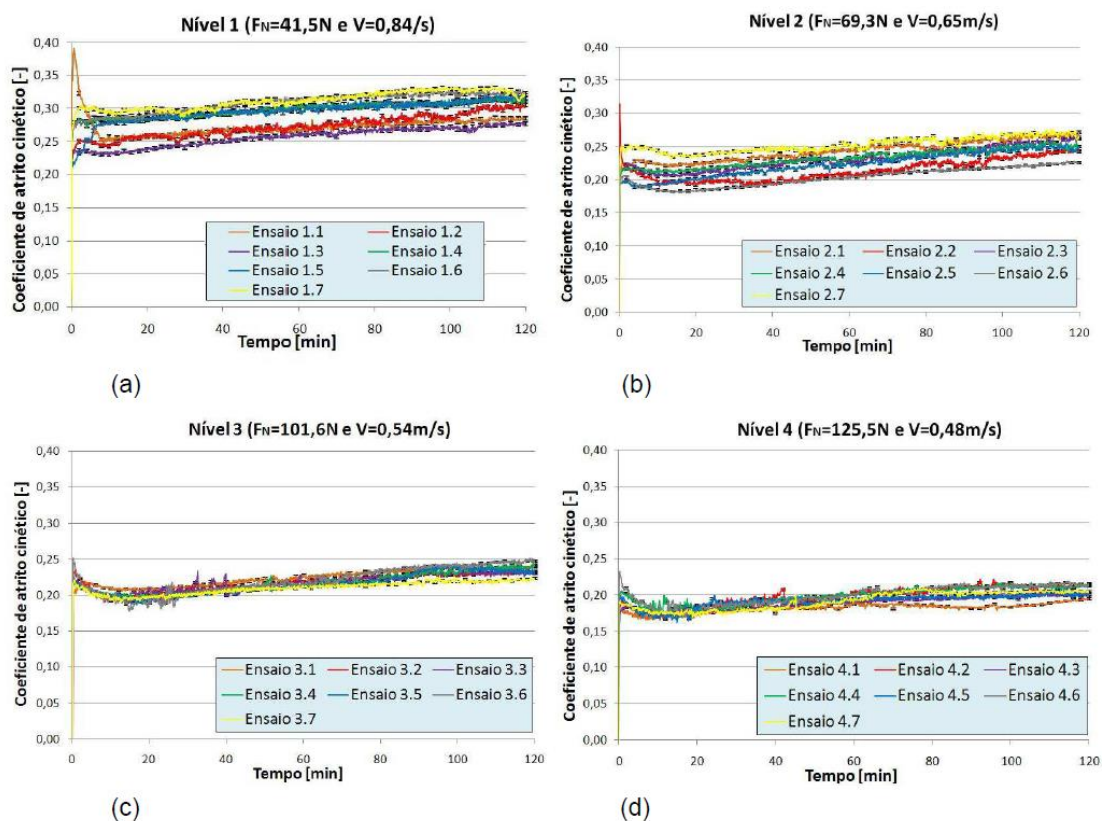
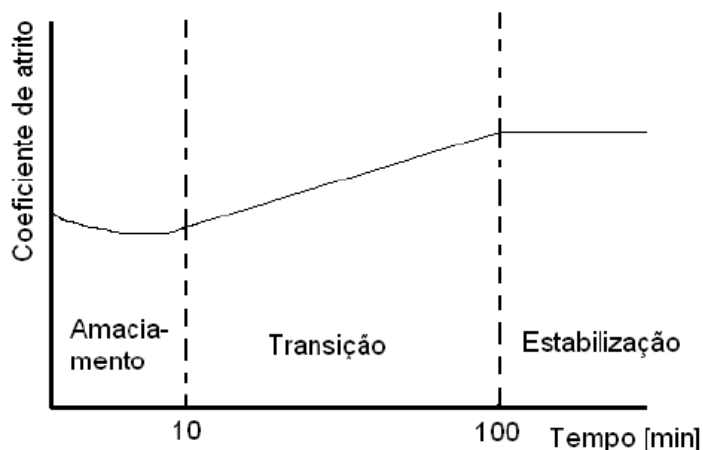


Figura 2.27 – Valores de coeficiente de atrito obtidos em função do tempo para quatro condições de força e velocidades diferentes sob  $PV_{méd} = 0,46 \text{ MPa.m.s}^{-1}$  constante.

Fonte: Vale (2014)



**Figura 2.28 – Representação esquemática do comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio com PTFE.**

**Fonte: Vale (2014)**

Também se verificou que no ensaio com o PTFE, o coeficiente de atrito apresentou decréscimo com um aumento da força normal no sistema. Este comportamento está de acordo com o modelo de Archard (1957) descrito na equação (1). Na Figura 2.29, estão os valores médios obtidos para o coeficiente de atrito nos últimos 20 min de ensaio em relação a condição de força normal, ou seja, após a estabilização do sistema (VALE, 2014).

A curva ajustada apresentou 96,6% de representatividade. Este resultado é interessante ao mostrar que o modelo de Archard (1957) pode ser reproduzido em um sistema estável.

Já quanto ao desgaste, foi verificado que este aumenta com um aumento da força normal, conforme apresentado na Figura 2.30.

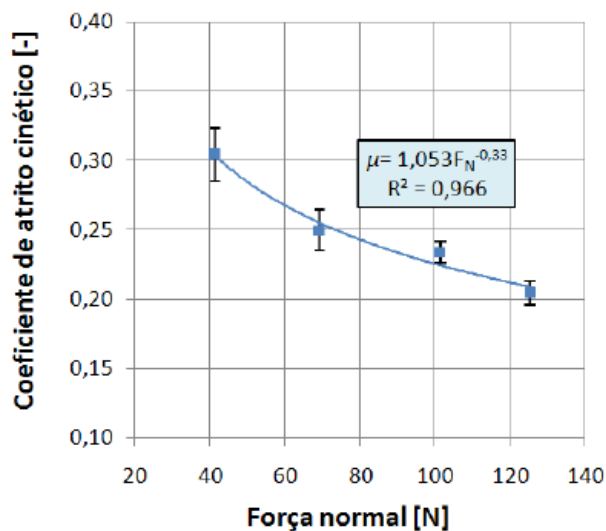


Figura 2.29 – Níveis de coeficiente de atrito nos últimos 20 min de ensaio para quatro condições de força normal.

Fonte: Vale (2014)

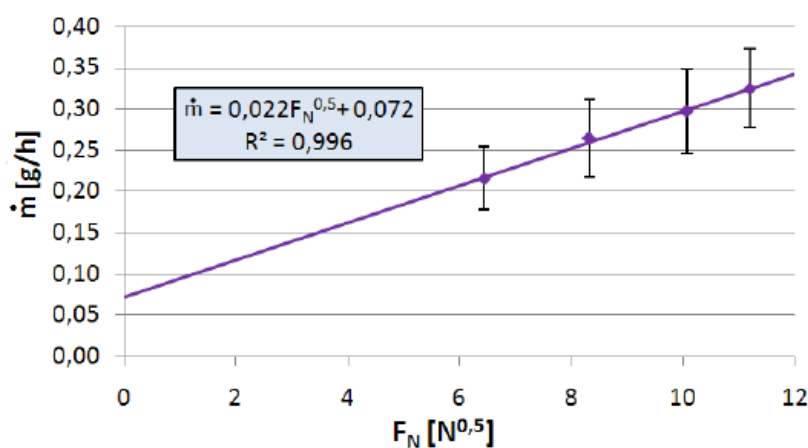


Figura 2.30 – Relação entre taxa de desgaste mássico e a raiz da força normal ( $F_N^{0,5}$ ) para as quatro condições de ensaio.

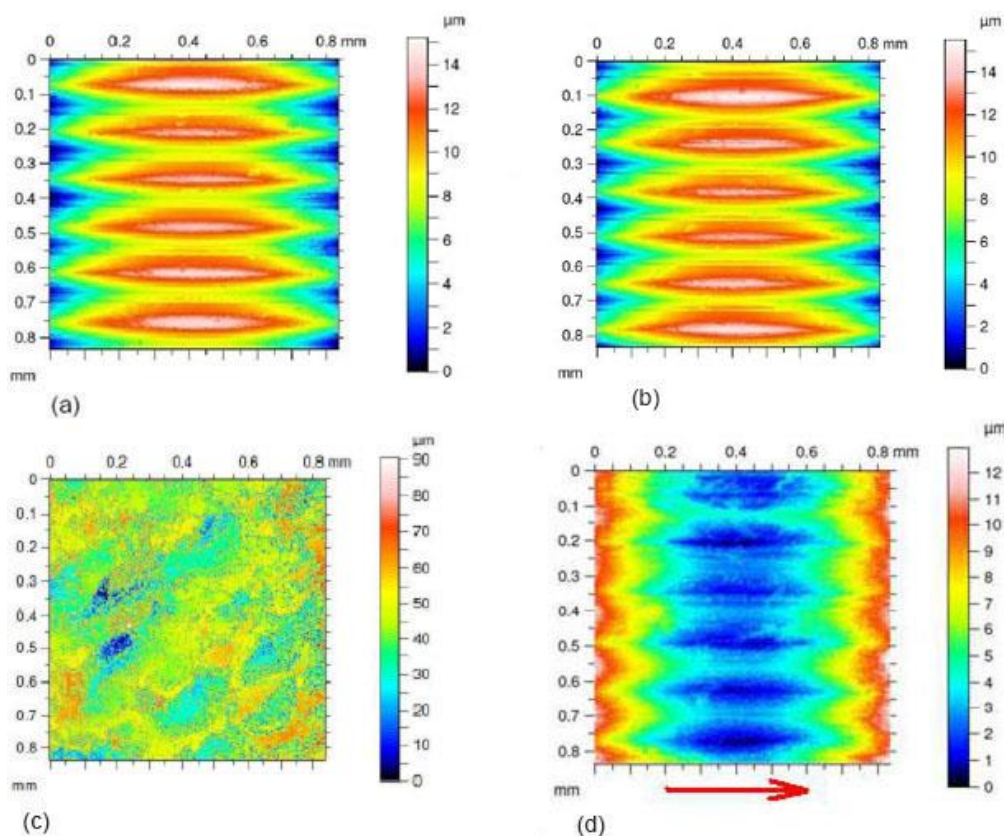
Fonte: Vale (2014)

Vale (2014) deduz a partir de uma relação entre  $P_{méd} \propto A_{nom} \propto F_N^{0,5}$ , que a taxa de desgaste mássico  $\dot{m}$  é proporcional a  $P_{méd}$ , e portanto  $\dot{m} \propto F_N^{0,5}$ . Pelos resultados obtidos, observou-se uma representatividade de 99,6% pela linha de tendência, concluindo que houve proporcionalidade entre as duas grandezas.

Além disso, verificou-se que o desgaste no contra corpo de aço foi mínimo, enquanto que o corpo de PTFE modificou-se completamente. Comportamento esperado devido a diferença de dureza e módulo de elasticidade dos materiais. Imagens da topografia do aço e do PTFE antes e após os ensaios, obtidas por IDLB



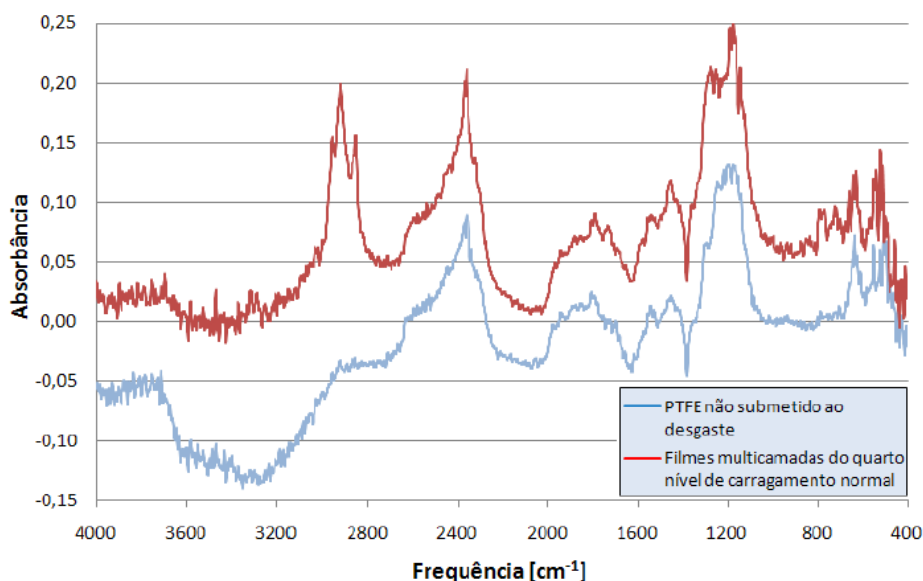
(interferometria de luz branca), são apresentadas na Figura 2.31. O PTFE apresentou uma superfície desgastada que se assemelha a uma imagem negativa do perfil topográfico do aço.



**Figura 2.31 – Topografias do aço inoxidável e do PTFE, obtidas por IDBL por Vale (2014): (a) aço antes do ensaio; (b) aço após o ensaio; (c) PTFE antes do ensaio; (d) PTFE após o ensaio onde a seta vermelha indica direção do deslizamento.**

**Fonte: Vale (2014)**

Após os ensaios, é possível verificar a inserção de novos componentes químicos à superfície do PTFE. Para isto, utiliza-se a análise por FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) comparando a superfície do PTFE antes e após o ensaio. Dados obtidos por Vale (2014) são apresentados na Figura 2.32. Nota-se que os perfis espectrais apresentam alguns picos semelhantes, enquanto que o perfil obtido com a amostra após o ensaio apresentou alguns picos novos. O pico que surgiu entre as frequências de  $2940\text{-}2942\text{ cm}^{-1}$  é característico de interações primárias e secundárias de OH, dois elementos que não estão presentes na composição original do PTFE. Dessa maneira propõe-se que houve alteração na composição química do polímero devido à fatores ambientais (presença de oxigênio e umidade) associados à alta temperatura (VALE, 2014).



**Figura 2.32 – Espectros obtidos por FTIR do PTFE não submetido ao ensaio de desgaste e de filmes transferidos sob condição de maior carga.**

Fonte: Vale (2014)

Com relação à cristalinidade, foi verificada uma alteração desta propriedade tanto da superfície do PTFE quanto nas partículas de desgaste. Esta mudança pode ser verificada através da análise DSC (calorimetria explanatória diferencial) que apresenta variações da entalpia de fusão. Este valor pode ser comparado ao de uma amostra original, e sequencialmente é possível obter a cristalinidade a partir da equação (8).

$$x_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H^o} \quad (8)$$

onde,  $X_c$  é o grau de cristalinidade [%],  $\Delta H_m$  é a entalpia de fusão medida em DSC [J/g] e  $\Delta H^o$  é a entalpia de fusão do material totalmente cristalino [J/g]. Para o PTFE totalmente cristalino, considera-se o valor de  $\Delta H^o$  de 82 J/g (Lei *et al.*, 2007), e utilizando a equação (8), obteve-se cristalinidade de 39,9, 46,5 e 56,0% para amostra não ensaiada, superfície e filme multicamadas ensaiados no nível 1, respectivamente. A Figura 2.33 apresenta os resultados obtidos pela análise DSC para estas amostras.

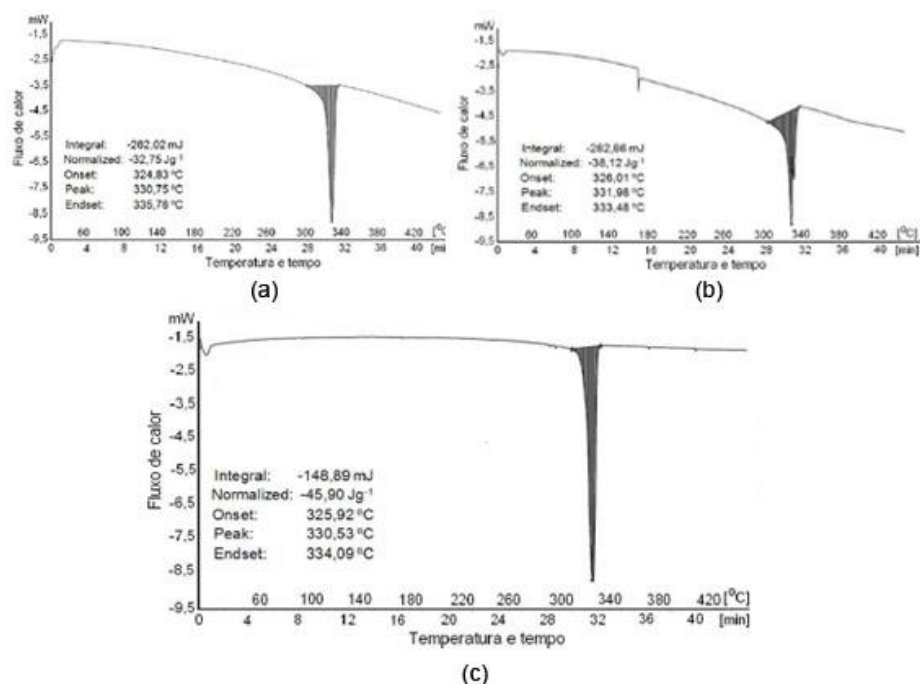


Figura 2.33 – Curvas de fluxo de calor em função da temperatura para (a) material do corpo de PTFE não ensaiado; (b) superfície do PTFE ensaiada no nível 1; (c) filme multicamadas do PTFE ensaiado também no nível 1.

Fonte: Vale (2014)

Laux e Schwartz (2013) verificaram em ensaios de deslizamento de aço contra PEEK, que o tipo de movimento de deslizamento afeta características como desgaste, temperatura e coeficiente de atrito, ainda que sob as mesmas condições de velocidade e pressão de contato.

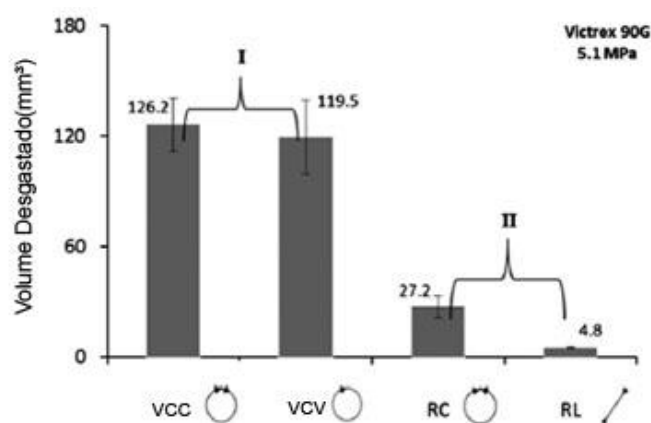
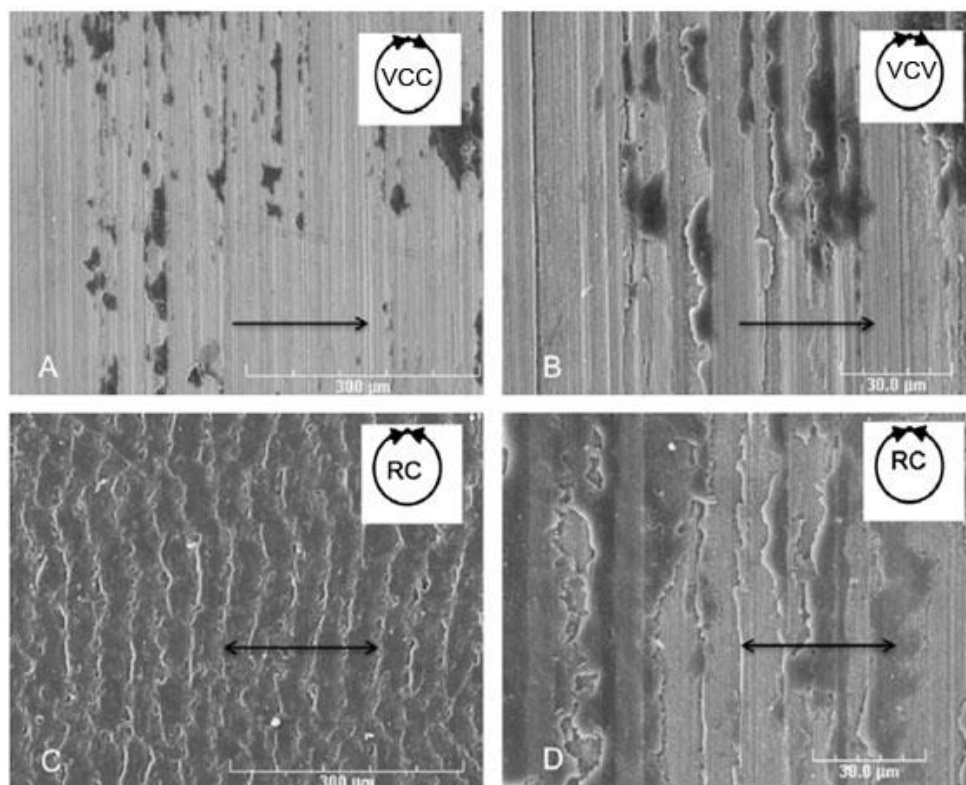


Figura 2.34 – Volume de material desgastado para um material PEEK em diferentes condições de deslizamento sob mesma pressão e velocidade.

Fonte: Adaptado de Laux e Schwartz (2013)

A Figura 2.34 mostra os valores de volume de material desgastado para diferentes modos de deslizamento, a saber, VCC (velocidade circular constante), VCV (velocidade circular variável), RC (recíproca circular) e RL (recíproca linear). O mecanismo de desgaste apresentado por cada modo de deslizamento também foi diferente. A Figura 2.35 mostra imagens obtidas pelo MEV da superfície de aço que apresentam material transferido.



**Figura 2.35 – Imagens obtidas por MEV do filme de PEEK transferido para o contra corpo de aço sob pressão de 5,1 MPa e mesma velocidade. As setas indicam a direção do deslizamento.**

**Fonte: Adaptado de Laux e Schwartz (2013)**

É proposto que o material tende a se depositar em um lado da aspereza, e que em movimentos circulares contínuos, o material é transferido através do modo normal, ou seja, descontinuamente. Em movimentos recíprocos, material é transferido nos dois lados da aspereza, criando um filme multicamadas contínuo, oferecendo melhor resistência ao desgaste (LAUX e SCHWARTZ, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para corpo e contra corpo foram, respectivamente, o PEEK puro e aço inoxidável AISI 304L, disponibilizados pelo LEMS (Laboratório de Elementos de Máquinas e Superfície) da UTFPR Campus Londrina. O PEEK foi adquirido na forma de barra de seção circular extrudada ( $\varnothing 30\text{mm}$  e  $500\text{mm}$  de comprimento). Certificados das matérias-primas encontram-se no anexo A e B. A Tabela 3.1 apresenta algumas propriedades do PEEK e do aço inoxidável, bem como as referências destes valores. Nota-se que tanto o módulo de elasticidade quanto a condutibilidade térmica do PEEK estão algumas ordens de grandezas abaixo do aço inoxidável.

**Tabela 3.1 – Propriedades do PEEK e do aço inoxidável AISI 304L.**

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]	Condutibilidade Térmica [W/mK]	Massa Específica [g/cm <sup>3</sup> ]
PEEK (Fonte)	3,7 Victrex Data Sheet	0,4 AZoM (2003)	0,25 van der Vegt (2005)	1,30 Victrex Data Sheet
Aço Inoxidável AISI 304L (Fonte)	193 Callister (2012)	0,3 Callister (2012)	16,2 Callister (2012)	8,0 Callister (2012)

Os corpos de prova e contra corpos foram fabricados por torneamento convencional conforme as dimensões apresentadas na Figura 3.1 e Figura 3.2.

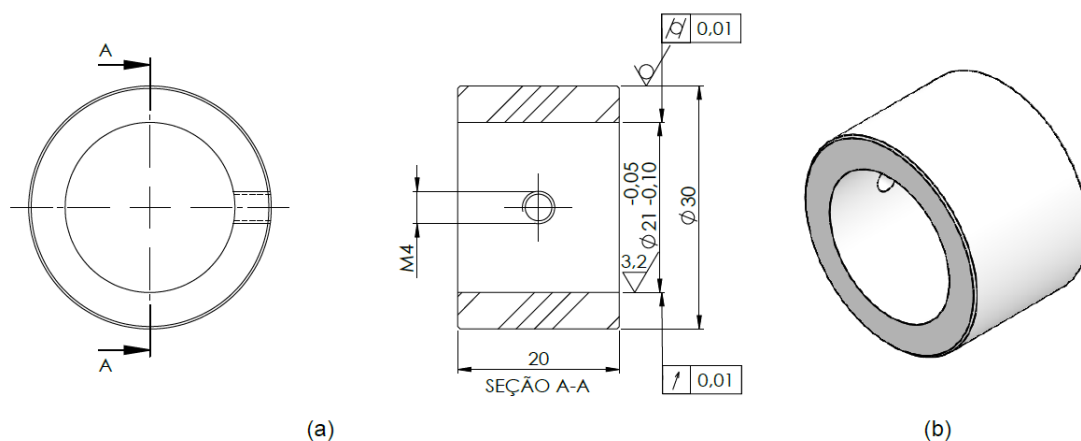


Figura 3.1 – Dimensões do corpo de PEEK: (a) Detalhes de fabricação; (b) Vista em perspectiva.

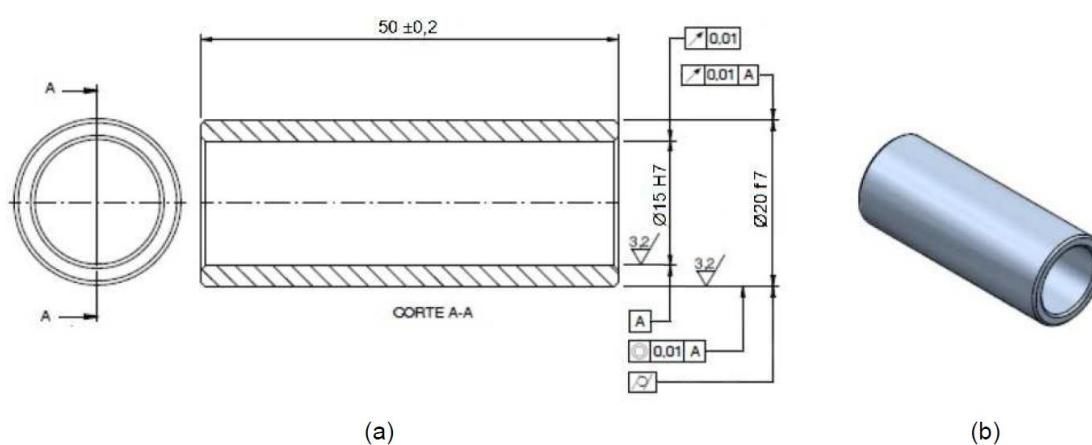


Figura 3.2 – Dimensões do contra corpo de aço inoxidável AISI 304L: (a) Detalhes de fabricação; (b) vista em perspectiva.

Fonte: Vale (2014)

Uma limpeza antes do ensaio foi realizada nos corpos de prova e nos contra corpos. No PEEK, limpou-se a parte interna utilizando álcool isopropílico, seguido de pelo menos 24h de permanência em uma dissecadora. Os contra corpos de aço foram limpos utilizando e hexano. Após o ensaio, os corpos de prova tiveram a pista de desgaste cortadas, conforme mostra a Figura 3.3, para realização de caracterizações topográficas e de alterações físico-químicas, visto que desta maneira a área de interesse fica mais acessível e de fácil manuseio.



Figura 3.3 – Corpo de prova de PEEK seccionado para caracterizações após ensaio.

### 3.2 TRIBÔMETRO

Os ensaios tribológicos foram realizados em um tribômetro, do tipo mancal sobre eixo, desenvolvido no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR – Curitiba. Esta pode ser visualizada na Figura 3.4.

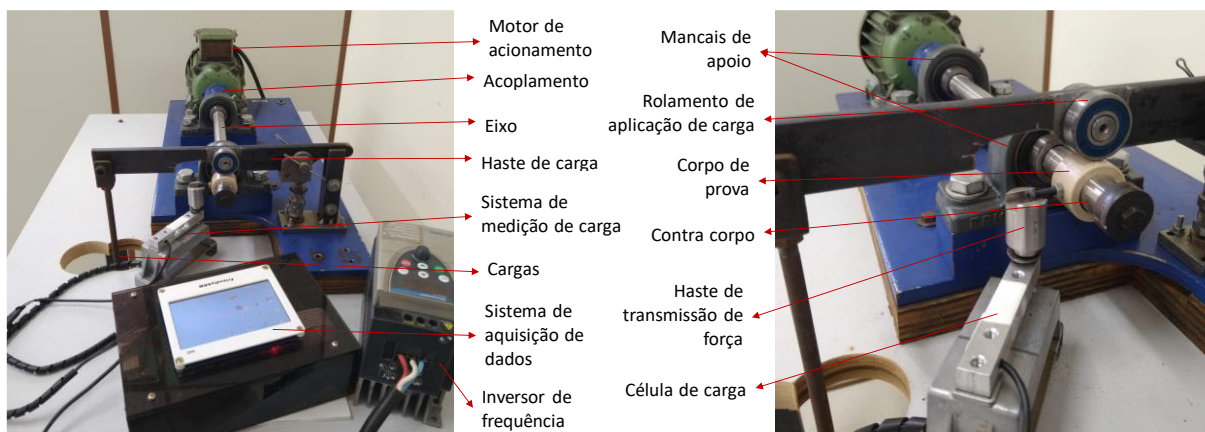


Figura 3.4 – Fotografias da máquina de atrito cinético tipo mancal sobre eixo: (a) visão geral; (b) detalhe do sistema de medição da força transmitida à célula de carga.

A MAC (máquina de atrito cinético) é acionada por um motor elétrico que tem rotação controlada por um inversor de frequência. Este motor aciona um eixo que está apoiado em dois mancais, e na extremidade do eixo é acoplado o contra corpo de aço inoxidável. A Figura 3.5 apresenta uma vista explodida desta montagem (VALE, 2014).

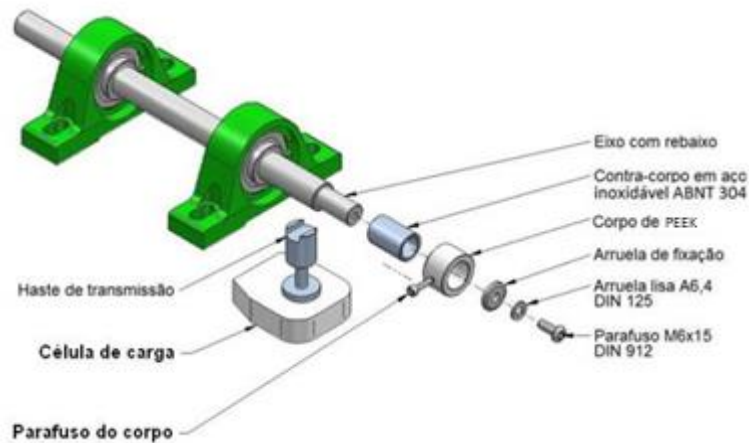


Figura 3.5 – Vista explodida da montagem do corpo e contra corpo na MAC.

Fonte: Adaptado de Vale (2014)

### 3.2.1 Modelo de atrito cinético para as condições geométricas da MAC

Vale (2014) desenvolveu a Equação (9) que permite o cálculo do coeficiente de atrito cinético entre os pares que serão ensaiados na MAC.

$$\mu = f(m_B, m_C) = \frac{\frac{1}{R_2} (L_B m_B)}{\frac{L_C}{L_W} m_C + c_{mh} - m_B} \quad (9)$$

Onde,  $c_{mh}$  é a força atribuída à massa do conjunto da haste de carga medido no ponto de aplicação da carga normal no corpo em gramas;  $L_B$  é a distância do centro do corpo até a célula de carga em metros;  $L_C$  é a distância do centro de giro da haste de carga até o ponto da aplicação da carga em milímetros;  $L_W$  é a distância do centro de giro da haste de carga até o ponto de aplicação da carga normal no corpo, em milímetros;  $m_C$  é a massa das cargas acrescentadas à MAC, em gramas; e  $m_B$  é a força transmitida pelo parafuso do corpo à haste de transmissão de força e, medida na célula de carga, em gramas.

Pela equação, nota-se que o coeficiente de atrito cinético é função apenas do valor de massa acrescentada à MAC,  $m_B$ , e da força medida na célula de carga,  $m_C$ , visto que os outros valores são constantes. A Figura 3.6 apresenta diagramas de corpo livre do sistema.



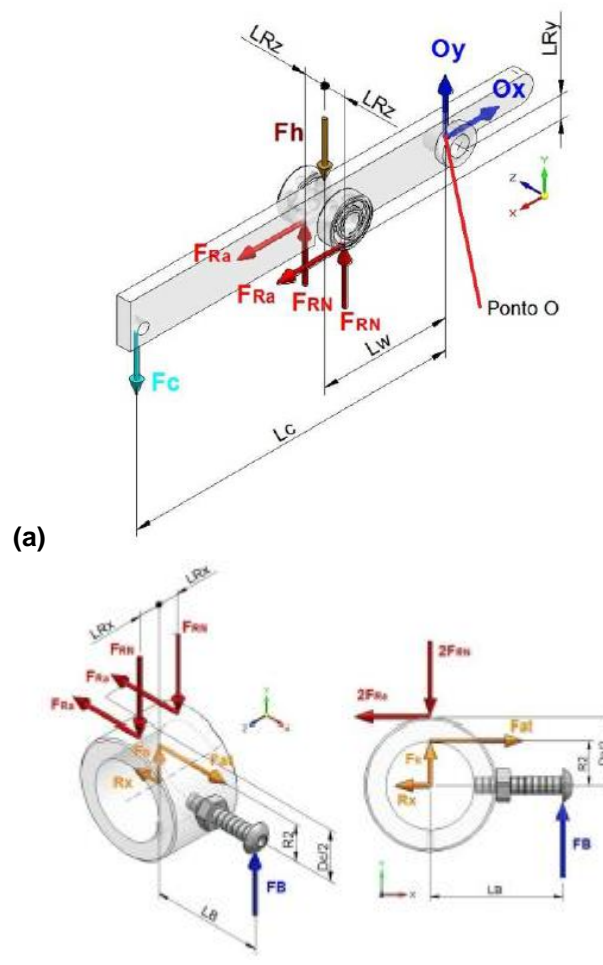


Figura 3.6 – Diagramas de corpo livre: (a) da haste de carga; (b) do corpo de prova.

Fonte: Vale (2014)

onde,  $F_h$  é a Força proveniente da massa da haste de carga considerada no ponto de aplicação da carga normal, em Newtons,  $F_c$  é a Força peso das cargas aplicadas no tirante da haste de carga, em Newtons,  $F_{Ra}$  a Força de atrito gerada pela tendência de movimento dos rolamentos, em Newtons,  $F_{RN}$  a Força normal de reação do corpo, em Newtons,  $L_w$  a Distância do centro de giro até o ponto de aplicação da carga normal no corpo, em milímetros,  $L_c$  a Distância do centro de giro até o ponto da aplicação das cargas, em milímetros,  $L_{Ry}$  a Distância da força de atrito causada pelo rolamento até o centro de giro, em milímetros,  $L_{Rz}$  a Distância do centro da barra até os rolamentos, em milímetros,  $O_x$  a Força de reação no ponto de articulação da haste de carga no eixo x, em Newtons,  $O_y$  a Força de reação no ponto de articulação da haste de carga no eixo y, em Newtons,  $F_B$  é a força de reação da célula de carga, em Newtons,  $F_{At}$  é a força de atrito gerada pela rotação do contra corpo, em Newtons, e  $F_N$  é o carregamento normal aplicado no corpo de prova, em Newtons.

### 3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO E PARÂMETROS

Os ensaios tiveram duração de 120 min, realizados em 4 condições de carregamento diferentes. Na Tabela 3.2 são apresentados alguns valores pertinentes ao ensaio.

**Tabela 3.2 – Planejamento dos ensaios.**

Parâmetros	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
Tempo [min]		120		
$m_c$ [g]	657,0	1533,3	2710,4	3707,9
$F_N$ [N]	35	56	82	108
$a$ [mm]	0,340	0,426	0,516	0,593
$P_{max}$ [MPa]	3,32	4,17	5,05	5,80
$P_{med}$ [MPa]	2,61	3,27	3,97	4,55
$PV_{max}$ [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]		2,55		
$PV_{médio}$ [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]		2,00		
$V$ [m/s]	0,77	0,61	0,50	0,44
$n$ [rpm]	731,34	583,33	481,20	419,30
$d$ [m]	5514,2	4398,2	3628,2	3161,4

O valor de  $PV_{médio}$ , que de acordo com Yamaguchi (1990), quantifica a severidade do contato, foi proposto a partir de ensaios teste que tinham por objetivo encontrar uma faixa de valores no qual o PEEK sofria desgaste. O valor da largura do contato  $a$  foi obtido pela equação (6), a partir do qual, foi possível calcular a  $P_{máx}$  e  $P_{méd}$  através das equações (2) e (3). Desta maneira, determinou-se o valor da velocidade através da equação (10).

$$PV_{médio} = P_{méd} \cdot V \quad (10)$$

Tendo o valor da velocidade, calculou-se a máxima condição PV imposta no contato através da equação (11) bem como a distância percorrida e a rotação necessária a partir da equação (12).

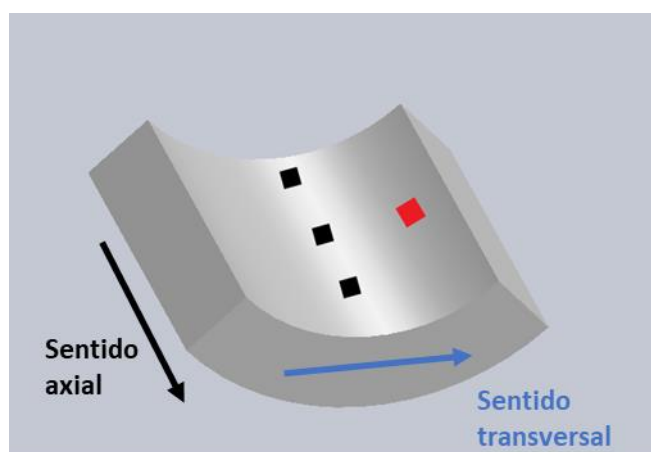
$$PV_{máx} = P_{máx} \cdot V \quad (11)$$

$$V = 2\pi R_1 n_o \quad (12)$$

### 3.3.1 Caracterização topográfica

Foram realizadas análises de topografia em interferômetro de luz branca para medição 3D sem contato, modelo CCI Talysurf Lite, fabricado pela Taylor Hobson. Para cada área de amostragem, 1024x1024 pontos medidos e resolução óptica entre 0,4 e 0,6  $\mu\text{m}$  (TAYLOR HOBSON, 2013).

Foi selecionado 1 corpo de prova de cada condição, de maneira que o corpo selecionado era uma amostra representativa da condição. A Figura 3.7, representa esquematicamente as áreas observadas no interferômetro. Em cada corpo, foram realizadas 3 medições na pista de desgaste, representados pelos pontos pretos. Também se obteve resultados de uma área de amostragem fora da pista de desgaste (ponto vermelho), caracterizando o corpo antes do ensaio de desgaste.



**Figura 3.7 – Corpos de prova de PEEK recobertos em ouro e fixados em suporte de alumínio para realização de análise por MEV.<sup>4</sup>**

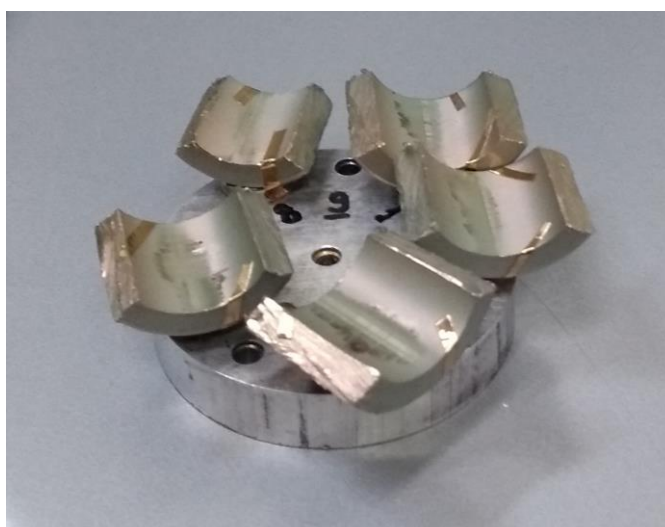
A partir desta análise, obteve-se para cada ponto: imagens em vista superior e 3D da topografia da superfície, perfil de rugosidade axial, distribuição de altura dos picos da superfície, os parâmetros de rugosidade  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_{ds}$ ,  $S_{sc}$  e  $S_{dq}$  e o perfil de rugosidade transversal. Ressalta-se que não foram aplicados filtros nas imagens da topografia da superfície nem nos perfis de rugosidade.

---

<sup>4</sup> Padronizou-se os sentidos indicados na figura para todas as análises do presente trabalho.

### 3.3.2 Microscopia eletrônica de varredura

As imagens da superfície obtidas por MEV foram realizadas na UTFPR – Câmpus Curitiba com equipamento da marca Zeiss, modelo EVO-MA15. Foram analisados 5 corpos de prova, sendo um em cada condição de ensaio e mais um na condição 4 submetido a um ensaio interrompido de duração de 15 min. Os corpos foram fixados em uma base de alumínio com fita adesiva de cobre. Após isso os corpos foram recobertos com ouro, obtendo-se uma camada de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ , para que houvesse boa condução elétrica na superfície do polímero. O recobrimento, com tempo de deposição de 30s, foi realizado em equipamento modelo Q150R ES, marca Quorum. A Figura 3.8 apresenta os 5 corpos de prova recobertos com ouro e posicionados na base de alumínio.



**Figura 3.8 – Corpos de prova de PEEK recobertos em ouro e fixados em suporte de alumínio para realização de análise por MEV.**

Também se realizou análise por MEV da superfície de um contra corpo de aço inoxidável utilizado na condição 4. Este, por ser metálico, não foi recoberto com ouro, foi realizado somente em uma amostra.

### 3.3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier é útil para identificação de grupos funcionais em compostos orgânicos (SILVERSTEIN e WEBSTER, 2000). Logo, é uma importante ferramenta tanto para caracterização do material quanto para verificação de possíveis alterações em sua composição química.

Realizaram-se FTIR em uma amostra de PEEK, ensaiada na condição 4. Uma camada da pista de desgaste foi removida utilizando estilete, preocupando-se com uma remoção superficial, para restringir a análise às alterações químicas apenas na pista de desgaste. De maneira semelhante, uma área fora da pista de desgaste foi selecionada para comparação entre superfície não ensaiada e superfície submetida ao ensaio de desgaste. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de infravermelho da marca Perkin Elmer, modelo Spectrum Two N FT-NIR.

### **3.3.4 Calorimetria Explanatória Diferencial (DSC)**

Uma análise por DSC foi realizada no corpo de PEEK em uma porção do corpo não desgastada e uma porção do corpo na pista de desgaste. O material foi removido com o auxílio de um estilete, buscando-se obter a camada mais superficial possível. Foi selecionado um corpo de prova ensaiado na condição 4 para verificação de sensibilidade do ensaio.

A análise ocorreu em calorímetro de varredura diferencial, marca Shimadzu, modelo DSC-60. O material polimérico foi aquecido até 450 °C a uma taxa de 20 °C/min com fluxo de 20 ml/min de N<sub>2</sub>.

### **3.3.5 Avaliação de alteração mássica**

Após usinados e limpos, os corpos de prova foram mantidos em dissecadora por pelo menos 24 h antes. Após esse período mínimo, os corpos foram pesados e armazenados em sacos plásticos sem vedação. Alguns corpos foram ensaiados logo após a pesagem enquanto outros ficaram armazenados nos sacos plásticos. Após os ensaios, os corpos eram guardados novamente nos sacos plásticos e posteriormente pesados. O desgaste mássico é medido pela diferença entre a massa antes do ensaio e a massa após o ensaio.

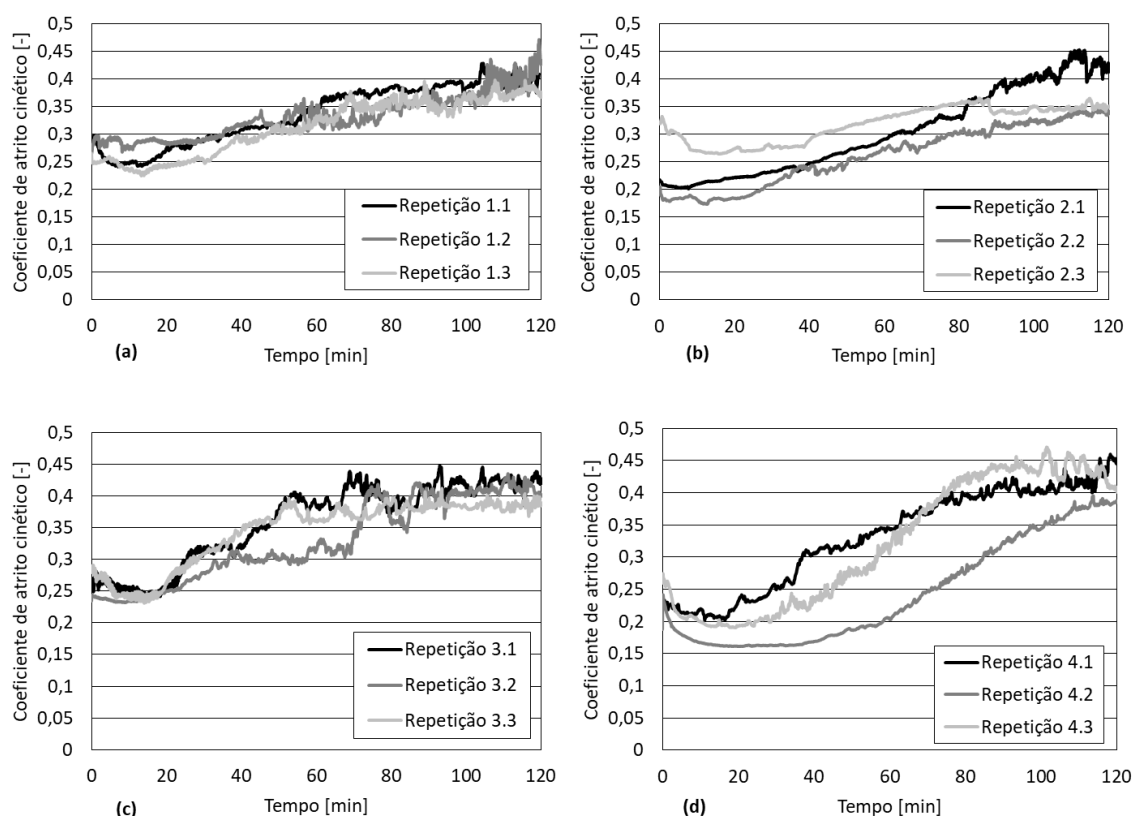
A balança utilizada é uma *Electronic Analytical Scale*, modelo A2204, com precisão de 4 casas decimais em gramas.

Alternativamente, foi realizado uma avaliação da área de desgaste por IDLB, utilizando o mesmo equipamento descrito na Seção 3.3.1. Entretanto, utilizou-se uma lente de magnificação de 5x para avaliação de uma área de 3,2 mm de lado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 COEFICIENTE DE ATRITO

Na Figura 4.1 são apresentados os valores de coeficiente de atrito cinético em função do tempo para o ensaio de desgaste, realizado conforme planejamento da Tabela 3.2. Ressalta-se que o ensaio foi do tipo mancal de deslizamento (de PEEK) sobre eixo (de aço Inoxidável AISI 304L), sem lubrificação, realizado em quatro condições de força normal e de velocidade de deslizamento, mas com condição PV constante.



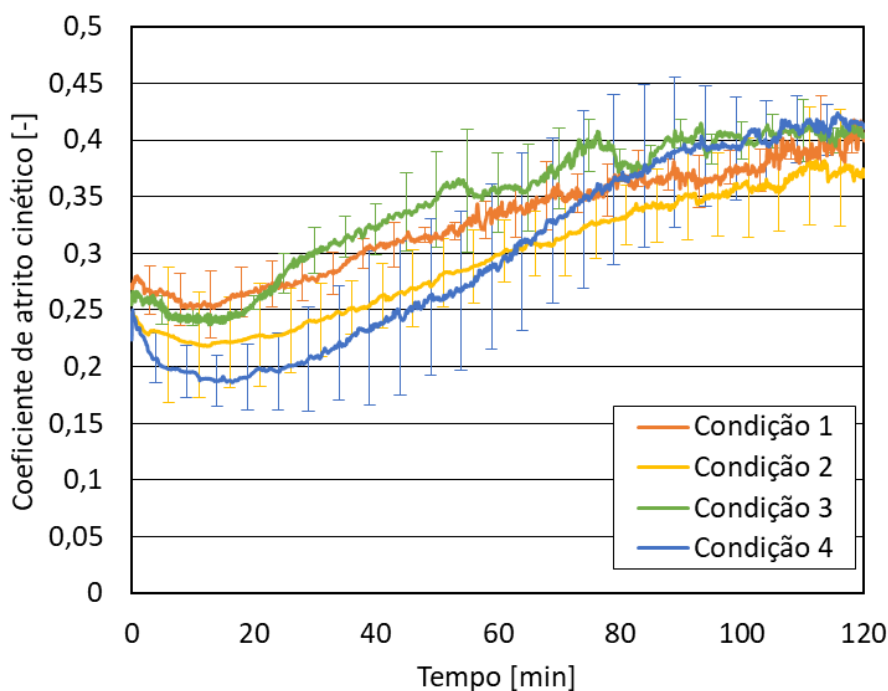
**Figura 4.1 – Coeficiente de atrito em função do tempo nas condições: (a) Condição 1:  $F_n = 35 \text{ N}$  e  $V = 0,77 \text{ m/s}$ ; (b) Condição 2:  $F_n = 56 \text{ N}$  e  $V = 0,61 \text{ m/s}$ ; (c) Condição 3:  $F_n = 82 \text{ N}$  e  $V = 0,50 \text{ m/s}$ ; (d) Condição 4:  $F_n = 108$  e  $V = 0,44 \text{ m/s}$ .**

Em termos gerais, observa-se que tanto as curvas da condição 1 como as da condição 3 apresentaram pouca variação entre repetições ao longo do ensaio, enquanto que as repetições das condições 2 e 4 apresentaram maior variação. Chama-se a atenção a outro modo de variação dos valores de coeficiente de atrito do

PEEK. Neste segundo modo, observa-se uma flutuação dos valores ao longo do ensaio, em todos os ensaios, a qual confere a impressão de “ruído” à forma da curva, característica também observada nos trabalhos de Zhang *et al.* (2008) – Figura 2.19 – e Wang *et al.* (2017) – Figura 2.25(a) – sendo ambos ensaios do tipo esfera sobre disco. Em contrapartida, quando comparado com os ensaios realizados por Vale (2014), nota-se que esta característica não é observada no PTFE, conforme visto na Figura 2.27, ainda que ambos ensaios tenham sido realizados na mesma bancada.

Buscando uma comparação entre os resultados de cada condição de ensaio, apresenta-se na Figura 4.2 o coeficiente de atrito médio em função do tempo. A forma das curvas apresenta semelhança com o comportamento típico do coeficiente de atrito em função do tempo do PTFE, no ensaio realizado por Vale (2014), apresentado na Figura 2.28. O amaciamento, caracterizado por uma queda do coeficiente de atrito, ocorre nos primeiros 15 min, seguido pela transição, que é caracterizada pela elevação do coeficiente de atrito. Esta, finda-se em aproximadamente 110 min de ensaio, dando início ao período de estabilização, onde o coeficiente de atrito do sistema em estudo atinge valores próximos a 0,4 em todas as condições. Este valor está consoante com a proposta de que o PEEK possui valores de coeficiente de atrito maiores que outros polímeros (BRISCOE e SINHA, 2008). Quando comparada à Figura 2.19 (ZHANG *et al.*, 2008), observa-se que a forma da curva é resultante do tipo do ensaio - atrito entre aço e polímero no modelo eixo sobre mancal sem lubrificação - já que foi o mesmo ensaio realizado com PTFE, mas que características da curva como valores de coeficiente de atrito e sua variação estão relacionados ao PEEK.

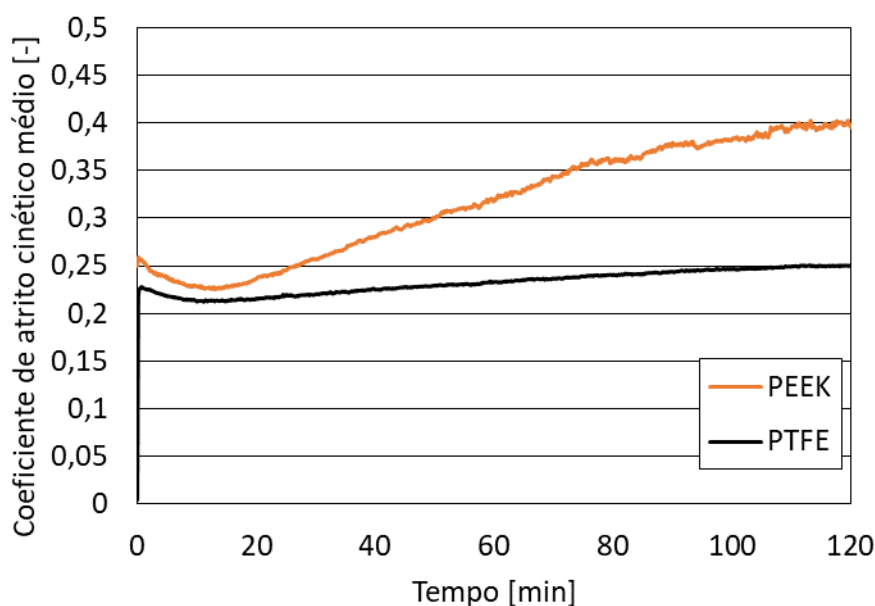
Também, observa-se que a condição 1 apresentou a menor variação do coeficiente de atrito durante o ensaio, enquanto que a condição 4 a maior variação, indicando um aumento da amplitude de coeficiente de atrito durante o ensaio com o aumento da força normal. Outro fato interessante é que o comportamento médio inicial em todas as condições tem valores muito próximo de 0,25, e que valores do coeficiente de atrito no período de estabilização são próximos de 0,4. Os valores encontrados são coerentes com valores presentes na literatura, mesmo que em um ensaio do tipo esfera sobre disco (Zhang *et al.*, 2008).



**Figura 4.2 - Comportamento médio do coeficiente de atrito em função do tempo em cada condição de ensaio.**

Finalizando a comparação entre o comportamento do PEEK e do PTFE, gerou-se o gráfico com dados de coeficiente de atrito médio entre todas as condições de ensaio do PTFE e do PEEK, apresentado na Figura 4.3. Os períodos de amaciamento, transição e estabilização do PEEK ficam evidentes. Curiosamente, os dois materiais apresentam coeficiente de atrito médio próximos ao final do amaciamento, porém, o PEEK atinge valores de coeficiente de atrito mais elevados no período de estabilização. Chama-se a atenção aos valores de tempo nos quais ocorrem a finalização do amaciamento e da transição. Estes são muito próximos entre o PEEK e o PTFE, ainda que a condição PV de ensaio do PEEK tenha sido aproximadamente 4 vezes maior que a do PTFE.





**Figura 4.3 – Coeficiente de atrito médio em função do tempo dos ensaios de PEEK e PTFE.**

O coeficiente de atrito médio em cada uma das condições é apresentado em função da força na Figura 4.4. A análise desta relação é de extrema relevância, pois, em estudos das leis do atrito para polímeros rígidos e vítreos, não há um consenso sobre a relação de coeficiente de atrito nem de força de atrito com a carga, e também não há valores precisos do coeficiente de atrito (BARTENEV e LAVRENTEV, 1981).

A média do início do ensaio foi calculada a partir dos valores de coeficiente de atrito entre os minutos 1 e 2. A média do final do amaciamento corresponde aos valores entre os minutos 14 e 15, enquanto que a média dos valores ao final do ensaio correspondem aos valores de coeficiente de atrito dos últimos 10 minutos de ensaio. Nos gráficos, foram traçadas linhas de tendência, e suas equações características, bem como os valores de  $R^2$  respectivos também são apresentados na figura. Os gráficos evidenciam que o comportamento do coeficiente de atrito do PEEK não é representado pelo modelo de Archard (1957), visto que os expoentes das equações não se aproximam de -0,33, e mesmo ao final do período de amaciamento, onde o coeficiente mais se aproxima deste valor, a representatividade é baixa. Na Figura 4.4(c), o expoente da equação é positivo e próximo de 0, indicando que o COF é quase um valor constante neste período do ensaio. Para verificação desta hipótese realizou-se o teste t de Student para inferência estatística, e constatou-se, com 95% de confiança, que nos últimos 110 min de ensaio, todas as condições apresentavam coeficiente de atrito estatisticamente iguais, fato que não ocorre durante os períodos do amaciamento e da transição. Este comportamento pode ser explicado pela

avaliação topográfica dos corpos, abordada na Seção 4.2.2, que evidenciou uma dispersão mais elevada dos parâmetros de rugosidade na superfície antes do ensaio. Entretanto, no período de estabilização, quando parâmetros de rugosidade são menos dispersos, o coeficiente de atrito não sofre influência da força normal. Isto mostra que o coeficiente de atrito não é influenciado pela força normal como proposto por Archard (1957) durante o período da estabilização. Ressalta-se que o PEEK foi sintetizado primeiramente no início da década de 80 (Drake Plastics, 2019), mais de 20 anos após Archard ter proposto seu modelo de atrito de polímeros.

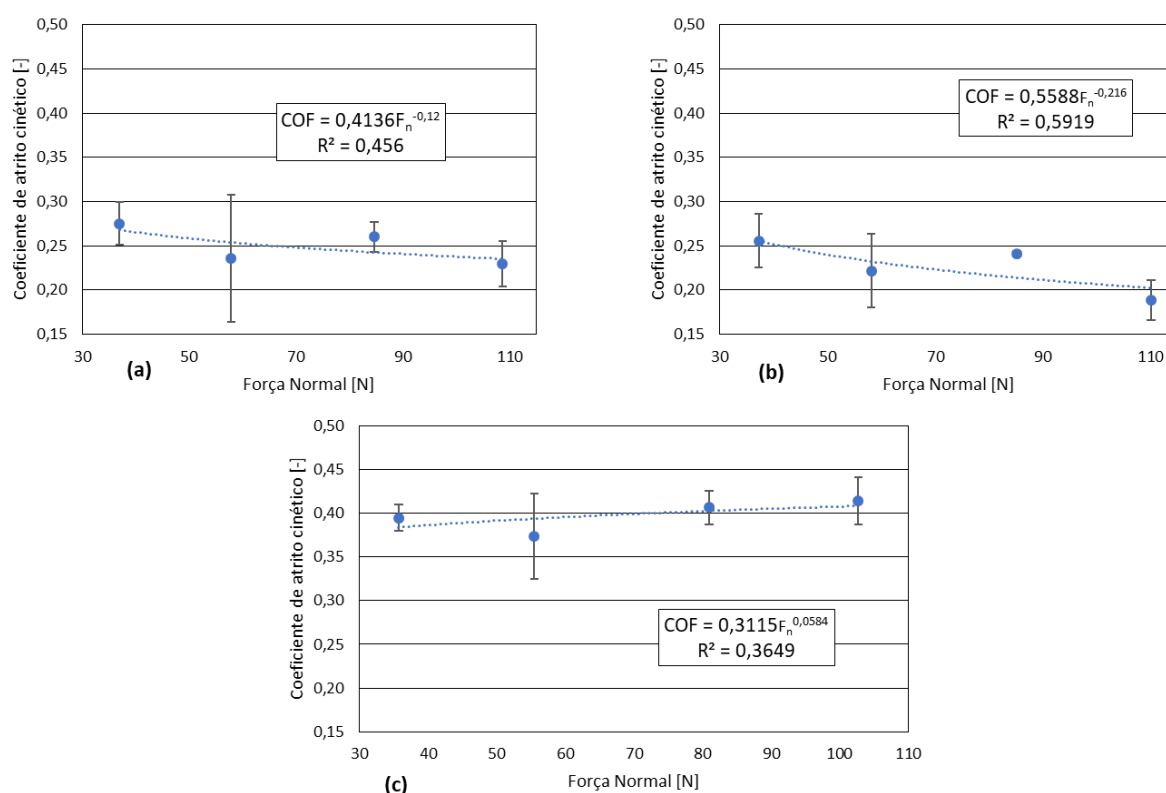


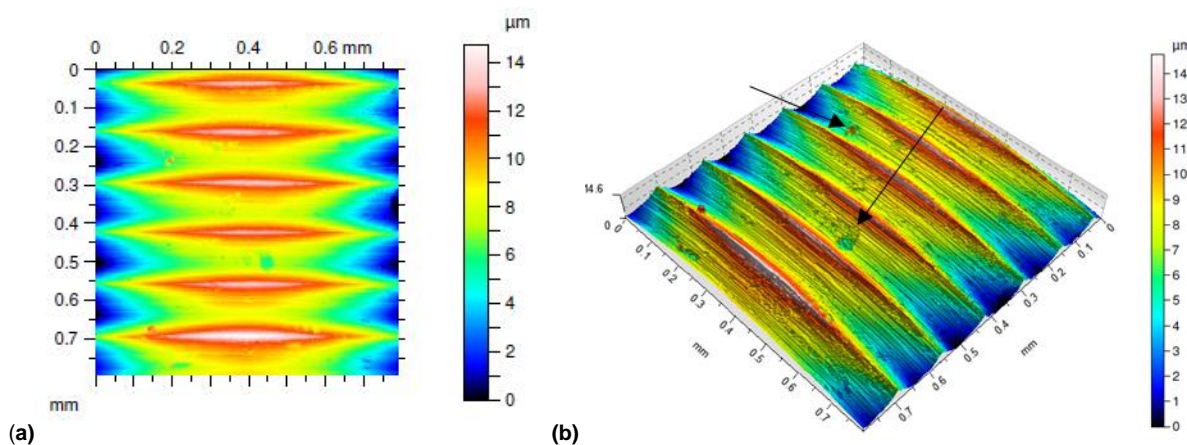
Figura 4.4 – Comparação entre coeficiente de atrito e força normal no: (a) início do ensaio (2 min); (b) final do amaciamento (14 min); (c) final do ensaio (110 min).

## 4.2 AVALIAÇÃO TOPOGRÁFICA

### 4.2.1 Aço Inoxidável AISI 304L

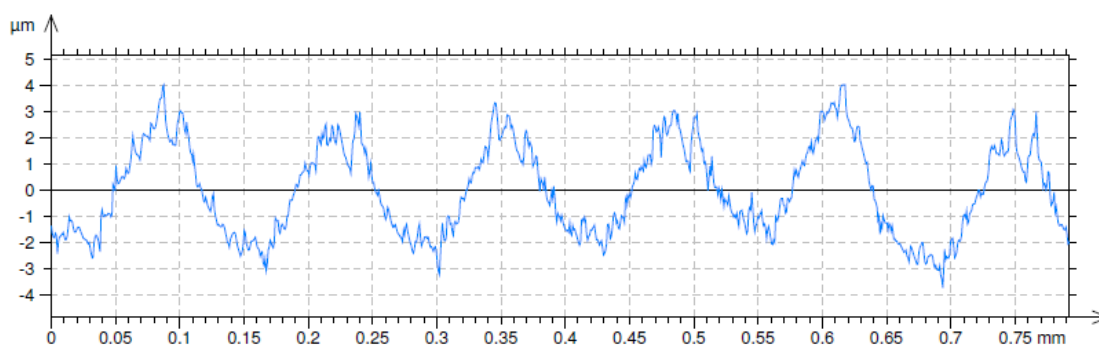
A topografia típica do contra corpo de aço inoxidável, obtida por IDLB, é apresentada na Figura 4.5. Nestas imagens, em vista superior e em 3D, é possível

visualizar uma ondulação característica do processo de usinagem. Ademais, é possível observar pequenas imperfeições na superfície, indicadas por setas pretas.



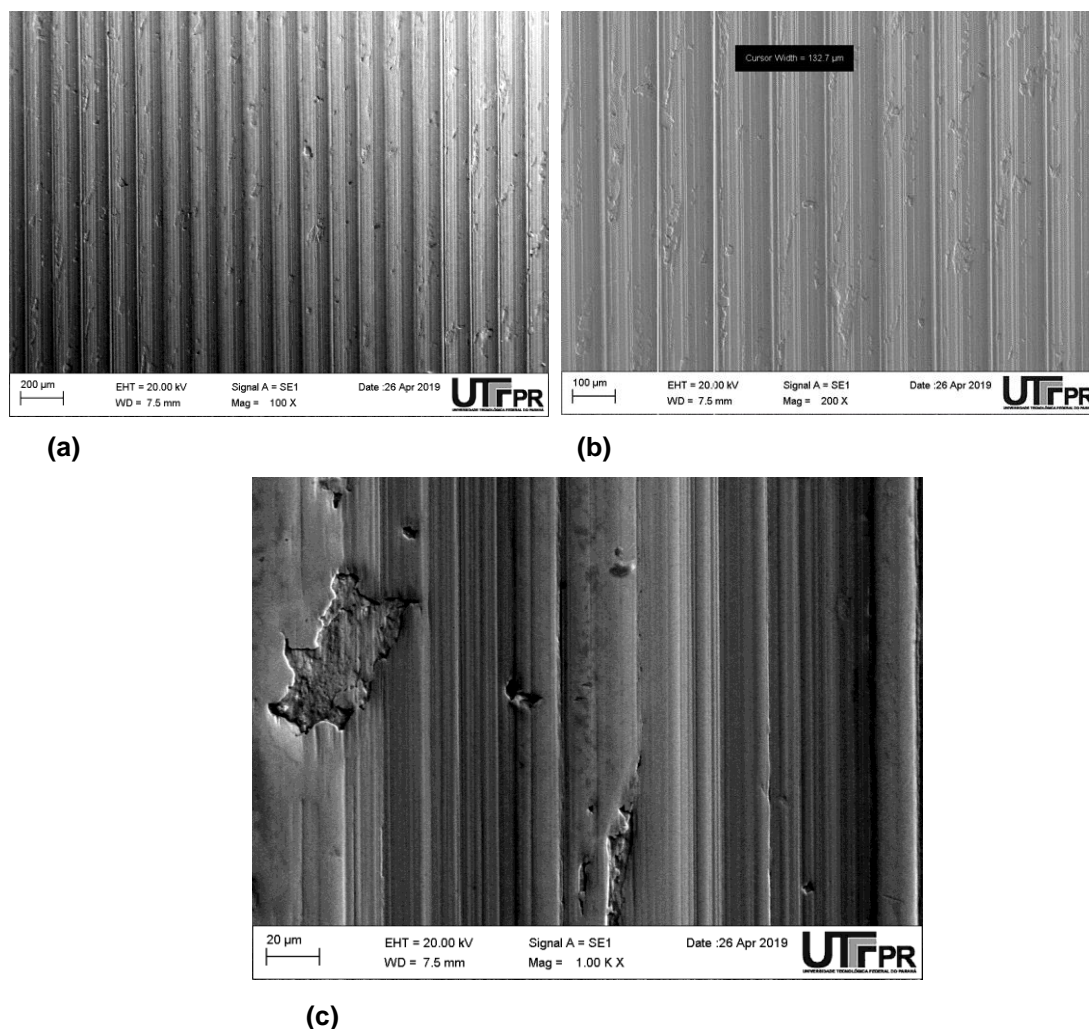
**Figura 4.5 – Topografia típica do aço inoxidável, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste: (a) em vista superior; (b) em 3D.**

O perfil de rugosidade típico do contra corpo, antes do ensaio de desgaste, em seu sentido axial é apresentado na Figura 4.6. Ressalta-se que a escala do eixo vertical difere do eixo horizontal. Pela figura, é possível observar que a ondulação presente na superfície do material, tem caráter periódico, com distância entre picos de aproximadamente 0,13 mm. Esta distância está diretamente relacionada com a velocidade de avanço utilizada no processo de usinagem.



**Figura 4.6 – Perfil de rugosidade axial típico do aço inoxidável, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste.**

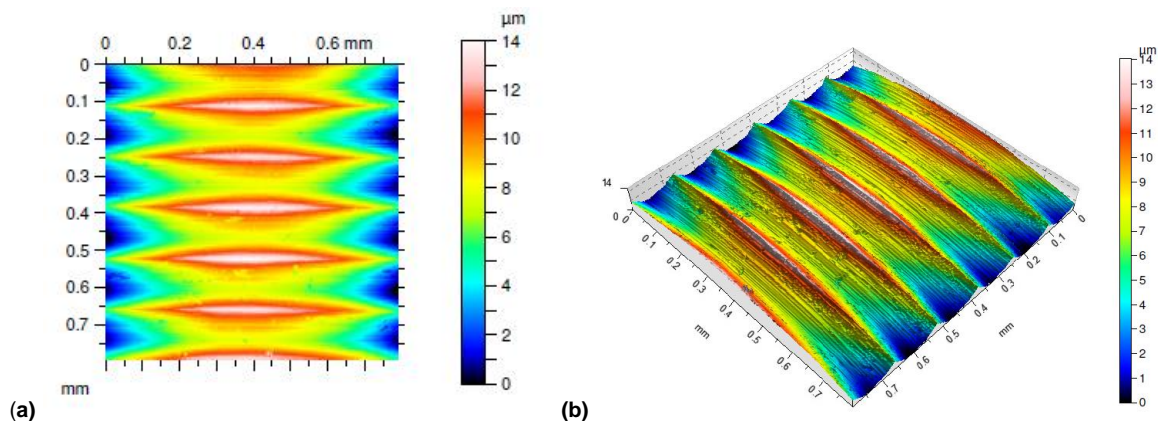
Imagens da superfície do contra corpo de aço inoxidável antes do ensaio de desgaste, obtidas por MEV, são apresentadas na Figura 4.7, com diferentes magnificações.



**Figura 4.7 – Imagens obtidas por MEV da superfície do aço inoxidável: (a) antes do ensaio; (b) magnificação de 200x; (c) magnificação de 1000x.**

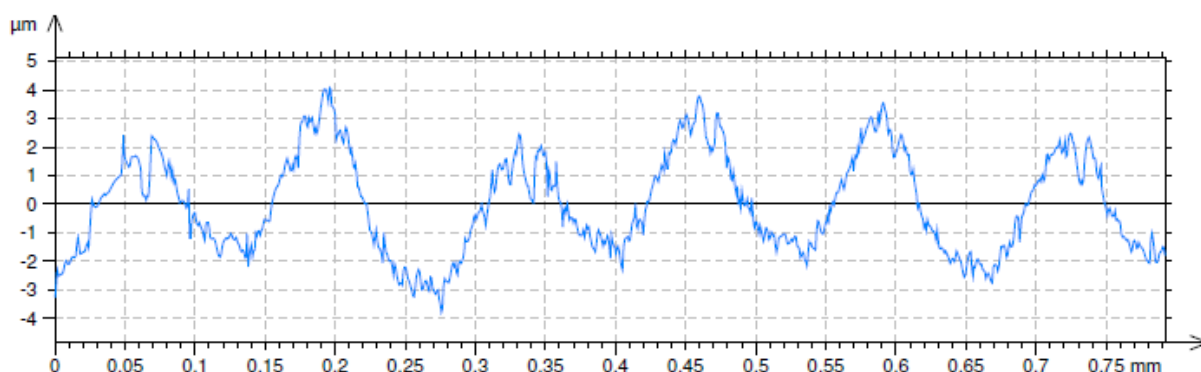
Imperfeições da superfície, na ordem de micrometros, podem ser melhor observadas na Figura 4.7(c), enquanto que o carácter periódico da superfície é melhor observado na Figura 4.7(a) e na Figura 4.7(b). Nesta última, através de uma ferramenta de medição disponível no software do microscópio eletrônico de varredura, observou-se que a distância entre as linhas brancas é de 0,133 mm, sendo coerente com o valor observado na Figura 4.6.

A Figura 4.8 apresenta imagem em vista superior e em 3D, obtidas por IDLB da topografia típica do contra corpo de aço inoxidável após ensaio de desgaste. Nota-se que o perfil ondulado se manteve, assim como as imperfeições da superfície do material.



**Figura 4.8 – Topografia típica do aço inoxidável, obtidas por IDLB, após ensaio de desgaste na condição 4: (a) em vista superior; (b) em 3D.**

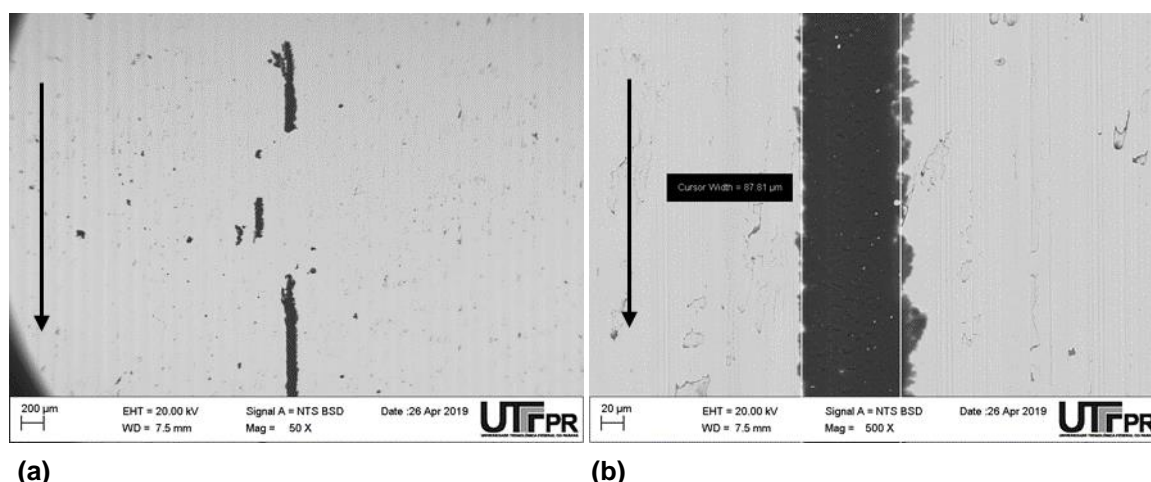
A Figura 4.9 apresenta o perfil de rugosidade axial do contra corpo após ensaio de desgaste na condição 4. Observa-se que, apesar de ser a condição considerada mais severa, a periodicidade entre os picos manteve-se com distância aproximada de 0,13 mm. Indicando que o desgaste do contra corpo não foi suficiente para serem observadas alterações consideráveis na superfície.



**Figura 4.9 – Perfil de rugosidade axial típico do aço inoxidável, obtido por IDLB, após ensaio de desgaste na condição 4.**

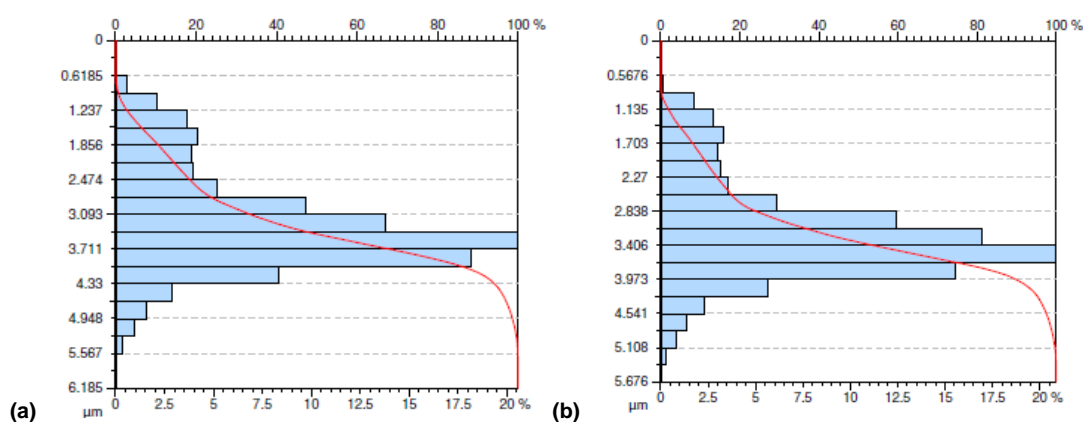
De maneira geral, observou-se pouco material polimérico aderido à superfície do contra corpo. A Figura 4.10 apresenta imagens obtidas por MEV da superfície do aço inoxidável após ensaio de desgaste na condição 4, onde é possível observar PEEK (mais escuro) aderido à superfície de aço inoxidável (mais claro). As stas pretas indicam a direção de deslizamento. Observa-se na Figura 4.10(b) que a o comprimento da faixa aderida é de aproximadamente 0,087 mm. Esta medida é maior que a metade da distância entre picos da superfície do aço inoxidável, indicando que este material possivelmente se depositou em um sulco de usinagem. Ressalta-se

mais uma vez que este foi um fenômeno isolado, encontrado apenas numa porção do contra corpo, não se repetindo ao longo da área de desgaste.



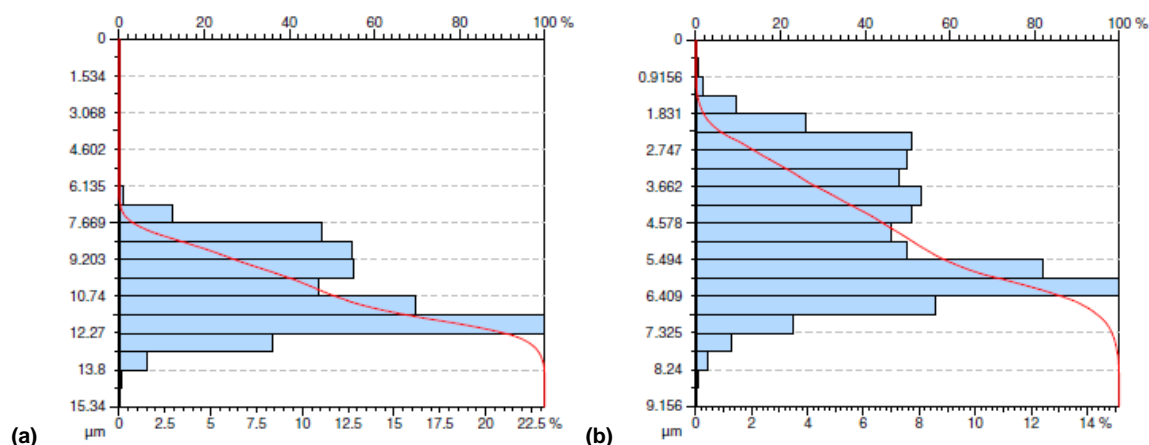
**Figura 4.10 – Imagem obtida por MEV: (a) PEEK (mais escuro) aderido ao contra corpo (mais claro) ensaiado na condição 4; (b) idem.**

A Figura 4.11 apresenta a distribuição da altura dos picos na superfície do aço antes e após o ensaio de desgaste na condição 3.



**Figura 4.11 – Distribuição da altura dos picos na superfície do aço inoxidável (a) antes e (b) após ensaio na condição 3.**

Escolheu-se pela condição 3 pois é representativa quanto aos resultados das superfícies das condições 1 e 2, de maneira que é observado pouca mudança na distribuição das alturas dos picos. Entretanto, na condição 4, apresentada na Figura 4.12 observa-se uma tendência de diminuição da altura dos picos.



**Figura 4.12 – Distribuição da altura dos picos na superfície do aço inoxidável (a) antes e (b) após ensaio na condição 4.**

Isto pode ser explicado por uma casualidade ao analisar os parâmetros de rugosidade, apresentados na Tabela 4.1. Estes não corroboram a hipótese de diminuição das alturas dos picos, ademais, observa-se em geral que os ensaios em todas as condições apresentaram pouca alteração nos parâmetros de rugosidade relacionados à amplitude ( $S_a$  e  $S_q$ ).

**Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros de rugosidade para o aço inoxidável nas 4 condições, antes e após ensaio.**

Parâmetro	-	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Média
<b><math>S_q</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	Antes	1,50	1,50	0,88	1,57	$1,36 \pm 0,32$
	Após	1,51	1,56	0,81	1,54	$1,35 \pm 0,37$
<b><math>S_a</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	Antes	1,31	1,23	0,68	1,37	$1,15 \pm 0,31$
	Após	1,33	1,29	0,61	1,34	$1,14 \pm 0,36$
<b><math>S_{ds}</math> [<math>10^3/\text{mm}^2</math>]</b>	Antes	57,4	58,2	54,2	55,7	$56,4 \pm 1,8$
	Após	57,2	58,4	55,6	55,9	$56,8 \pm 1,3$
<b><math>S_{sc}</math> [1/mm]</b>	Antes	402	400	416	463	$420 \pm 29$
	Após	394	397	325	400	$379 \pm 36$
<b><math>S_{dq}</math> [-]</b>	Antes	0,324	0,286	0,327	0,335	$0,303 \pm 0,031$
	Após	0,307	0,287	0,242	0,309	$0,286 \pm 0,031$

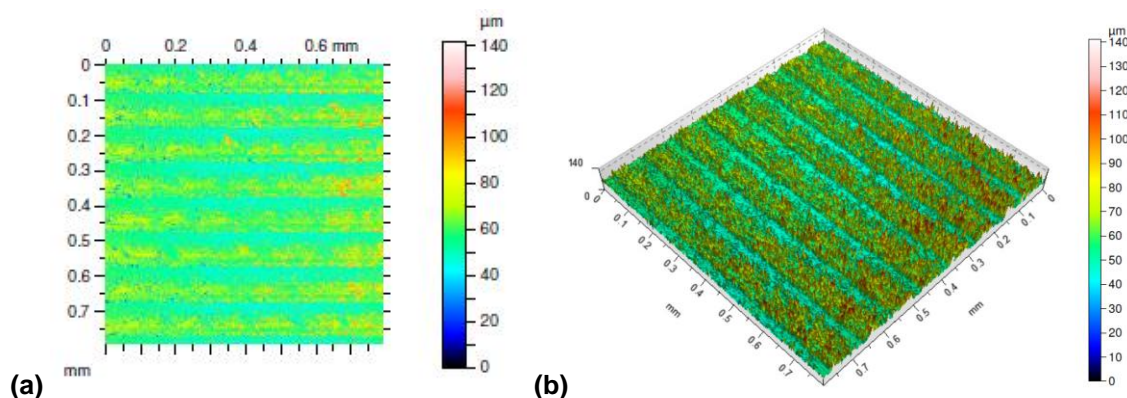
Além de não apresentar alterações nos parâmetros  $S_q$  e  $S_a$ , que são parâmetros de altura, a quantidade de picos por  $\text{mm}^2$ , representada pelo parâmetro  $S_{ds}$ , manteve-se praticamente inalterada entre condições antes e após ensaios. Nota-se uma pequena queda no parâmetro  $S_{sc}$ , referênte a curvatura dos picos, indicando um aumento no raio no topo dos picos, sendo que isso está associado a um leve

desgaste. Também observa-se pequena queda no parâmetro  $S_dq$ , que traz informações sobre a inclinação na superfície.

Dessa maneira, com a análise apresentada, concluí-se que houve leve desgaste do contra corpo, melhor observado no aumento do raio dos picos, indicando que o desgaste se restringiu ao topo destes.

#### 4.2.2 PEEK

A Figura 4.13 apresenta topografias do PEEK, obtidas por IDLB antes do ensaio de desgaste. O acabamento das superfícies foi gerado pelo processo de usinagem, e é interessante comparar com o aço inoxidável e com o PTFE antes do ensaio de desgaste, realizado por Vale (2014), apresentado na Figura 2.31(c).

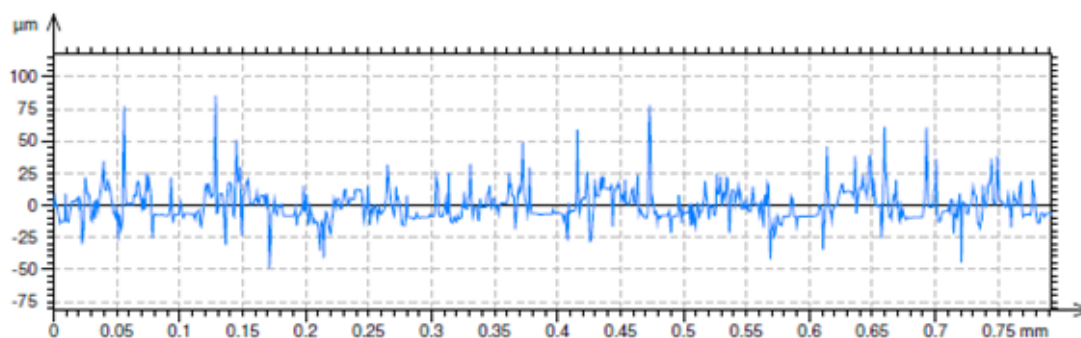


**Figura 4.13 – Topografia típica do PEEK antes do ensaio, obtida por IDLB, em: (a) vista superior; (b) 3D.**

Ainda que os 3 materiais tenham sido usinados, nota-se que a superfície do PEEK manteve um padrão de textura melhor que a superfície do PTFE, mas não tanto quanto a superfície do aço inoxidável. Isto pode estar relacionado com o módulo de elasticidade do material, sendo que o PEEK possui 3,7 GPa, conforme apresentado Tabela 3.1, e o PTFE, 1,4 GPa (CALLISTER, 2012).

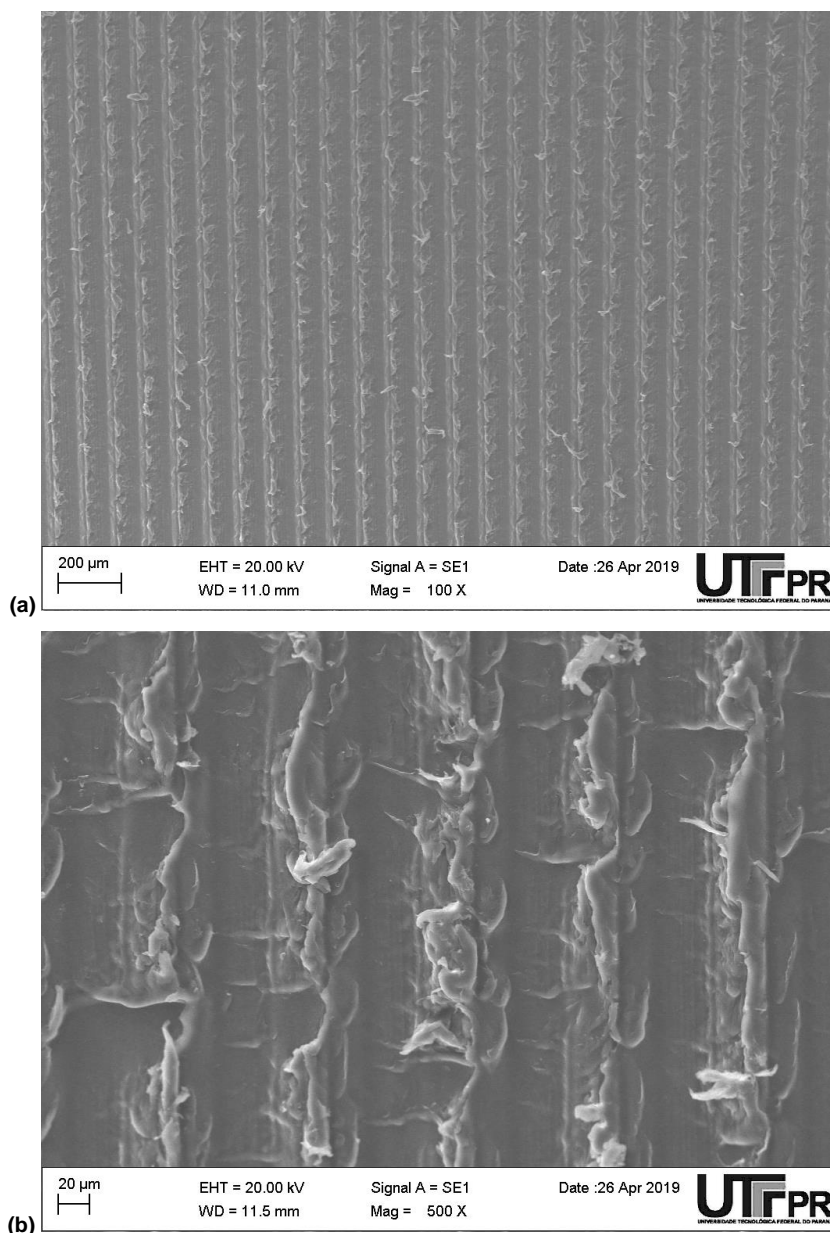
Apresenta-se um perfil de rugosidade típico, no sentido axial da amostra, na Figura 4.14. Mesmo que o padrão de textura seja observável na Figura 4.13, não é possível determinar, com confiança, uma distância periódica entre picos pela Figura 4.14.





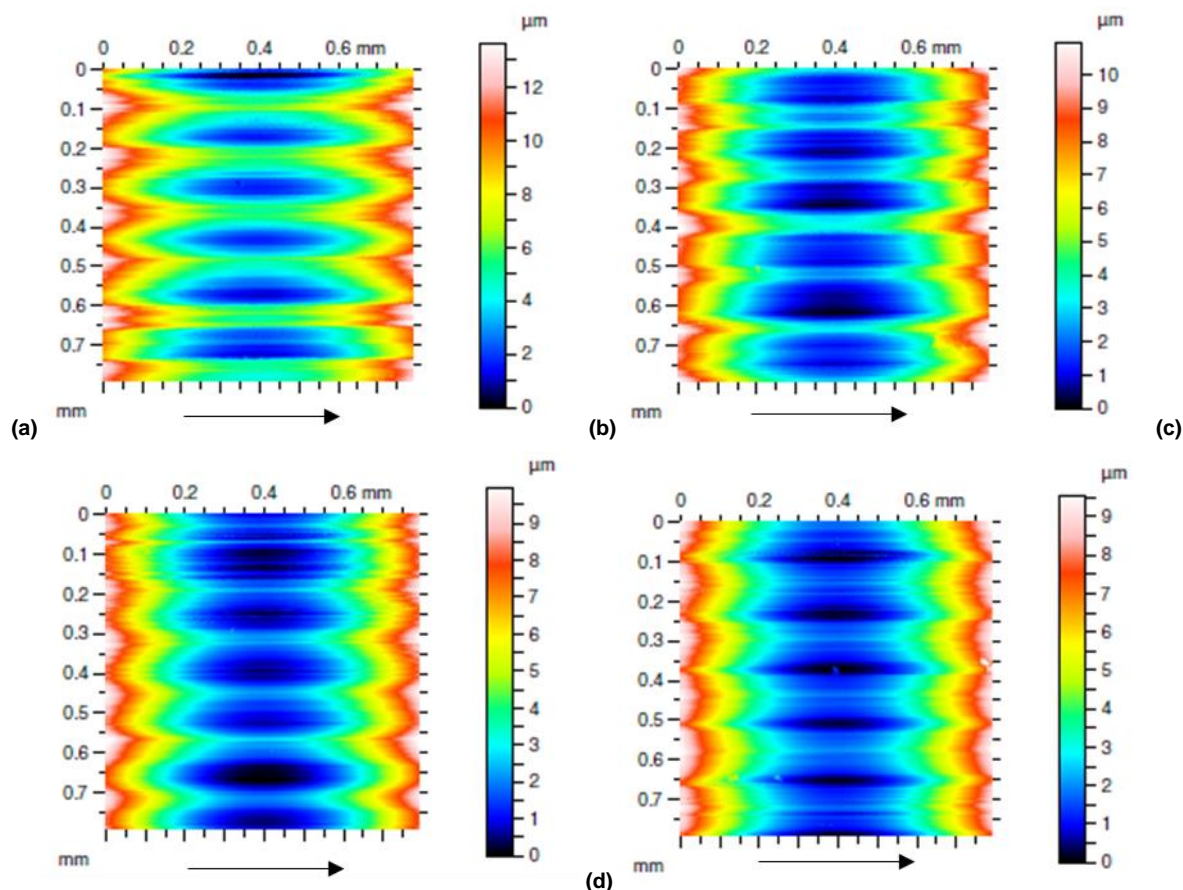
**Figura 4.14 – Perfil de rugosidade axial típico do PEEK, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste.**

A Figura 4.15 apresenta imagens obtidas por MEV, na superfície do corpo de prova antes do ensaio de desgaste. Mais uma vez, nota-se o padrão de textura originado do processo de usinagem. Além disso, na Figura 4.15(b), que apresenta uma imagem com maior magnificação, nota-se que o processo de usinagem gerou um perfil topográfico com acabamento pior do que o do aço inoxidável. Isto é devido às características mecânicas do material, onde, materiais com menor resistência mecânica e maior ductibilidade tem como resultado superfícies com pior acabamento (STEMMER, 2001). Conforme abordado na Seção 2.2.4, o mecanismo de desgaste que ocorre no processo de usinagem é o de sulcamento.



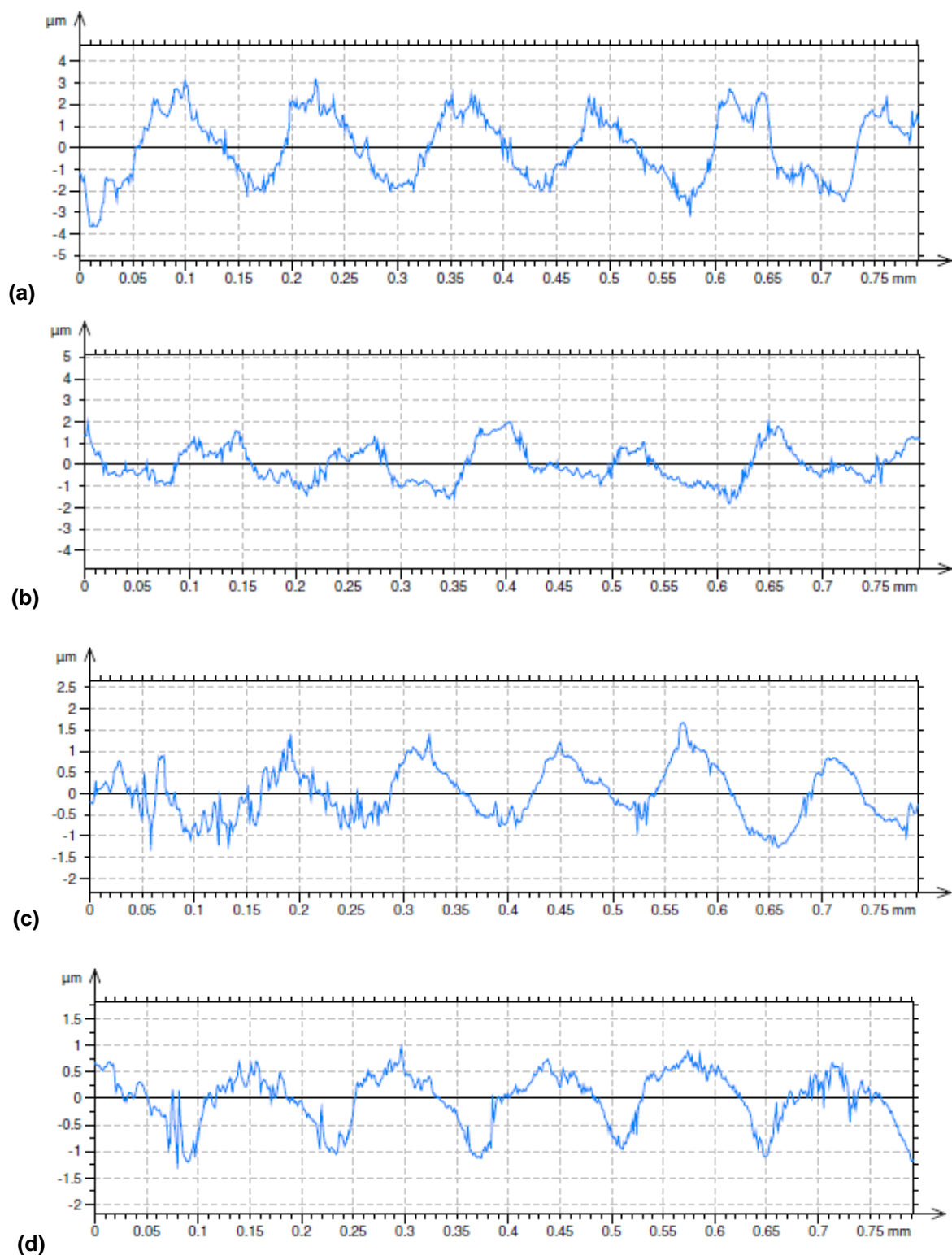
**Figura 4.15 – Imagens obtidas por MEV da superfície do típica do PEEK: (a) antes do ensaio; (b) idem.**

A Figura 4.16 apresenta imagens da superfície do PEEK em vista superior, obtidas por IDLB, após o ensaio de desgaste. A direção do deslizamento está indicada pelas setas pretas. O padrão de textura, proveniente do processo de usinagem, apresentado na Figura 4.13 é paralelo ao sentido de deslizamento. Apesar disso, nota-se que o desgaste proveniente do ensaio foi suficiente para que a superfície perdesse o padrão de textura apresentado na condição não ensaiada. O padrão observado após o ensaio assemelha-se com o padrão de textura observado no aço inoxidável (Figura 4.5). Logo, hipotetiza-se que o perfil observado na Figura 4.16 deverá ter periodicidade entre vales de 0,13 mm, aproximadamente, que é a mesma medida da distância entre picos do aço inoxidável.



**Figura 4.16 – Superfície do PEEK em vista superior, obtida por IDLB, após do ensaio: (a) na condição 1; (b) na condição 2; (c) na condição 3; (d) na condição 4.**

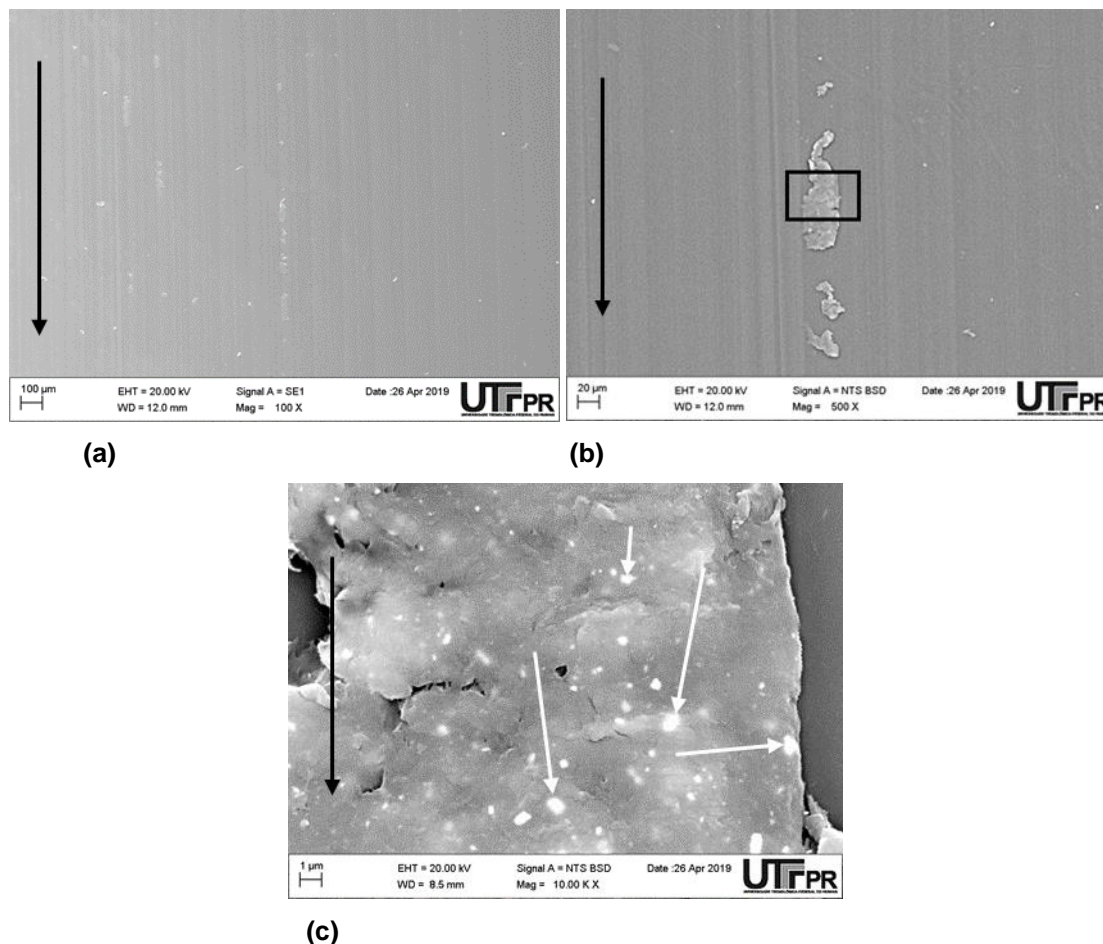
O perfil de rugosidade, no sentido axial das amostras, após ensaios em todas as condições é apresentado na Figura 4.17. Quando comparado à Figura 4.14, fica evidente a alteração na topografia do corpo de prova. Em geral, observa-se em todas as condições uma distância periódica entre vales de aproximadamente 0,13 mm, indicando que o perfil do contra corpo de aço inoxidável foi transferido para a superfície do PEEK. Além disso, chama-se a atenção para amplitude dos picos. Nota-se que, da condição 1 para a condição 4, houve uma diminuição gradual na altura máxima da rugosidade.



**Figura 4.17 – Perfil de rugosidade axial do PEEK, obtido por IDLB, após ensaio de desgaste na: (a) condição 1; (b) condição 2; (c) condição 3; (d) condição 4.**

Imagens obtidas por MEV, de um corpo de prova ensaiado na condição 4, são apresentadas na Figura 4.18. As imagens (a), (b) e (c) foram obtidas na pista de

desgaste, enquanto que a figura (d), na transição entre área não desgastada e a pista de desgaste. A direção do deslizamento está indicada pelas setas pretas.



**Figura 4.18 – Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK após ensaio de desgaste na condição 4: (a) na pista de desgaste; (b) idem; (c) maior magnificação na partícula aderida.**

O perfil topográfico, originado pelo processo de usinagem, observado nas imagens da Figura 4.15 não é encontrado nas imagens da pista de desgaste (Figura 4.18 (a) e (b)), indicando que a superfície sofreu alteração na totalidade da área de contato entre corpo e contra corpo. Na Figura 4.18(b), identifica-se partículas de desgaste de PEEK que foram amassadas contra a superfície. A Figura 4.18(c) apresenta uma imagem com maior magnificação da área indicada na Figura 4.18(b), utilizando um filtro diferente. Desta maneira, é possível observar pontos mais claros na partícula de desgaste de PEEK, sendo que alguns destes pontos estão destacados pelas setas brancas. Foi realizado uma análise EDX (espectroscopia de raios X por dispersão em energia) sobre os pontos e sobre a matriz de PEEK, e constatou-se que os pontos são partículas de aço inoxidável, transferidas do contra corpo para o corpo

de prova. As áreas analisadas são apresentadas na Figura 4.19, enquanto que os resultados das análises estão dispostos na Tabela 4.2.

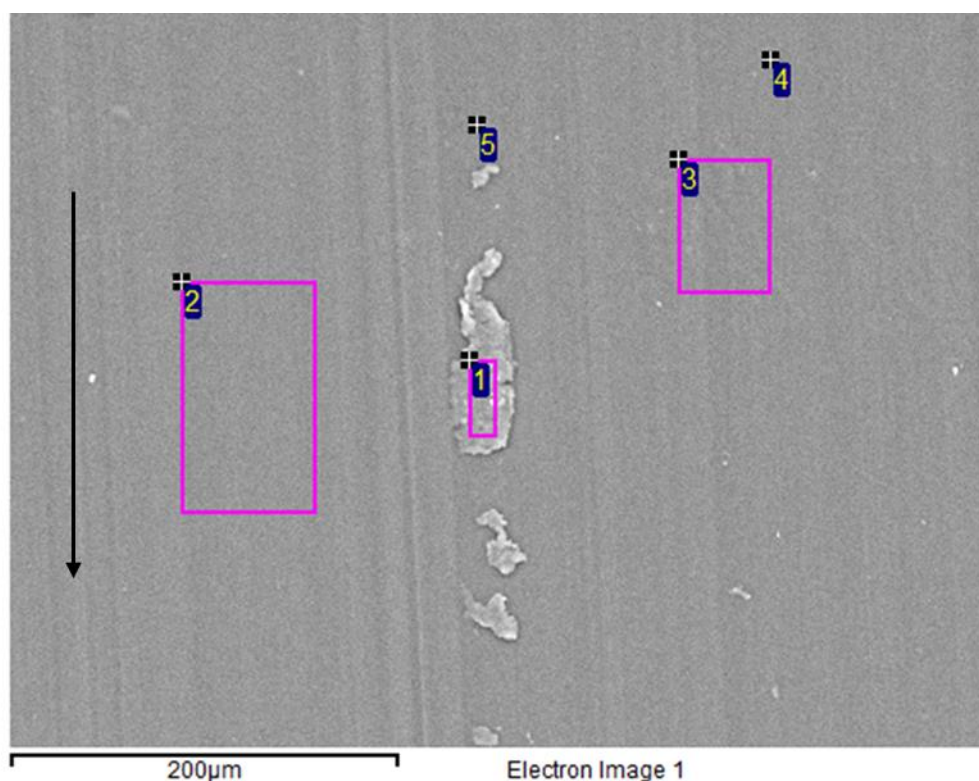


Figura 4.19 – Área da pista de desgaste analisada por EDX.

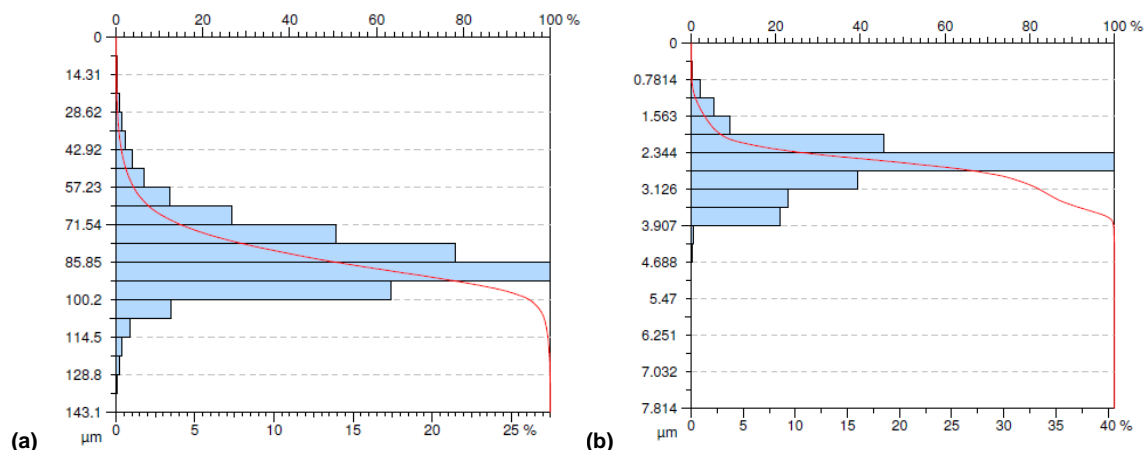
Tabela 4.2 – Análise de composição química semi-quantitativa, em % de massa, para superfície da pista de desgaste de corpo ensaiado na condição 4, obtida por EDX.

Área de análise	C	O	Si	Ca	Cr	Fe	Total
1	78.67	20.66		0.26	0.07	0.35	100.00
2	81.22	18.78					100.00
3	81.13	18.87					100.00
4	79.23	20.61	0.16				100.00
5	81.92	18.08					100.00

Conforme visto na seção 2.1.1, o PEEK é composto, por C, O e H, e a partir da análise EDX constatou-se que nas áreas 2, 3 e 5, apenas os elementos C e O foram detectados. Este tipo de análise não é sensível a elementos leves como o H, portanto, conclui-se que as áreas são compostas de PEEK puro, apesar da falta de sensibilidade do ensaio para um dos elementos do polímero. Os traços de Ca e Si indicados na área 1 e no ponto 4 respectivamente, são indicadores de impurezas. Já

a área 1, indica também a presença de elementos Fe e Cr, sendo estes característicos do aço inoxidável, conforme pode ser visto no anexo B.

A Figura 4.20 apresenta a distribuição das alturas dos picos na superfície do PEEK antes e após ensaio na condição 4.



**Figura 4.20 – Distribuição da altura dos picos na superfície do PEEK (a) antes e (b) após ensaio na condição 4.**

Para a análise da distribuição de altura dos picos, chama-se a atenção às escalas dos eixos verticais. Desta maneira, fica evidente que houve uma considerável redução na altura dos picos da superfície, causada pelo desgaste. Além disso, nota-se também que houve uma tendência de nivelamento dos picos, de maneira que a parcela dos picos entre 2,344 e 3,126 μm, quando somadas, ultrapassam 50% das medidas tomadas.

A Figura 4.21 apresenta os parâmetros de rugosidade para o PEEK antes e após ensaios. Nos parâmetros que apresentaram grande variação entre a superfície antes do ensaio e após ensaio, foi realizada uma ampliação dos dados após ensaio, para auxiliar a comparação entre estes.

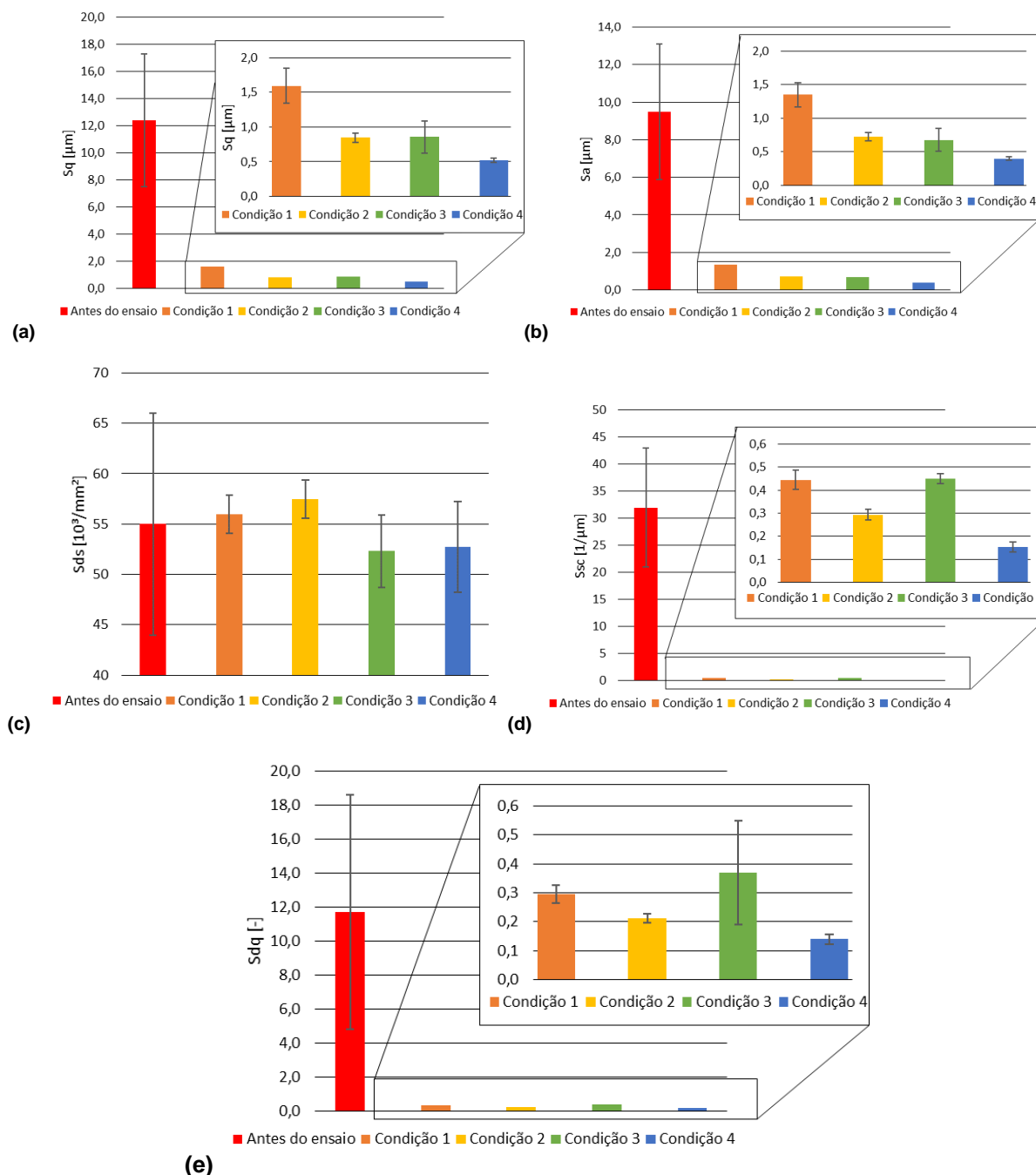
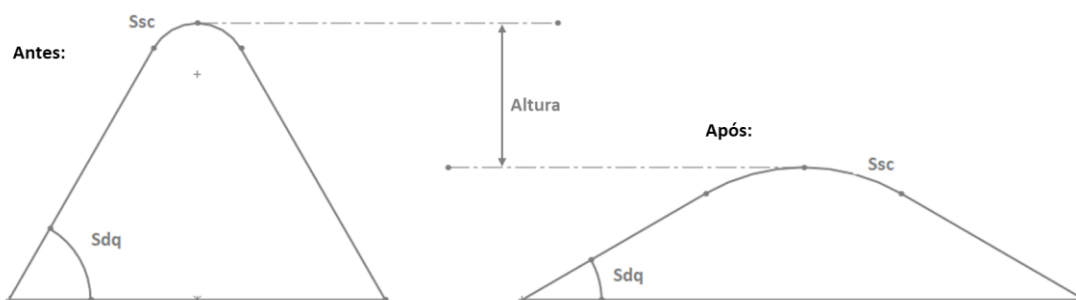


Figura 4.21 – Parâmetros de rugosidade do PEEK antes e após ensaio nas 4 condições.

De maneira geral, a superfície antes do ensaio apresentou maior dispersão em todos os parâmetros de rugosidade, evidenciados pelas barras de erro. Houve uma redução nos parâmetros Sa e Sq, que são parâmetros relacionados à amplitude dos picos, com a condição de ensaio. Ou seja, quanto maior a  $F_N$ , maior a redução na altura dos picos. O parâmetro Sds evidencia que há uma tendência de consolidação do número de picos, de maneira que antes do ensaio, a superfície apresentava áreas com mais ou menos densidade de picos por  $\text{mm}^2$ , e que após o ensaio, as áreas apresentavam valores mais consistentes de densidade de picos. Isto indica que o



ensaio se assemelhou a um alisamento, no qual a rugosidade em diferentes locais da superfície é mais semelhante. A análise dos parâmetros  $S_{sc}$  e  $S_{dq}$  indicam que houve uma forte tendência de arredondamento dos picos e de aplanamento, respectivamente. Uma representação esquemática que mostra a alteração média dos parâmetros  $S_{sc}$  e  $S_{dq}$  para uma única aspereza é apresentado na Figura 4.22.



**Figura 4.22 – Representação esquemática da alteração de uma aspereza ocasionada pelo ensaio.**

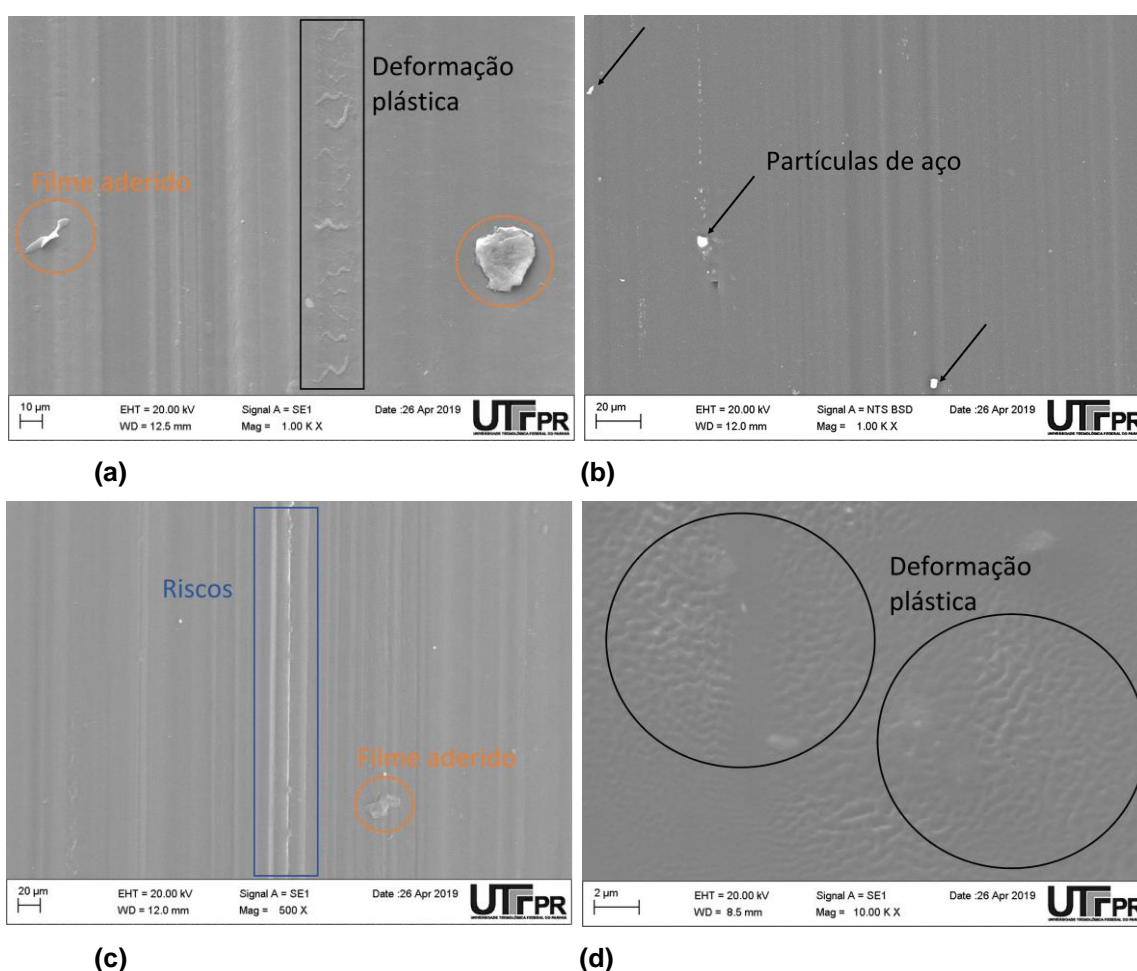
Tendo em vista a análise dos parâmetros de rugosidade e as imagens obtidas por MEV, evidencia-se que houve significativa alteração da superfície ensaiada.

Para estudo dos mecanismos de desgaste ocorridos na superfície ensaiada, são apresentadas na Figura 4.23 imagens obtidas por MEV das pistas de desgaste nas 4 condições de ensaio.

Apesar de serem observadas somente na Figura 4.23(a) e na Figura 4.23(c), partículas de filme de PEEK aderidas à superfície foram encontradas em todas as condições ensaiadas, indicando que houve desgaste adesivo em todas as condições. Apesar de receberem a mesma nomenclatura, as áreas indicadas por deformação plástica observadas nas condições 1 e 4 diferem entre si, sendo necessária uma magnificação maior na condição 4 para que estas deformações fossem observadas. Isto indica que o mecanismo de desgaste formador destas deformações é diferente para as condições 1 e 4. As deformações da superfície 1 se assemelham mais com as dobras em formato de onda<sup>5</sup> observadas no estudo realizado por Zhang *et al.* (2008), que classificou a origem deste evento como a deformação da superfície sendo muito maior que a deformação do substrato, e isto sendo causado pela alta carga e alta velocidade. As ondulações observadas por Zhang *et al.* (2008) são apresentadas

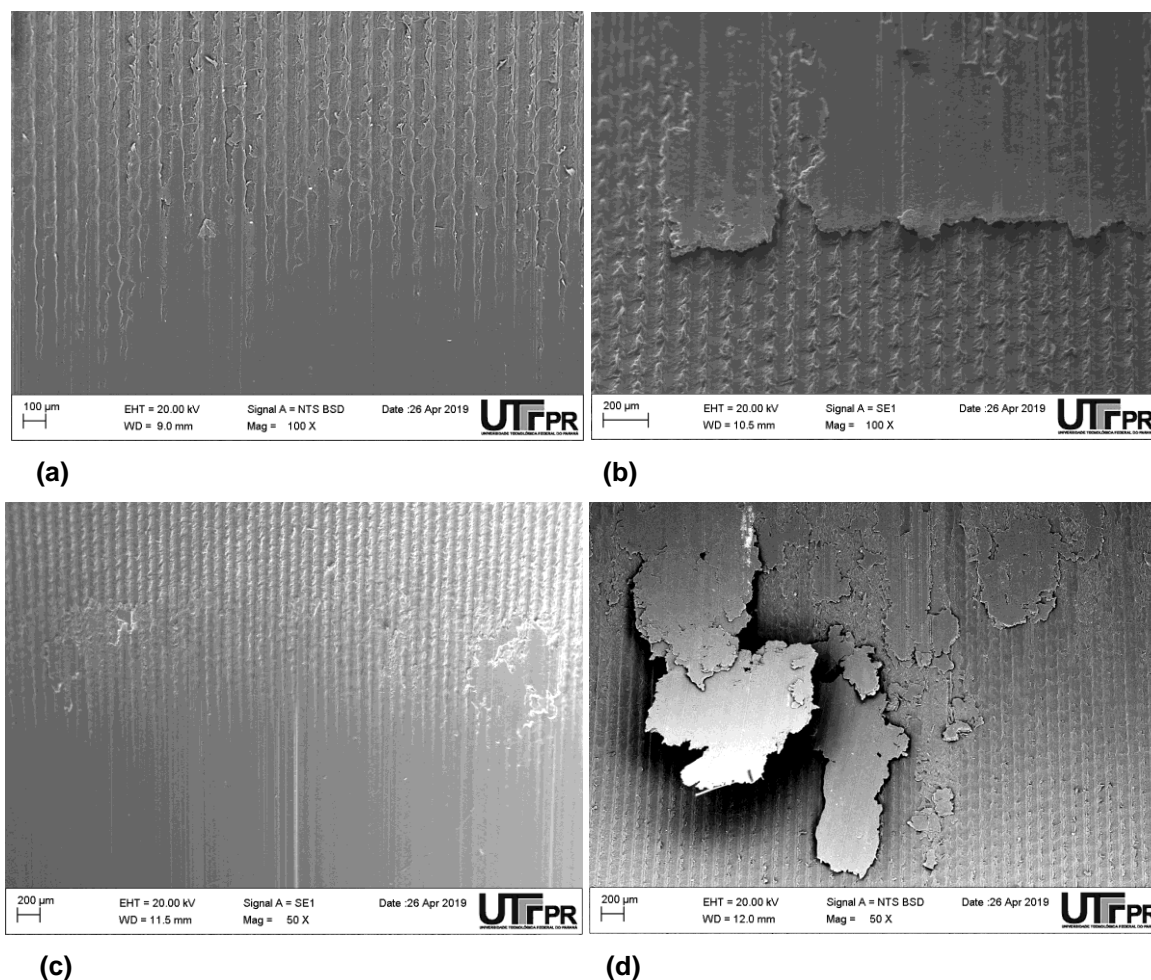
<sup>5</sup> Tradução livre do termo *rippledlike folding*, utilizado no artigo referenciado.

na Figura 2.22. Já a deformação da condição 4, se assemelha mais com a deformação plástica observada no estudo de Wang *et al.* (2017), conforme pode ser observado na Figura 2.26(c). As partículas de desgaste aderidas à superfície e as deformações plásticas são processos originados pelo desgaste adesivo. Já os riscos são originados pelo desgaste abrasivo, no modo de microcorte, abordado na Seção 2.2.4. Conforme já mencionado, partículas de aço inoxidável observadas na Figura 4.23(b), também se depositaram nas outras condições, mas se destacaram nesta imagem por ter sido utilizado um filtro diferente.



**Figura 4.23 – Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK na pista de desgaste após ensaios: (a) na condição 1; (b) na condição 2; (c) na condição 3; (d) na condição 4.**

Imagens das transições da área não desgastada para a pista de desgaste das condições 1 e 3, obtidas por MEV, são apresentadas na Figura 4.24.



**Figura 4.24 – Imagens obtidas por MEV da superfície do PEEK nas áreas de transição após ensaios: (a) início da pista de desgaste na condição 1; (b) final da pista de desgaste na condição 1; (c) início da pista de desgaste na condição 3; (d) final da pista de desgaste na condição 3.**

Nota-se que o começo da pista de desgaste (figuras (a) e (c)) é caracterizado por uma transição gradual entre superfície usinada e superfície desgastada, sendo esta ocasionada pelo alisamento dos picos da superfície usinada e consequente preenchimento dos sulcos com o material dos picos. Diferentemente, o final da pista de desgaste (figuras (b) e (d)), apresenta uma camada de filme polimérico se depositando sobre a superfície usinada. Este filme é gerado pelo estiramento da camada polimérica que se adere ao contra corpo, e que se desprende por conta do deslizamento. Este efeito é apresentado na Seção 2.2.3. Desta maneira mesmo após o estiramento, o filme manteve-se ligado ao corpo de PEEK, ou seja, a superfície em contato foi desgastada, mas o material desgastado continuou aderido ao corpo e não foi removido.

### 4.2.3 Alterações Topográficas em Ensaio Interrompido

A fim de aprofundar o entendimento do processo de desgaste, foi realizado um ensaio na condição 4 com duração de 15 min. Ressalta-se que não houve repetições deste ensaio, e portanto, a discussão aqui apresentada se baseia nas imagens de apenas um corpo de prova. Escolheu-se o tempo de 15 min por ser aproximadamente o final do amaciamento.

A Figura 4.25 apresenta uma imagem da pista de desgaste do corpo de prova ensaiado na condição 4, obtida por MEV, do ensaio interrompido.

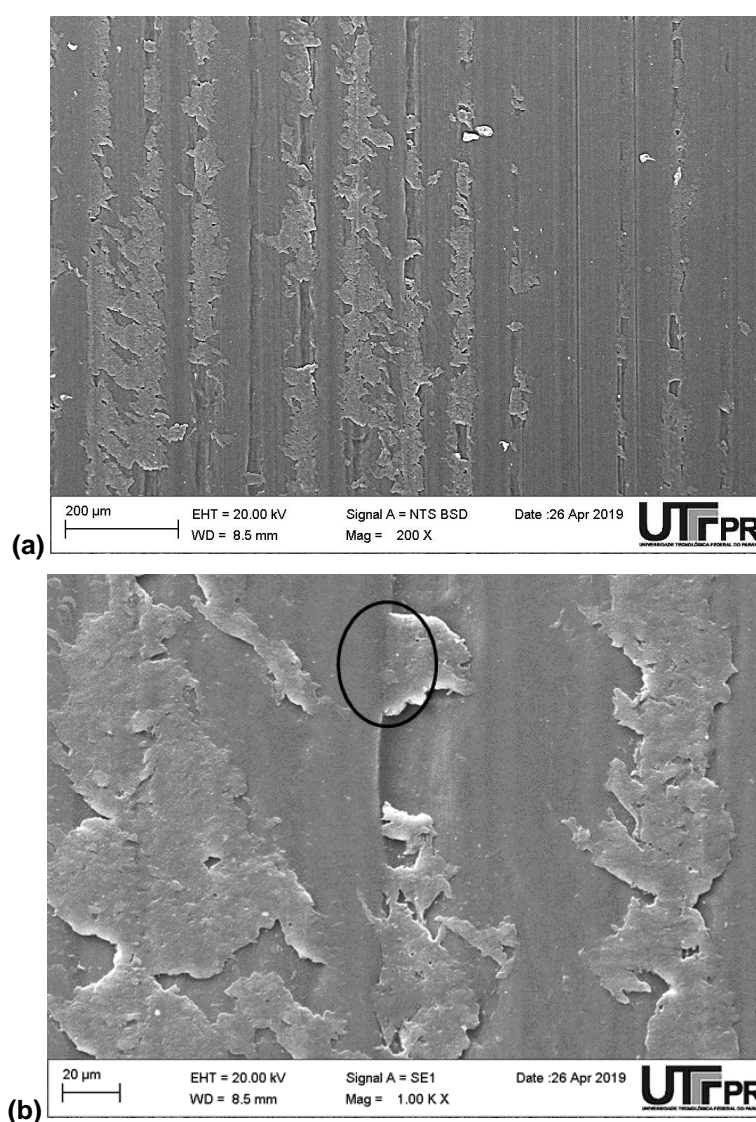
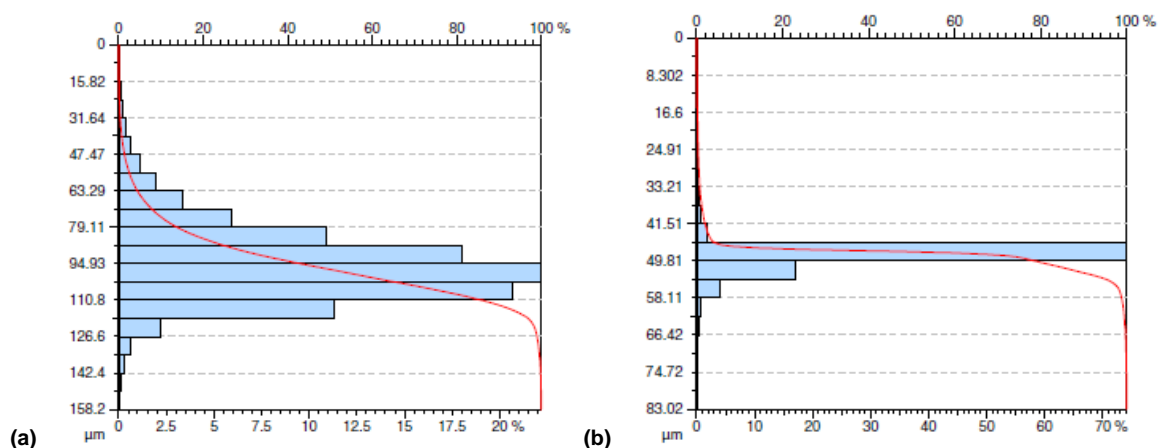


Figura 4.25 – Imagens obtidas por MEV da pista de desgaste do corpo de prova de PEEK: (a) em ensaio interrompido na condição 4; (b) idem.

Conforme discutido na Figura 4.24, observa-se que a pista de desgaste é formada a partir do preenchimento dos sulcos de usinagem com o material dos picos, que é amassado e empurrado para dentro dos vales.

Observa-se na Figura 4.25(b), que apresenta a pista de desgaste com uma maior magnificação, que material do pico foi amassado, ocasionando o preenchimento do sulco de usinagem adjacente. O círculo preto indica uma porção do material que preencheu o sulco de usinagem à direita. Ao final dos primeiros 15 min de ensaio, a maioria dos picos sofreram desgaste, conforme pode ser observado na Figura 4.26, que apresenta a distribuição de altura dos picos. Desta maneira, justifica-se que o período de transição do coeficiente de atrito, abordado na Seção 4.1, inicia-se após o desgaste da maioria dos picos, e finda-se quando a maioria dos vales foram preenchidos, nivelando a superfície por desgaste.



**Figura 4.26 – Distribuição da altura dos picos na superfície do PEEK (a) antes e (b) após ensaio interrompido na condição 4.**

Por fim, uma análise EDX da superfície evidenciou partículas de aço inoxidável depositadas na superfície do corpo de PEEK, indicando que há ocorrência de desgaste do contra corpo no período de amaciamento.

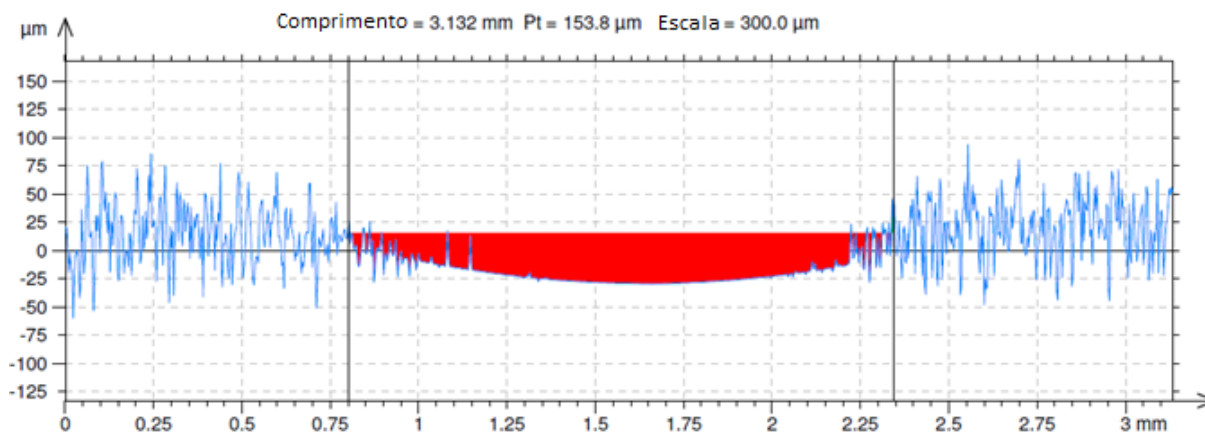
### 4.3 QUANTIFICAÇÃO DA PERDA MÁSSICA

Uma maneira de quantificação de desgaste é a avaliação da massa do corpo de prova antes e após o ensaio. Dessa maneira, realizou-se este procedimento afim de quantizar a perda mássica e então avaliar a taxa de desgaste específica em cada condição. Ressalta-se que foi utilizado a mesma balança para todas as tomadas de

medidas, e que esta apresentava precisão 0,0001 g. Entretanto houveram casos em que a diferença entre a massa do corpo de prova antes e após ensaio foi positiva, indicando um acréscimo de massa ao corpo de prova de PEEK. Aponta-se que todas as medidas apresentaram variação na última casa decimal, ou seja, na precisão da balança.

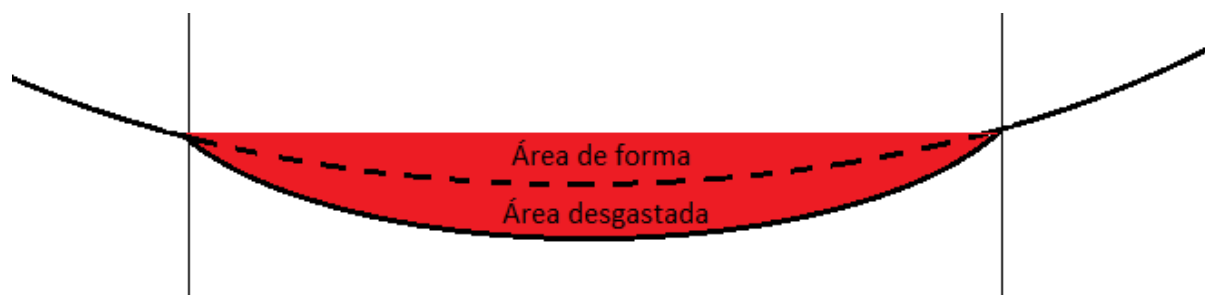
É sabido que o PEEK possui uma alta resistência ao desgaste, fato confirmado pelos valores apresentados na balança após ensaios de 2 h em condição PV = 2. Ainda assim, três fatores podem ter contribuído para este resultado. Primeiro, a medição realizada antes do ensaio ocorreu após o corpo de prova ter permanecido pelo menos 24 h em um dissecador. Após esse período os corpos foram armazenados em sacos plásticos sem vedação. Tendo sido realizado o ensaio, os corpos de prova só foram medidos novamente após um outro período de 24 h. Isso ocorreu, pois, a balança utilizada não se encontrava no mesmo laboratório que foi realizado o ensaio. Dessa maneira, juntavam-se pacotes de amostra para realizar várias medições de uma vez. Segundo, conforme apresentado na Seção 4.2.2, houve aderência de partículas de aço inoxidável, e embora sendo estas aparentemente poucas, o aço apresenta uma densidade mais elevada que o PEEK, podendo ter contribuído para a imprecisão das medidas. Terceiro, conforme também discutido na Seção 4.2.2, o material desgastado na superfície de contato não foi completamente removido na forma de partículas de desgaste. Parte deste material desgastado em forma de partícula de desgaste ficou aderido na pista de desgaste, e parte se deslocou para as áreas de transição, conforme pode ser visto nas Figura 4.23 e Figura 4.24.

Dessa maneira, na tentativa de realizar alguma quantificação, propôs-se um modelo otimista para o cálculo da perda mássica na pista de desgaste. Primeiramente, ressalta-se que há uma grande incerteza intrínseca, causada por uma grande aproximação do comprimento da pista de desgaste, e da seleção da área analisada. O modelo consiste em imagens obtidas por IDLB, em resolução menor (área de análise maior), do comprimento total da pista de desgaste. Com o auxílio do software do interferômetro, obtém-se o perfil de rugosidade longitudinal da pista de desgaste e calcula-se a área removida. A Figura 4.27 apresenta uma área exemplo que foi analisada.



**Figura 4.27 – Imagem típica, obtida por IDLB, de área de desgaste na pista de desgaste.**

Ressalta-se que este perfil de rugosidade foi obtido longitudinalmente na pista de desgaste, e também que, como não foram aplicados filtros, a área leva em conta a forma da superfície. Portanto, para quantificar a área desgastada, deve-se subtrair a área de forma do valor apresentado pelo *software*. Esta é calculada utilizando o comprimento da pista de desgaste e o raio nominal do corpo de prova. A Figura 4.28, apresenta um modelo esquemático exagerado para melhor compreensão.



**Figura 4.28 – Representação esquemática da área indicada por IDLB.**

É importante mencionar que em superfícies planas, o procedimento mais adequado seria a implementação do *stitching* – processo no qual são realizadas medidas consecutivas em áreas adjacentes, as quais são unidas posteriormente utilizando um *software*, possibilitando a medição de áreas maiores com bom detalhamento da superfície – entretanto, conforme discutido por Vale *et al.* (2018), há uma limitação deste método em superfícies curvas. Desta maneira, utilizou-se uma lente com magnificação menor para avaliar uma área com aproximadamente 3,2 mm de comprimento lateral. Logo, só foi possível a avaliação nas áreas desgastadas que possuíam largura da pista de desgaste menor que 3,2 mm.

Assim, obtiveram-se valores de área desgastada sem a forma da superfície. Estes valores foram então multiplicados pelo comprimento do corpo de prova (20 mm) para obter-se o volume desgastado. Esta é uma aproximação exagerada, já que as

pistas de desgaste apresentaram comprimento axial diferentes, e também por conta da variação do comprimento longitudinal ao longo do comprimento axial. O volume obtido é então multiplicado pela densidade do PEEK e então obtém-se o desgaste mássico. A Tabela 4.3 apresenta os valores das áreas em cada condição, obtidos por IDLB, bem como as áreas de forma e desgastadas, que foram calculadas. O resultado da perda mássica e médias também são apresentados.

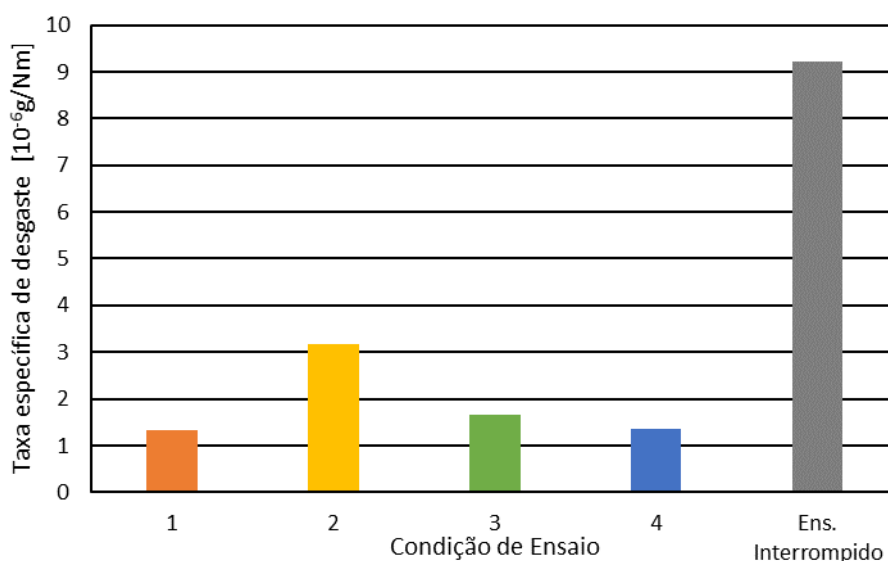
**Tabela 4.3 – Valores das áreas para medição de desgaste.**

Parâmetro	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Ensaio Interrompido	Média
Área IDLB [mm <sup>2</sup> ]	0,071950	0,061549	0,054398	0,058808	0,086317	0,067 ± 0,013
Área de forma [mm <sup>2</sup> ]	0,059001	0,022755	0,029603	0,035718	0,066579	0,043 ± 0,019
Área desgastada [µm <sup>2</sup> ]	0,012949	0,038794	0,024795	0,023090	0,019738	0,0239 ± 0,0095
Perda mássica [g]	0,0003	0,0010	0,0006	0,0006	0,0005	0,00062 ± 0,00025

Observa-se que por este modelo, em geral, as perdas mássicas se mantiveram na casa de precisão da balança utilizada, evidenciando que o desgaste foi mínimo. A condição 2 foi a que apresentou maior desgaste, indicando que a combinação dos parâmetros de velocidade e pressão ocasionaram efeitos de desgaste diferentes das outras condições. Isto corrobora com o perfil de coeficiente de atrito, exibido e discutido na Seção 4.1.

Com os dados de perda mássica, calculou-se a Taxa específica de desgaste, dividindo-se pela  $F_N$  e pela distância de deslizamento do ensaio. Os valores obtidos são apresentados na Figura 4.29.





**Figura 4.29 – Taxa específica de desgaste, calculada a partir do modelo apresentado, para cada condição de ensaio.**

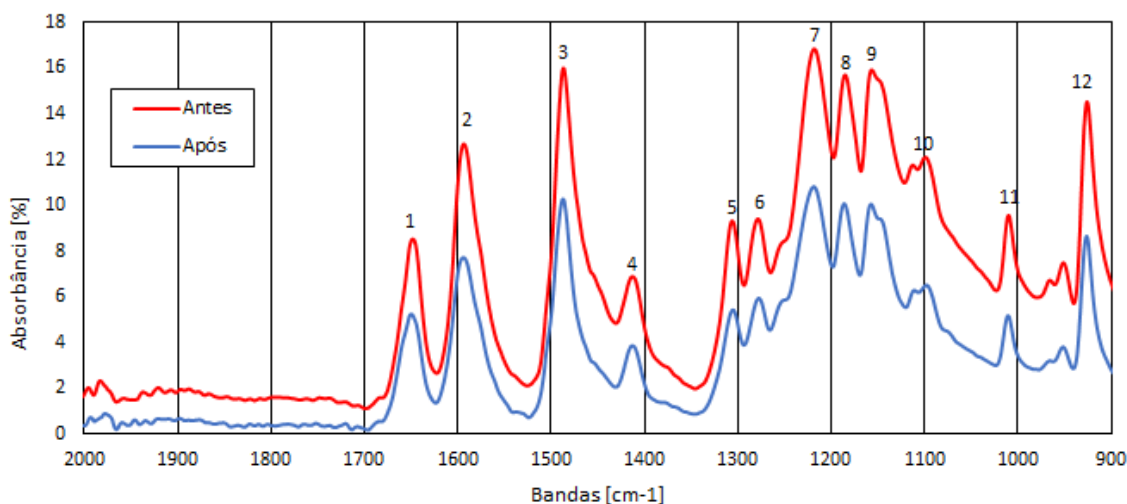
Como os ensaios foram realizados em condições de velocidade e pressão diferentes – mantendo o produto entre estes constante – obteve-se taxas específicas de desgaste diferentes para condições onde a perda mássica foi muito semelhante (condições 3 e 4). Também, nota-se uma disparidade da condição 2, reiterando a ocorrência de efeitos de desgaste diferentes nesta condição. Outro fato interessante, é observar que a taxa específica de desgaste do ensaio interrompido é muito diferente das outras condições. Isto indica que a maior parte do desgaste ocorreu nos primeiros 15 min de ensaio – dentro do período de amaciamento – e que uma menor parte do desgaste se dá ao longo dos períodos de transição e estabilização. Os valores encontrados, estão na mesma ordem de grandeza dos obtidos por Lu e Friedrich (1995), num ensaio do tipo pino sobre disco sem lubrificação. A Figura 2.16 apresenta os resultados obtidos neste ensaio.

#### 4.4 ALTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS

Conforme apresentado nas seções 4.2 e 4.3, o desgaste do par tribológico ocorreu majoritariamente no material polimérico e foi verificado diferentes mecanismos de desgaste. Logo, é de se esperar que alterações físico-químicas ocorreram no corpo de prova. Nesta seção são apresentados resultados das caracterizações por Ftir e DSC realizadas para verificação desta hipótese.

Vale (2014) conduziu uma análise por Ftir de amostras de PTFE ensaiadas no mesmo modelo de eixo sobre mancal sem lubrificação, e observou alterações nas ligações atômicas do material polimérico, conforme apresentado na Figura 2.32. A principal alteração observada foi o surgimento de picos relacionados a ligações de OH, elementos que não fazem parte do mero de PTFE, enquanto que o PEEK, possui estes dois elementos, conforme apresentado na Figura 2.1.

Na Figura 4.30 é apresentado níveis de absorbância para o material antes e após o ensaio na condição 4. Ressalta-se que a espectroscopia retornou valores em toda a faixa entre as bandas 400 e 4000, entretanto após a banda 2000, os valores são muito próximos do ruído do ensaio, diminuindo a eficácia desta técnica. E de maneira geral, na literatura, encontram-se denominações para as bandas do PEEK entre 900 e 2000  $\text{cm}^{-1}$ , sendo esta a faixa apresentada.



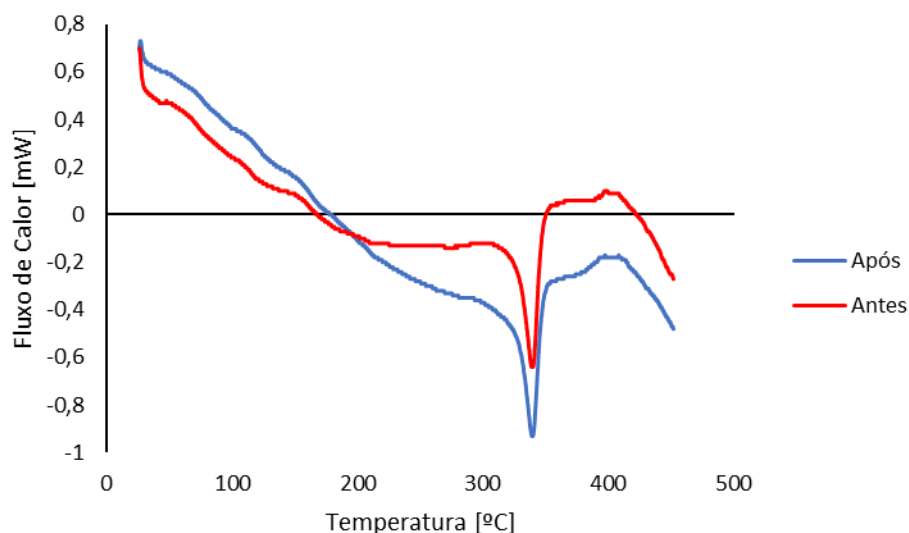
**Figura 4.30 – Espectro de interesse da análise Ftir do PEEK antes e após ensaio na condição 4.**

Pela figura, nota-se que não houve o surgimento de novos picos, indicando que a análise por Ftir não foi sensível a alterações na composição química do material após o ensaio. Ainda assim, é possível a caracterização do material por este ensaio, que, de acordo com Wilson *et al.* (2015), cada pico é definido pelas seguintes interações atômicas:

- 1: Estiramento da cetona C=O
- 2: Vibração em plano esqueléticas do anel aromático
- 3: Estiramento em semi-círculo esqueletico do anel aromático
- 4: Rotações aromáticas

- 5: Rotações aromáticas
- 6: Rotações aromáticas
- 7: Grupo éter difenil, C-O-C rotação
- 8: Grupo éter difenil, C-O-C estiramento
- 9: Grupo éter difneil, C-O-C estiramento
- 10: Estiramento C-O
- 11: Vibrações em plano de hidrogênio aromático
- 12: Torção aromática fora do plano

A análise por calorimetria explanatória diferencial (DSC), por sua vez, foi útil para verificar alterações de cristalinidade no polímero. A Figura 4.31 mostra alterações no fluxo de calor do PEEK com relação à temperatura.



**Figura 4.31 – Curvas de fluxo de calor em função da temperatura em uma análise DSC para as superfícies de PEEK antes e após ensaio na condição 4.**

Para o cálculo do grau de cristalinidade, é considerada a área da curva do fluxo de calor durante a fusão, que para o PEEK, ocorreu a partir da temperatura de 315 °C, aproximadamente. A curva A apresenta PEEK amorfo e as curvas seguintes apresentam PEEK com diferentes cristalinidades. Os valores de cristalinidade são obtidos pela equação (8), utilizando o valor de entalpia de fusão do PEEK ( $\Delta H^o$ ), teórico, de 130 J/g (Lin *et al.*, 2012). Os dados obtidos através da análise DSC são apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Valores das áreas para medição de desgaste.**

<b>Condição</b>	<b>Entalpia de Fusão [J/g]</b>	<b>Temperatura de Fusão [°C]</b>	<b>Grau de Cristalinidade [%]</b>
<b>Antes do ensaio</b>	20,01	339,1	15%
<b>Após ensaio</b>	28,68	339,3	22%

Embora estes valores estejam abaixo do encontrado na literatura, – por volta de 30% (LU e FRIEDRICH, 1995) – observou-se aumento no grau de cristalinidade na superfície desgastada do PEEK. Este resultado é consoante com o resultado encontrado por Vale (2014) no mesmo ensaio de PTFE. Houve um aumento no grau de cristalinidade associado ao estiramento das cadeias poliméricas da superfície devido às forças cisalhantes do deslizamento causando a reorientação destas cadeias poliméricas.

## 5 CONCLUSÕES

A partir do presente trabalho, onde avaliou-se o comportamento tribológico do PEEK em ensaio de deslizamento do tipo mancal sobre eixo, sem lubrificação, com duração de 120 min em condição PV constante, concluiu-se que:

- Houve uma variação considerável no coeficiente de atrito durante o ensaio, e este apresentou períodos de amaciamento, transição e estabilização. O amaciamento durou aproximadamente 15 min e a estabilização iniciou-se por volta dos 110 min de ensaio. Além disso, o coeficiente de atrito no período da estabilização foi estatisticamente igual para as 4 condições ensaiadas;
- O contra corpo de aço inoxidável sofreu pouca alteração da topografia, enquanto que a topografia do PEEK foi completamente alterada na pista de desgaste. Pouco material polimérico foi transferido para a superfície do contra corpo de aço inoxidável, e partículas desgastadas do contra corpo de aço inoxidável ficaram aderidas à superfície do corpo de PEEK;
- O principal mecanismo de desgaste no polímero foi o adesivo, evidenciado pelas partículas de desgaste poliméricas amassadas contra a pista de desgaste e os filmes poliméricos nas áreas de transição. Houve deformação plástica na pista de desgaste, gerando dois padrões de topografia distintos em corpos ensaiados nas condições 1 e 4;
- O corpo de prova não sofreu desgaste suficientemente grande para que fosse sensível à balança com precisão de 0,0001 g. Ainda assim, através de um modelo otimista, quantizou-se o desgaste mássico e verificou-se que a perda mássica foi, de fato, mínima, ocorrendo em sua maioria durante período de amaciamento. Ressalta-se que o corpo de prova, após ensaios em todas as condições, apresentava condições de trabalho, mantendo sua funcionalidade;

- A análise através da Espectroscopia de infravermelho em Transformada de Fourier não foi sensível para alterações nas ligações atômicas do PEEK, mas houve aumento do grau de cristalização na superfície do corpo de prova após ensaio devido às reorientações das cadeias poliméricas mais superficiais.

Por fim, diante do exposto, conclui-se que houve êxito na realização da avaliação do comportamento tribológico do PEEK no ensaio proposto.

## REFERÊNCIAS

- ARCHARD, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal Of Applied Physics*. v. 24, p. 981-988, 1953.
- ARCHARD, J. F. Elastic deformation and the laws of friction. *Proceedings of the Royal Society of London*. v. 243, p.190-205, 1957.
- ARCHARD, J. F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings of the Royal Society of London*. v. 236, p.397-410, 1956.
- AZoM Supplier Data – polyetheretherketone (PEEK) (Goodfellow). Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1882>>. Acesso em 04 out. 2018.
- BAHADUR, S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *WEAR*. v. 245, p. 92-99, 2000.
- BARTENEV, G. M.; LAVRENTEV, V. V. Friction and wear of polymers. ELSEVIER, Amsterdão, 1981.
- BELYSI, 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.
- BLUNDELL, D. J.; OSBORN, B. N. The morphology of poly(aryl-ether-ether-ketone). *POLYMER*. v. 24, p. 953-958, 1983.
- BLAU, P. J. Friction Science and Technology: from concepts to applications. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2008.
- BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. *TRIBOLOGY INTERNATIONAL*. v. 14, p. 231-243, 1981.
- BRISCOE, B. J.; SINHA, J. K.; (CAPÍTULO 1). Em: FRIEDRICH, K.; SCHLARB, A. K., editores. Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings. 1. ed. Oxford: Elsevier B. V., 2008.
- BRISCOE, B. J.; STOLARSKI, T. A.; DAVIES, G.J. Boundary lubrication of thermoplastic polymers in model fluids. *TRIBOLOGY INTERNATIONAL*. v. 17, p. 129-137, 1984.
- CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CARDOSO, Leonardo. SUPREME LUBRIFICANTES. Custos da Lubrificação. Disponível em: <[http://www.supremelub.com.br/espaco\\_lubrificacao/noticias\\_detalhes.aspx?id=38](http://www.supremelub.com.br/espaco_lubrificacao/noticias_detalhes.aspx?id=38)>. Acesso em: 05 fev. 2012

CHALMERS, J.M.; EVERALL, N.J.; HEWITSON, K.; CHESTERS, M.A.; PEARSON, M.; GRADY, A.; et al. Fourier transform infrared microscopy: some advances in techniques for characterization and structure-property elucidations of industrial material. ANALYST. v.123, p. 579-586, 1998.

DRAKE PLASTICS. Why PEEK?. Disponível em: <<https://drakeplastics.com/peek/>>. Acesso em 20 abr. 2019.

FRIEDRICH, K.; KARGER-KOCSIS, J.; LU, Z. Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PE(E)K composites under dry sliding conditions. WEAR. v. 148, p. 235-247, 1991.

FU, R.K.Y.; MEI, Y. F.; WAN, G. J.; SIU, G. G.; CHU, P. K.; HUANG, Y. X.; TIAN, X. B.; YANG, S. Q.; CHEN, J. Y. Surface composition and surface energy of Teflon treated by metal plasma immersion ion implantation. SURFACE SCIENCE, v. 573, p. 426-432, 2004.

HOLMBERG, K.; SIILASTO, R.; LAITINEN, T.; ANDERSSON, P.; JÄSBERG, A. Global energy consumption due to friction in paper machines. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 62, p. 58-77, 2013.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2. ed. Oxford: Elsevier B. V., 2017.

JONES, D. P.; LEACH, D. C.; MOORE, D. R. Mechanical properties of poly(ether-etherketone) for engineering applications. POLYMER. v. 26, p. 1385-1393, 1985.

KAR, M. K.; BAHADUR, S. Micromechanism of wear at Polymer-metal sliding interface. WEAR. v. 46, p. 189-202, 1978.

KOIKE, H.; KIDA, K.; SANTOS, E. C.; ROZWADOWSKA, J.; KASHIMA, Y.; KANEMATSU, K. Self-lubrication of PEEK polymer bearings in rolling contact fatigue under radial loads. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 49, p. 30-38, 2012.

KURTZ, S. M. PEEK Biomaterials Handbook. 1. ed. Oxford: Elsevier B. V., 2012.

LAUX, K. A.; SCHWARTZ, C. J. Influence of linear reciprocating and multi-directional sliding of PEEK wear performance and transfer film formation. WEAR. v. 301, p. 727-734, 2013.

LEI, C.; WANG, X.; FANG, Q.; GAO, Y.; TU, D.; DU, Q. Space charge distribution and crystalline structure in quenched polytetrafluoroethylene. EUROPIAN POLYMER JOURNAL. v. 43, p. 4523-4529, 2007.

LIN, L.; TLATLIK, H.; GRALLA, R.; IGARTUA, M. A.; BAETS, P.; SCHLARB, A. Mechanical and thermal behaviours of polyetheretherketone-based multi-scale composites. JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS. v. 47, p.2087-2096, 2012.

LIN, L.; PEI, X.; BENNEWITZ, R.; SCHLARB, A. Friction and wear of PEEK in continuous sliding and unidirectional scratch tests. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 122, p.108-113, 2018.

LU, Z. P.; FRIEDRICH, K. On sliding friction and wear of PEEK and its composites. WEAR. v. 181-183, p. 624-631, 1995.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.



RAE, P. J.; BROWN, E. N.; ORLER, E. B.; The mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response. POLYMER. v. 48, p. 598-615, 2007.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR. Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

STACHOVIK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. 3.ed. EUA: Butterworth Heinemann, 2001.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte. 5 ed. Florianópolis: UFSC, 2001.

STOLARSKI, T. A. Tribology of polyetheretherketone. WEAR. v. 158, p. 71-78, 1992.

VALE, J. Estudo do comportamento tribológico do politetrafluoretileno em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável. Curitiba, 2014.

VALE, J.; BELTRÃO, V. C.; SILVA, C. H.; PINTAÚDE, G. Evaluation of the error of the light beam incidence on concave surfaces in 3D roughness parameters using optical interferometry. MEASUREMENT. v. 120, p. 182-192, 2018.

VAN DER VEGT, A. K. Polymeren: Van keten tot kunststof. Delft: VSSD, 2005.

VIVEIROS, M. Folha de São Paulo. 28 mi de litros de óleo poluem SP por ano. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u6713.shtml>>. Acesso em 30 out. 2018

WANG, Q.; WANG, Y.; WANG, H.; FAN, N.; WANG, M.; YAN, F. Evaluation of Fretting Wear Behavior of PEEK by Analyzing the Change of Crystallinity: The High Temperature Effect. POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE. p. 1340-1348, 2017.

WIEBECK, H.; HARADA, J. Plásticos de engenharia. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

WILSON, A.; JONES, I.; SALAMAT-ZADEH, F.; WATTS, J. F. Laser surface modification of poly(etheretherketone) to enhance surface free energy, wettability and adhesion. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADHESION AND ADHESIVES. p.69-77, 2015.

WU, J.; LU, X.; FENG, X.; SHI, Y. Halogen-free ionic liquids as excellent lubricants for PEEK-stainless steel contacts at elevated temperatures. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 104, p. 1-9, 2016.

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

ZALANIK, M.; KALIN, M.; NOVAK, S. Influence of the processing temperature on the tribological and mechanical properties of poly-ether-ether-ketone (PEEK) Polymer. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 94, p. 92-97, 2016.

ZHANG, Z.; BREIDT, C.; CHANG, L.; FRIEDRICH, K. Wear of PEEK composites related to their mechanical performances. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 37, p. 271-277, 2004.

ZHANG, G.; ZHANG, C.; NARDIN, P.; LI, W. -Y.; LIAO, H.; CODDET, C. Effects of sliding velocity and applied load on the tribological mechanism of amorphous poly-ether-ether-ketone (PEEK). TRIBOLOGY INTERNATIONAL. v. 41, p. 79-86, 2008.

ZUM-GAHR, K. H. Microstructure and Wear of Materials – Tribology Series, no.10 – Elsevier Science Publishers, p.437-447, 1987.

## ANEXO A – CERTIFICAÇÃO DO FORNECIMENTO DO PEEK



## VICTREX® PEEK™ 450PF

➤ **Product Description:**

High performance thermoplastic material, unreinforced PolyEtherEtherKetone (PEEK), semi crystalline, fine powder for compression moulding, standard flow, FDA food contact compliant, colour natural.

➤ **Material Properties**

	CONDITIONS	TEST METHOD	UNITS	TYPICAL VALUE
<b>Mechanical Data</b>				
Tensile Strength	Yield, 23°C	ISO 527	MPa	100 *
Tensile Elongation	Break, 23°C	ISO 527	%	30 *
Tensile Modulus	23°C	ISO 527	GPa	3.7 *
Flexural Strength	23°C	ISO 178	MPa	160 *
Flexural Modulus	23°C	ISO 178	GPa	4.1 *
Izod Impact Strength	Notched, 23°C	ISO 180/A	kJ m <sup>-2</sup>	8.5 *
	Unnotched, 23°C	ISO 180/U		n/b *
<b>Thermal Data</b>				
Melting Point		ISO 11357	°C	343
Glass Transition (T <sub>g</sub> )	Onset	ISO 11357	°C	143
<b>Flow</b>				
Melt Viscosity		Victrex	kN s m <sup>-2</sup>	0.45
<b>Miscellaneous</b>				
Density		ISO 1183	g cm <sup>-3</sup>	1.30
Bulk Density		ISO 1183	g cm <sup>-3</sup>	0.30
Average Particle Size (D <sub>50</sub> )		ISO 13320-1	µm	50
* Result based on similar products				
<b>Recommended Processing Conditions</b>				
Drying Temperature / Time				150°C / 3h or 120°C / 5h
Processing Temperature				380-400°C

Detailed data available on our website [www.victrex.com](http://www.victrex.com) or upon request

**World Headquarters**

Victrex plc, Hillhouse International, Thornton Cleveleys, Lancashire FY5 4QD United Kingdom  
Tel: + (44) 1253 897700 Fax: + (44) 1253 897701 Email: [victrexplc@victrex.com](mailto:victrexplc@victrex.com)

VICTREX PLC BELIEVES THAT THE INFORMATION CONTAINED HEREIN IS AN ACCURATE DESCRIPTION OF THE TYPICAL CHARACTERISTICS AND/OR USES OF THE PRODUCT OR PRODUCTS DESCRIBED TO THE EXTENT OF THE CUSTOMER'S RESPONSIBILITY TO PROPERLY TEST THE PRODUCT IN EACH SPECIFIC APPLICATION TO DETERMINE ITS PERFORMANCE, EFFICIENCY AND SAFETY FOR EACH SPECIFIC PRODUCT, DESIGN OR OTHER APPLICATION. SUBSTITUTION OF UNITS SHOULD NOT BE TAKEN AS INDICATIONS TO REPEL ANY PARTICULAR PATENT. THE INFORMATION AND DATA CONTAINED HEREIN ARE BASED ON INFORMATION WE BELIEVE RELIABLE. MENTION OF A PRODUCT IN THIS DOCUMENTATION IS NOT A GUARANTEE OF AVAILABILITY. VICTREX PLC RESERVES THE RIGHT TO MODIFY PRODUCTS, SPECIFICATIONS AND/OR PACKAGING AS PART OF A CONTINUING PROGRAM OF PRODUCT DEVELOPMENT. VICTREX IS A REGISTERED PROVIDER OF VICTREX MANUFACTURING LIMITED PEEK™, APT™, PEEK 450PF, 1, 3000™, PEEK 450PF, 1, 3000™, PEEK 450PF, 1, 3000™ OF VICTREX PLC. VICTREX IS A REGISTERED TRADEMARK OF VICTREX PLC.

VICTREX PLC MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION WARRANTIES OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR OF INTELLECTUAL PROPERTY OWNERSHIP. NOT LIMITED TO, BUT NOT LIMITED TO, PATENT, TRADEMARK, DESIGN OR COPYRIGHT. VICTREX DOES NOT WARRANT WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, IN FACT OR BY LAW, THAT VICTREX PLC MAKES NO WARRANTIES TO YOUR CUSTOMERS OR SUPPLIERS AND HAS NOT AUTHORIZED ANYONE TO MAKE ANY REPRESENTATION OR WARRANTY OTHER THAN AS PROVIDED HERE. VICTREX PLC SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY GENERAL, SPECIAL, CONSEQUENTIAL, PUNITIVE, INCIDENTAL OR OTHER DAMAGES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION DAMAGES FOR PROFITS OR LOSS OF PROFITS OR LOSS OF BUSINESS, EVEN IF VICTREX HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES, REGARDLESS OF THE FORM OF ACTION.



## ANEXO B – CERTIFICAÇÃO DO FORNECIMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

02.764.053/0001-04 	Certificado de Qualidade
<b>Cliente:</b> DUCT METALURGICA LTDA- 18/01/13	

Item	Corrida	Nota Fiscal	Peso	Dimensões	Aço	Acabamento
1	1558259	21691	9,20	Br.red.inox 22,23mm	304	Descascado polido

Item	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	N	Ti	Cu	Co
1	0,025	0,10	0,33	0,026	0,025	18,41	8,8,26	0,55	-	0,10	-	0,30	0,08

Item	Lim. Resistência	Lim. De escoamento	Alongamento	Estricção	Tam. De Grão	Dureza	Dobramento
1	-	-	-	-	-	195HB	-

Item	Observações
1	-ATENDE NORMA ASTM A276/2010 – SOLUBILIZADO NA LAMINAÇÃO

Certificamos que os dados acima estão corretos e que os documentos que lhes dão sustentação, estão disponíveis em nossos arquivos.

\_\_\_\_\_  
Antonio Cezar G.Guimarães  
Conferente / Encarregado

R.Fagundes Varella, 1.632 - Jardim Social - Curitiba - PR - CEP - 82520-40  
Fone / Fax: (41) 3091-0101