



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS DE CURITIBA  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELIPE FERNANDO BOUTIN  
LUCAS PRADO CAETANO ROCHA**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO  
POLITETRAFLUORETILENO CONTRA AÇO INOXIDÁVEL  
SEM LUBRIFICAÇÃO EM ENSAIO PINO SOBRE DISCO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**(Tcc2 - N° de Inscrição - 51)**

**CURITIBA**

**2015**

**FELIPE FERNANDO BOUTIN**  
**LUCAS PRADO CAETANO ROCHA**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO  
POLITETRAFLUORETILENO CONTRA AÇO INOXIDÁVEL  
SEM LUBRIFICAÇÃO EM ENSAIO PINO SOBRE DISCO**

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

Orientadores: Prof. MSc. João Luiz do Vale

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

**CURITIBA**  
**2015**

## TERMO DE APROVAÇÃO<sup>1</sup>

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Avaliação do comportamento tribológico do politetrafluoretileno contra aço inoxidável sem lubrificação em ensaio pino sobre disco”, realizada pelos alunos Felipe Fernando Boutin e Lucas Prado Caetano Rocha, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

---

Orientador:  
Prof. MSc. João Luiz do Vale  
(Mecânica Estrutural)

---

Co-orientador:  
Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva  
(Mecânica Estrutural)

### Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde  
(Materiais)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ane Cheila Rovani  
(Materiais)

Curitiba, 4 de Março de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar aqui nossos agradecimentos a todos os envolvidos na realização deste trabalho, que das mais diversas formas foram responsáveis direta ou indiretamente para que atingíssemos o sucesso buscado.

Inicialmente ao Professor João Luiz Do Vale que nos orientou desde a elaboração da proposta de projeto de pesquisa e teve papel fundamental na evolução deste trabalho.

Ao Professor Doutor Carlos Henrique da Silva que esteve presente como coorientador e desempenhou grande contribuição nas discussões e nos métodos apresentados.

À aluna Fernanda Kouketsu, que se mostrou muito solícita em um momento em que pouco conhecíamos do equipamento a ser utilizado, e demonstrou muita paciência para nos orientar.

Ao Professor Doutor Júlio Klein das Neves, pelo suporte dado na utilização dos laboratórios e por sempre se mostrar colaborativo.

Ao professor Doutor Giuseppe Pintaude pela participação na banca avaliadora e pela imensa contribuição nas discussões.

À Professora Doutora Ane Cheila Rovani pela disponibilidade de nos orientar na utilização do tribômetro quando o cronograma atingia sua parte mais crítica e pela sua contribuição na banca avaliadora.

Ao Sr. Alexandre José Gonçalves pela grande ajuda na operação e análise da Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ao Professor Doutor Carlos Cruz pela execução e fornecimento dos ensaios de FTIR, e por sua solicitude em nos auxiliar em prazo tão apertado.

Ao Sr. Edgar Valmor da Costa, pela confecção do porta amostras à custo zero, apenas pelo desejo de ver a evolução e sucesso do trabalho.

Aos nossos familiares, que desde sempre nos deram todo o suporte necessário para trilharmos nossa caminhada até aqui e que, certamente, irão continuar a nos apoiar ao longo da grande jornada que está por vir.

Por último, e não menos importante, gostaríamos de agradecer ao contribuinte brasileiro que, através do pagamento de impostos, arcou com os custos da nossa formação acadêmica.

A todos estes, nosso sincero: muito obrigado!

*“Ask not what your country can do for you,  
ask what you can do for your country”.*

- John F. Kennedy (1961)

## RESUMO

BOUTIN, Felipe F. & ROCHA, Lucas P. C. **Avaliação do comportamento tribológico do politetrafluoretileno contra aço inoxidável sem lubrificação em ensaio pino sobre disco**. 2015. 91 f. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O politetrafluoretileno (PTFE), principal material de estudo no presente trabalho, é comumente utilizado na indústria em aplicações tribológicas sem lubrificação. A proposta deste trabalho é avaliar o PTFE contra aço inoxidável em ensaio normalizado do tipo pino sobre disco sem lubrificação. Além disso, comparam-se os resultados com ensaios tipo mancal sobre eixo realizado em trabalho anterior. Para entendimento do comportamento tribológico do PTFE, fez-se uma revisão bibliográfica focando parâmetros que influenciam o atrito cinético e os principais mecanismos de desgaste dos polímeros. O aço inoxidável, material que foi utilizado como contra-corpo nos ensaios, teve suas características brevemente abordadas nessa revisão. Os ensaios foram realizados em quatro condições com valores pré-definidos de pressão de contato, velocidade de deslizamento e com condição PV (produto das duas variáveis) constante, replicando condições que foram utilizadas nos ensaios do tipo mancal sobre eixo. Nos ensaios observou-se que o coeficiente de atrito cinético atingiu um patamar de estabilidade em tempo muito inferior aos apresentados na configuração mancal sobre eixo. Os valores do coeficiente adimensional de Archard encontrados vão de encontro à literatura. Constatou-se aumento sutil da temperatura com o aumento do carregamento normal. A temperatura no contato mostrou-se, devido aos aspectos geométricos dos experimentos, mais elevada nos ensaios de mancal sobre eixo do que os realizados neste estudo. Realizaram-se análises das superfícies, antes e após os ensaios, utilizando interferometria de luz branca, microscopia eletrônica de varredura e FTIR. Constatou-se que os mecanismos de desgaste operantes foram: o adesivo e o abrasivo, com predomínio do primeiro tanto no presente trabalho quanto nos ensaios do tipo mancal sobre eixo. As alterações topográficas no aço inoxidável foram tênues após os ensaios, enquanto para o polímero constatou-se alterações drásticas na superfície, assim como ocorrido nos ensaios tipo mancal sobre eixo. Verificou-se que as partículas de desgaste mesclaram-se formando filmes multicamadas, os quais foram expulsos do contato para as laterais das pistas de deslizamento. As partículas encontradas no sistema pino sobre disco foram menores que as encontradas no sistema mancal sobre eixo. Também observou-se formação de fibrila nas partículas de desgaste para ambos os sistemas tribológicos, o que indica aumento da cristalinidade. Os espectros fornecidos por FTIR permitiram constatar, para ambos os sistemas, alterações nas cadeias do polímero.

**Palavras-chave:** Atrito; Desgaste; Politetrafluoretileno; Deslizamento sem lubrificação.

## ABSTRACT

*The polytetrafluoroethylene (PTFE), the main study material in this work, is commonly used in the industry for tribological applications without lubrication. The purpose of this study is to evaluate the PTFE against stainless steel in a standardized test type pin on disk without lubrication. To understand the tribological behavior of PTFE, a literature review was done focusing parameters that influence the kinetic friction and the main wear mechanisms of polymers. Stainless steel, material used as counter body in the tests, had their characteristics briefly addressed in this review. Assays were performed at four conditions with preset values of contact pressure, sliding speed, and with constant PV condition (product of those two variables), replicating the conditions used in previous studies, carried out on no standardized assays, with bearing on shaft. In the tests it was observed that the kinetic friction coefficient reached a level of stability while well below the presented on the bearing axis pattern. The values of the dimensionless Archard coefficient found goes according to the literature. It was found that a slight increase of temperature with increasing normal load. The temperature at the contact showed up, due to the geometric aspects of the experiments, higher in bearing on shaft tests than those performed in this study. Analyses were performed on the surfaces before and after the tests, using white light interferometry, scanning electron microscopy and FTIR. It was found that the operative wear mechanisms were: the adhesive and abrasive, with predominance of the first both in this work and in the bearing on shaft tests. The topographical changes in the stainless steel were quite subtle after the tests, while for the polymer was found drastic changes, as occurred in the bearing on shaft tests. It was found that the wear-blended particles forming multilayer films, which were driven into the side contact of the sliding tracks. The particles found on the disk on pin system were smaller than those found in the bearing on shaft. The FTIR spectrum allowed to find, for both systems, changes in the polymers chains.*

**Keywords:** *Friction; Wear; Polytetrafluoroethylene; Sliding without lubrication;*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Componentes de um tribossistema.....	18
Figura 2-2 – Força de atrito $F$ necessária para promover movimento por (a) rolagem e (b) deslizamento.....	19
Figura 2-3 – Componentes do coeficiente de atrito conforme modelo de Bowden e Tabor: (a) adesão e (b) deformação. ....	20
Figura 2-4 – Delimitação das zonas de cisalhamento e deformação a partir do deslizamento da aspereza dura contra o polímero. ....	21
Figura 2-5 – Comportamento do coeficiente de atrito cinético em relação ao carregamento normal aplicado para diversos polímeros em deslizamento sem lubrificação contra aço. ....	21
Figura 2-6 – Comportamento da superfície polimérica devido a passagem de uma esfera rígida rolante. ....	22
Figura 2-7 – Mecanismo de transferência normal, apresentado pela maior parte dos polímeros. ....	25
Figura 2-8 – Desgaste e mecanismo de transferência de filme de PTFE em contraponto. Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2001). ....	25
Figura 2-9 – Mecanismos de desgaste por abrasão. ....	27
Figura 2-10 – Mecanismo de desgaste por fusão em polímeros causado por elevadas temperaturas de contato alcançadas durante o deslizamento. ....	28
Figura 2-11 – Mecanismos de fusão cíclica de polímeros em deslizamento a temperaturas abaixo da crítica: (a) início do processo de fusão (b) finalização da fusão da camada e reinício do ciclo. ....	28
Figura 2-12 – Representação esquemática da formação de fibrilas. ....	29
Figura 2-13 – Diagrama de fase do PTFE em função de pressão e temperatura. ....	29
Figura 2-14 – Mapeamento qualitativo de desgaste em função da pressão de contato para diversos materiais. ....	30

Figura 2-15 – Representação idealizada do contato em superfícies simples de deslizamento. (a) Contato máximo da área com raio $a$ ; (b) Após deslizar por um comprimento $y$ ; (c) Após deslizar por um comprimento $2a$ , área de contato nula. .....	31
Figura 2-16 – Curvas de temperatura em função de diferentes condições PV .....	33
Figura 2-17 – Relação do atrito cinético em função da velocidade de deslizamento de PTFE contra aço austenítico polido ( $R_a=0,10$ a $0,20 \mu\text{m}$ ) com pressões de contato 30 e 35 MPa.....	33
Figura 2-18 – Unidade de repetição na cadeia de PTFE. ....	34
Figura 2-19 – Modelo esquemático do PE deslizando sobre uma superfície de aço. .....	34
Figura 2-20 – Textura de uma superfície com os desvios da forma nominal, ondulação e rugosidade. ....	36
Figura 2-21 – Aplicação de filtro: (a) perfil da superfície original (b) delimitação da linha média (c) perfil filtrado.....	37
Figura 2-22 – Fotografias da máquina de atrito cinético tipo mancal sobre eixo: (a) visão geral (b) detalhe do sistema de medição da força transmitida à célula de carga, cujo dado é fundamental para obtenção do coeficiente de atrito cinético. .....	39
Figura 2-23 – Dimensões do corpo de PTFE: (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva.....	40
Figura 2-24 – Dimensões do contra-corpo de aço inoxidável AISI 304: (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva. ....	40
Figura 3-1 – Pino de PTFE: (a) detalhes de fabricação (b) vista isométrica. ....	41
Figura 3-2 – Contra-corpo de aço inoxidável AISI 304: (a) detalhes de fabricação (b) vista isométrica. ....	42
Figura 3-3 – Corpos de prova recobertos com ouro: (a) pino não ensaiado, de (b) até (e) níveis crescentes de carregamento normal; .....	43

Figura 3-4 – Tribômetro utilizado para a realização dos ensaios. ....	44
Figura 3-5 – Porta-amostras para fixação dos corpos de prova. ....	45
Figura 3-6 – Planejamento das pistas de deslizamento para os ensaios (dimensões em mm). ....	46
Figura 3-7 – Configuração típica do par tribológico antes dos ensaios. ....	47
Figura 4-1 – Dados do coeficiente de atrito cinético em função do tempo para ensaios com quatro níveis de força normal e velocidade de deslizamento e com condição $PV = 0,49 \text{ Mpa.m.s}^{-1}$ constante: (a) nível 1 (b) nível 2 (c) nível 3 (d) nível 4. ....	49
Figura 4-2 – Gráfico comparativo entre os ensaios pino sobre disco (laranja) e mancal sobre eixo (azul). ....	51
Figura 4-3 – Valores médios para o coeficiente de atrito cinético para os quatro níveis de força normal, considerando os últimos cem segundos de ensaio. ....	52
Figura 4-4 – Comparativo entre os ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo dos valores do coeficiente de atrito cinético em relação a força normal. ....	53
Figura 4-5 – Gráficos com a relação entre a temperatura e o tempo de ensaio: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível. ....	54
Figura 4-6 – Comparativo entre os ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo dos valores de temperatura em relação ao tempo de ensaio: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível. ....	55
Figura 4-7 – Comparativo esquemático entre ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo da relação da área de geração de calor: (a.1) vista frontal esquemática - pino sobre disco; (a.2) vista superior esquemática - pino sobre disco; (b) vista esquemática - mancal sobre eixo. ....	56
Figura 4-8 – Desgaste volumétrico médio em função da força normal ....	58
Figura 4-9 – Coeficiente adimensional de Archard para os quatro níveis e o valor determinado por Archard. ....	59
Figura 4-10 – Comparativo entre os valores do coeficiente adimensional de Archard. ....	59

Figura 4-11 – Topografias típicas do contra-corpo, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste: (a) vista superior (b) 3D. ....	60
Figura 4-12 – Perfil de rugosidade típico do contra-corpo, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste. ....	60
Figura 4-13 – Imagens obtidas por MEV: (a) superfície do contra-corpo antes do ensaio de desgaste (b) idem. ....	61
Figura 4-14 – Topografias típicas do contra-corpo, obtidas por IDLB, depois do ensaio de desgaste: (a) vista superior (b) 3D. ....	61
Figura 4-15 – Perfil de rugosidade típico do contra-corpo, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste. ....	62
Figura 4-16 – Imagens obtidas por MEV da superfície do contra-corpo após o ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta vermelha): (a) partícula de desgaste aderida à superfície do aço (b) ampliação da região circulada em (a). ....	62
Figura 4-17 – Comparativo dos parâmetros de rugosidade obtidos dos contra-corpos dos ensaios pino sobre disco (em azul) e mancal sobre eixo (em laranja). ....	64
Figura 4-18 – Topografias típicas do corpo de prova, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste: (a) vista superior (b) 3D. ....	65
Figura 4-19 – Perfil de rugosidade típico do corpo de prova, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste. ....	65
Figura 4-20 – Imagens obtidas por MEV: (a) superfície do corpo de prova antes do ensaio de desgaste (b) idem. ....	66
Figura 4-21 – Topografias, obtidas por IDLB, em vista superior dos corpos de prova após o ensaio de desgaste: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível. ....	67
Figura 4-22 – Topografias, obtidas por IDLB, em 3D dos corpos de prova após os ensaios: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível. ....	68

- Figura 4-23 – Perfis de rugosidade, obtidos por IDLB, dos corpos de prova após os ensaios: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível. .69
- Figura 4-24 – Comparativo dos parâmetros de rugosidade obtidos dos corpos de prova dos ensaios pino sobre disco (em azul) e mancal sobre eixo (em laranja). .....71
- Figura 4-25 – Imagens obtidas por MEV da superfície dos corpos de prova após os ensaios de desgaste (o sentido de deslizamento é indicado pela seta vermelha): (a) nível um (b) nível dois (c) nível três (d) nível quatro. ....72
- Figura 4-26 – Imagens obtidas por MEV das superfícies dos corpos de prova, após os ensaios: (a) região com formação de partículas poliméricas (b) região com desprendimento de partículas poliméricas. ....73
- Figura 4-27 – Imagem obtida por MEV (o sentido de deslizamento é indicado pela seta vermelha) com partículas aderidas à superfície polimérica com riscos alinhados e não alinhados ao sentido de deslizamento. ....73
- Figura 4-28 – Esquema de formação dos produtos do desgaste: (a) contato entre as superfícies (b) falha da junção (c) desprendimento de partícula de desgaste (d) mesclagem das partículas de desgaste (e) formação do filme multicamadas (f) expulsão do filme multicamadas da região de contato.....75
- Figura 4-29 – Imagens obtidas por MEV: (a) filmes multicamadas evidenciando as várias camadas de partículas de desgaste mescladas (b) idem.....76
- Figura 4-30 – Imagens obtidas por MEV: (a) filmes multicamadas aderidas à superfície do contra-corpo (b) idem.....77
- Figura 4-31 – Fotografia de um par tribológico, após o ensaio de desgaste, com a condição típica de vários filmes multicamadas expulsos e o acúmulo de material polimérico nas laterais da pista de deslizamento. ....77
- Figura 4-32 – Imagem obtida por MEV: (a) borda de um corpo de prova com acúmulo de filmes multicamadas (b) idem.....78
- Figura 4-33 – Esquemático do mecanismo de expulsão das partículas (setas vermelhas indicam possível sentido de expulsão das partículas): (a.1) vista lateral

- pino sobre disco (a.2) vista superior - pino sobre disco (b) vista lateral - mancal sobre eixo.....	79
Figura 4-34 – Imagens obtidas por MEV: (a) material polimérico com a presença de fibrilas (b) idem.....	79
Figura 4-35 – Espectros de FTIR para os filmes multicamadas do primeiro e quarto nível de carregamento normal e para o PTFE não submetido ao ensaio de desgaste.....	80
Figura 4-36 – Espectros de FTIR obtidos para os sistemas pino sobre disco e mancal sobre eixo para os filmes multicamadas do quarto nível de carregamento normal. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Planejamento dos ensaios em quatro níveis de força normal. ....	47
Tabela 4-1 – Valores médios do coeficiente de atrito cinético, para os quatro níveis de força normal, considerando somente os últimos cem segundos de ensaio. ....	50
Tabela 4-2 – Taxa de desgaste mássico médio por nível para 500 m deslizamento.	57
Tabela 4-3 – Valores dos parâmetros de rugosidade para o contra-corpo, antes e após os ensaios, para quatro níveis de força normal.....	63
Tabela 4-4 – Valores dos parâmetros de rugosidade para o corpo de prova, antes e após os ensaios, para quatro níveis de força normal. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI:	<i>American iron and steel institute;</i>
EDX:	<i>Energy Dispersive X-ray;</i>
FTIR:	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)
IDLB:	Interferometria de luz branca;
MAC:	Máquina de atrito cinético;
MEV:	Microscopia eletrônica de varredura;
PE:	Polietileno;
PET:	Politereftalato de etileno;
PPMA:	polimetil-metacrilato;
PVC:	Policloreto de vinila;
PTFE:	Politetrafluoretileno;
UHMWPE:	Polietileno de ultra alto peso molecular.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{ap}$	Área de contato aparente [m <sup>2</sup> ];
$A_r$	Área real de contato [m <sup>2</sup> ];
$a_1$	Coefficiente para modelo de atrito de Archard;
$a_2$	Coefficiente para modelo de atrito de Archard;
$dx$	Comprimento diferencial no eixo x [μm];
$dy$	Comprimento diferencial no eixo y [μm];
$f(x, y)$	Altura da superfície em (x,y) [μm];
$\bar{f}$	Altura do plano médio [μm];
$F_N$	Força normal aplicada na interface do contato do par tribológico [N];
$H$	Dureza da superfície mais mole [Pa].
$i$	Parâmetro de contagem;
$K$	Coefficiente de desgaste adimensional [-];
$L_1$	Extensão da amostragem no eixo x [μm];
$L_2$	Extensão da amostragem no eixo y [μm];
$P$	Pressão de contato entre corpo e contra-corpo [MPa];
$P_i$	Altura dos picos mais altos em relação ao plano médio [μm];
$P_{max}$	Altura do maior pico em relação ao plano médio [μm];
$PV$	Parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [MPa.m.s <sup>-1</sup> ];
$Q$	Volume desgastado por distância de deslizamento [m <sup>3</sup> /m];
$r$	Raio da pista de deslizamento [m];
$Sa$	Parâmetro de rugosidade 3D associado com a média aritmética das alturas das rugosidades [μm];
$Sds$	Parâmetro de rugosidade 3D associado à densidade de asperezas por área [mm <sup>-2</sup> ];
$Sq$	Parâmetro de rugosidade 3D associado com a média quadrática das alturas das rugosidades [μm];
$Sp$	Parâmetro de rugosidade 3D associado à altura do maior pico de rugosidade da área de amostragem [μm];
$Sv$	Parâmetro de rugosidade 3D associado à profundidade do vale mais profundo da área de amostragem [μm];
$Sz$	Parâmetro de rugosidade 3D associado com a média de dez pontos da rugosidade, sendo cinco valores associados aos picos mais altos e outros cinco associados aos vales mais profundos [μm];
$t$	tempo de duração do ensaio de desgaste;
$V$	Velocidade de deslizamento [m/s]
$V_i$	Altura dos vales mais profundos em relação ao plano médio [μm];
$V_{max}$	Altura do maior vale em relação ao plano médio [μm];
$\omega$	Velocidade angular [rpm];
$\mu$	Coefficiente de atrito do par tribológico [-];
$\mu_a$	Componente do atrito associada à adesão [-];
$\mu_d$	Componente do atrito associada à deformação [-];
$\xi$	Número de picos da superfície [-];

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>15</b>
1.1	Contexto do tema .....	15
1.2	Caracterização do problema .....	15
1.3	Objetivos.....	16
1.4	Justificativa .....	16
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>18</b>
2.1	Tribossistema .....	18
2.2	Atrito .....	19
2.2.1	Atrito de polímeros .....	20
2.3	Desgaste .....	22
2.3.1	Mecanismos de desgaste em polímeros.....	23
2.3.2	Quantificação do desgaste .....	30
2.4	Severidade do contato.....	32
2.5	Características do PTFE .....	34
2.6	Características do aço inoxidável.....	35
2.7	Topografia .....	36
2.8	Ensaio mancal sobre eixo .....	39
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos .....</b>	<b>41</b>
3.1	Materiais .....	41
3.1.1	Corpo de prova.....	41
3.1.2	Contra-corpo.....	42
3.2	Análise dos materiais .....	42
3.2.1	Análise topográfica .....	42
3.2.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	43
3.2.3	Avaliação dos ensaios de desgaste .....	43
3.2.4	Espectrometria de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	44
3.3	Tribômetro .....	44
3.4	Acessórios para os ensaios .....	45
3.5	Planejamento dos ensaios .....	45
<b>4</b>	<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>48</b>
4.1	Coeficiente de atrito cinético .....	48
4.2	Temperatura no contato .....	53
4.3	Desgaste .....	57
4.3.1	Taxa de desgaste mássico média .....	57
4.3.2	Taxa de desgaste volumétrico média e coeficiente adimensional de Archard .....	57
4.3.3	Alterações topográficas das superfícies submetidas ao desgaste .....	59
4.3.4	Produtos do desgaste.....	74
4.3.5	Alterações nas propriedades dos materiais devido ao ensaio de desgaste. ....	79
<b>5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>Referências .....</b>	<b>85</b>
	Anexo A – Certificado de Fornecimento do PTFE .....	87

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do tema

O movimento relativo entre dois ou mais sólidos é fundamental no funcionamento de componentes mecânicos (HUTCHINGS, 1992), portanto, são raros os equipamentos e máquinas que não necessitam de peças móveis. No entanto, este movimento no contato entre sólidos gera, devido ao atrito, desgaste, o qual é a maior causa de perda de material e de queda de desempenho em componentes mecânicos (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

Estima-se que um terço de toda a energia gerada no mundo seja consumida para superar alguma forma de atrito (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001). Pois uma parcela do trabalho realizado para superar o atrito é dissipada em forma de calor ou outras energias, diminuindo a eficiência das máquinas (HUTCHINGS, 1992).

Um meio de diminuir o atrito, e também o desgaste, é com a aplicação de um filme lubrificante na interface de deslizamento entre os corpos (HUTCHINGS, 1992). Porém, alguns materiais dispensam a aplicação de lubrificante quando em deslizamento sobre outro sólido. Polímeros como: o poliacetal, o polietileno e, em especial, o politetrafluoretileno PTFE, mostram-se excelentes alternativas em se tratando de materiais auto lubrificantes (KHODDAMZADEH, et al., 2009).

Esta característica desperta interesse em se realizar maiores estudos experimentais sobre os materiais autolubrificantes, e assim poder determinar condições de trabalho para elementos de máquinas deles constituídos.

## 1.2 Caracterização do problema

A maior parte das falhas em componentes mecânicos ocorre em suas partes móveis. Para diminuir os efeitos indesejados do atrito e do desgaste, em muitos casos faz-se uso de lubrificantes nestas regiões. Portanto, componentes mecânicos que dispensem lubrificação e ainda assim garantam condições tribológicas apropriadas despertam grande interesse na indústria. Dentre os polímeros que são utilizados como autolubrificantes, o PTFE apresenta características que indicam que sua utilização em

elementos de máquinas pode ser vantajosa, uma vez que sua utilização como componente deslizante não necessita de lubrificação. Contudo, para especificação das condições de trabalho de componentes mecânicos constituídos de PTFE, é fundamental a realização de estudos experimentais.

### **1.3 Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento da temperatura no contato, coeficiente de atrito cinético e desgaste das superfícies para o par tribológico PTFE-aço inoxidável em deslizamento, sem lubrificação, em ensaio pino sobre disco. Pretende-se como objetivo secundário comparar os resultados com ensaio, não normalizado, do tipo mancal sobre eixo.

### **1.4 Justificativa**

Quando analisados individualmente, os custos provenientes do atrito e do desgaste de componentes mecânicos podem parecer pequenos. Porém, quando avaliados em um aspecto global, estes custos podem atingir valores muito significativos (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

Estima-se que 1% do produto interno bruto de uma nação possa ser economizado facilmente com a realização de estudos básicos sobre atrito (HUTCHINGS, 1992).

Estudos apontam que melhorando o rendimento de todos os componentes mecânicos existentes nos Estados Unidos em 5%, através de melhores condições de lubrificação, geraria uma economia de 0,6 bilhões de dólares por ano (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001), economia esta que poderia ser ainda maior com a utilização de componentes que dispensassem totalmente lubrificação.

A motivação deste trabalho vem da ampla expectativa de redução de custos de toda uma nação com um maior domínio das condições de trabalho de equipamentos constituídos por materiais que dispensem lubrificante.

Os trabalhos de Do Vale (2014) serviram como um incentivo ainda maior no estudo das especificações do uso do PTFE como elemento não lubrificado, pois

propõem ensaios inovadores que pretendem simular com melhor precisão as condições reais de elementos de máquinas constituídos pelo polímero em questão. Assim, com o estudo proposto podem-se verificar dados de ensaios não normalizados como o ensaio de mancal sobre eixo (que simula uma condição próxima da real) com ensaios padronizados mais comumente encontrados na literatura.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados assuntos referentes à tribologia dos polímeros. Focaram-se discussões sobre o PTFE, material que é o objeto de estudo no presente trabalho. Também são abordadas, embora brevemente, as características dos aços inoxidáveis, pois é o material utilizado como contra-corpo nos ensaios. Por fim uma breve revisão sobre topografia, com definições e os parâmetros de rugosidade utilizados.

### 2.1 Tribossistema

Para o completo entendimento de um sistema tribológico é fundamental a total definição deste. Para isso, faz-se necessária a definição sistemática do corpo e contra-corpo (antes e depois do contato), dos materiais envolvidos (propriedades mecânicas e físico-químicas) e das propriedades do meio e do contato. Também devem ser considerados os produtos de desgaste gerados durante o contato. Num contexto geral, o comportamento tribológico está associado ao tribossistema e não a um material em particular. A Figura 2-1 representa um tribossistema.

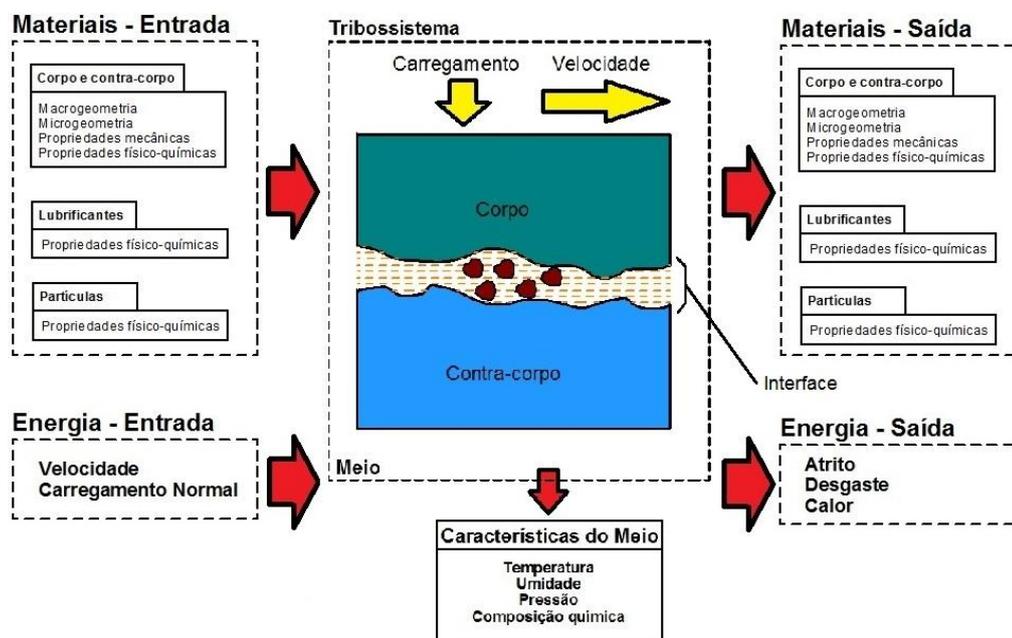


Figura 2-1 – Componentes de um tribossistema.

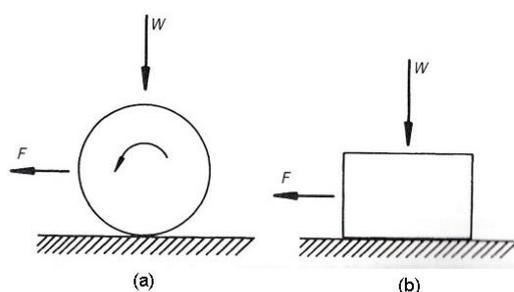
Fonte: Do Vale (2014).

Conforme pode ser visto na Figura 2-1, também faz-se necessário deter conhecimento sobre os parâmetros de carregamento e de velocidade de deslizamento, pois estes compõem a energia de entrada do sistema e possuem extrema influência no desempenho tribológico do contato (SILVA, 2003).

Na próxima seção é apresentada a definição do atrito e outras definições.

## 2.2 Atrito

Segundo Hutchings (1992), pode-se definir como força de atrito a resistência encontrada por um corpo ao deslizar ou rolar sobre outro. Para que exista movimento, faz-se necessária a existência de uma força tangencial que retire o corpo superior do estado estacionário, conforme ilustrado na Figura 2-2. A razão entre a força de atrito  $F$  e o carregamento normal  $W$  é conhecida como coeficiente de atrito,  $\mu$ .



**Figura 2-2 – Força de atrito  $F$  necessária para promover movimento por (a) rolagem e (b) deslizamento.**

**Fonte: Adaptado de Hutchings (1992).**

Vários modelos são úteis para o estudo da força de atrito. Os recentes associam o mecanismo de atrito a duas componentes: a deformação (asperezas de uma superfície mais dura arrastando sobre um material mais macio) e adesão (junções que ocorrem no contato entre as superfícies devido às ligações secundárias entre os átomos de cada corpo). As duas componentes não são de fato independentes, mas, muitas vezes, são tratadas separadamente a fim de facilitar o entendimento dos fenômenos envolvidos (BOWDEN & TABOR, 1950). O coeficiente de atrito, então, é equivalente a soma das parcelas de adesão e de deformação, mostrada na Equação (1) representadas na Figura 2-3.

$$\mu = \mu_a + \mu_d \quad (1)$$

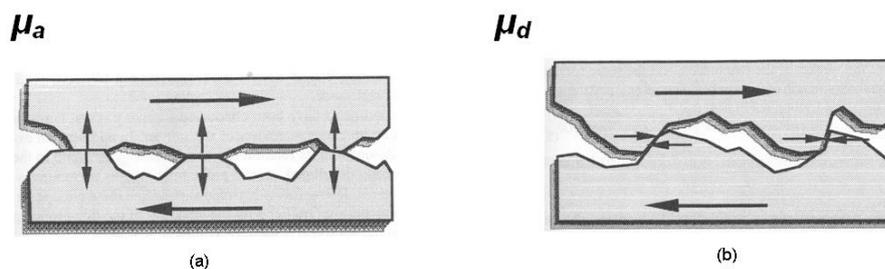


Figura 2-3 – Componentes do coeficiente de atrito conforme modelo de Bowden e Tabor: (a) adesão e (b) deformação.

Fonte: Adaptado de Blau (1996).

### 2.2.1 Atrito de polímeros

Os polímeros utilizados para aplicações tribológicas na engenharia são colocados, comumente, em contato contra materiais mais duros, como os metais. O principal motivo para a eficiência no contato entre polímeros e metais se deve à formação de filme transferido durante o deslizamento, o qual diminui o atrito (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001). Contudo, não são todos os tipos de polímeros que apresentam este comportamento.

Uma característica importante no atrito entre polímeros, e entre metais e polímeros, é o predomínio do contato elástico. Isso difere fundamentalmente o atrito no contato entre metais. Um segundo fator que diferencia o comportamento tribológico dos polímeros, é que os mesmos são visco-elásticos, ou seja, suas propriedades mecânicas são dependentes do tempo. O coeficiente de atrito no contato entre polímeros, ou no contrato entre metais e polímeros, varie entre 0,1 e 0,5 (HUTCHINGS, 1992).

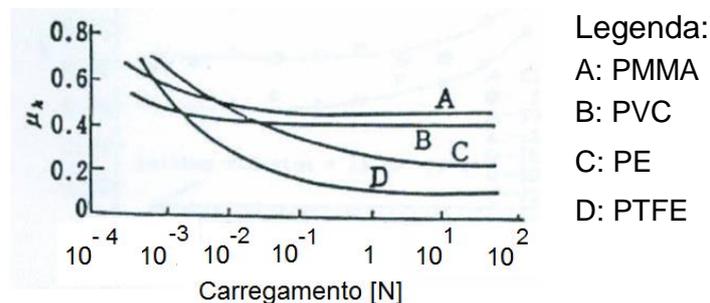
Conforme explicado na Seção 2.2, o coeficiente de atrito é a soma das parcelas de adesão e de deformação. Na Figura 2-4, evidencia-se as duas zonas afetadas durante o deslizamento entre metal e polímero: zona de cisalhamento e zona de deformação.



**Figura 2-4 – Delimitação das zonas de cisalhamento e deformação a partir do deslizamento da aspereza dura contra o polímero.**

Fonte: Adaptado de Hutchings (1992).

De forma geral, a maior componente das forças de atrito provém da adesão em detrimento da deformação. Quando a sollicitação é mais elevada, a componente da deformação é mais significativa (SEABRA, 2000). Nessas situações em que o carregamento é elevado fica evidenciado uma diminuição do coeficiente de atrito (HUTCHINGS, 1992), conforme pode ser evidenciado na Figura 2-5.



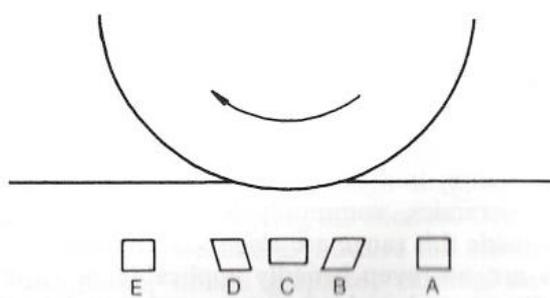
**Figura 2-5 – Comportamento do coeficiente de atrito cinético em relação ao carregamento normal aplicado para diversos polímeros em deslizamento sem lubrificação contra aço.**

Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990).

Nas seções subsequentes são avaliadas as parcelas do atrito por deformação e adesão.

### 2.2.1.1 Atrito devido à deformação

No momento em que uma aspereza dura desliza sobre um polímero existe dissipação energética na área de contato associada a um aumento de temperatura, de forma que se torna praticamente impossível a dissociação e a quantificação das parcelas da adesão e da deformação para o atrito (SEABRA, 2000). A fim de minimizar a parcela associada à adesão, pode-se considerar um sistema com uma esfera rígida, em contato lubrificado, rolando sobre um polímero, conforme ilustra a Figura 2-6.



**Figura 2-6 – Comportamento da superfície polimérica devido a passagem de uma esfera rígida rolante.**

Fonte: Hutchings (1992).

Na figura pode-se perceber a existência da deformação elástica na superfície de contato, sem deformação plástica do material. Isso é possível pois o polímero consegue armazenar energia elástica que, após a passagem da esfera, é devolvida ao sistema, exceto por uma pequena parcela correspondente à perda por histerese (SEABRA, 2000). A deformação e a posterior recuperação sofrida pela superfície evidenciam as características visco elásticas do polímero.

#### 2.2.1.2 Atrito devido à adesão

A força de adesão está geralmente relacionada à presença de átomos de não metais, como o flúor, nos polímeros. Estes átomos, localizados no contato metal-polímero, ligam-se com os átomos do metal, geralmente por ligações de Van Der Waals, caracterizando a adesão. A força encontrada nessas ligações normalmente é grande o suficiente para arrancar pequenas parcelas do polímero (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001), promovendo a transferência de material polimérico para o metal.

### 2.3 Desgaste

Em seu livro Stachoviak e Batchelor (2001) afirmam: “*Atrito é a principal causa de desgaste e dissipação de energia*”. Este desgaste por sua vez é apontado como a maior causa de desperdício de material e perda de desempenho em componentes mecânicos. Costumeiramente os mecanismos de desgaste são divididos em classes relacionadas às condições operação em que estes ocorrem (adesivo, abrasivo, por fadiga, por fusão, por erosão, por cavitação, corrosivo, oxidativo, etc.)

Um destes mecanismos, muito presente quando da utilização de PTFE, é o desgaste por adesão de filme transferido (HUTCHINGS, 1992). De modo geral, lâminas de PTFE se desprendem e aderem de forma contínua ao outro corpo do par de deslizamento, estas lâminas aderidas formam uma espécie de filme que facilita o deslizamento entre os corpos e desta maneira diminuem o atrito e por consequência o desgaste (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001)

Estes mecanismos serão abordados na seção 2.3.1, porém com maior detalhe para os desgastes adesivo e abrasivo, tendo em vista o que concerne este trabalho.

Além de qualificar o desgaste, faz-se necessário quantificá-lo. Um modelo apropriado para tal é o proposto por Archard (1953). Este modelo permitirá a comparação dos resultados encontrados nesta pesquisa com os apresentados por Do Vale (2014), assim como com demais experimentos.

### **2.3.1 Mecanismos de desgaste em polímeros**

Como dito na seção 2.3, existem algumas maneiras clássicas, adotadas de forma geral, para denominar os mecanismos de desgaste de acordo com suas características. Genericamente os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro grandes grupos: desgaste por adesão (normal e por filme transferido), desgaste por abrasão; desgaste por fadiga; desgaste por corrosão (SEABRA, 2000).

Alguns autores mencionam ainda outros tipos de desgaste como: por erosão, por cavitação, “*fretting*”, por fusão etc. (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001). Porém, Seabra (1998) afirma que estes fenômenos derivam daqueles quatro grandes grupos de classificação.

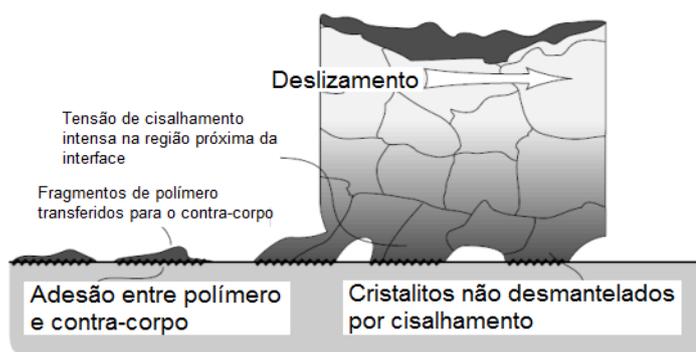
Quando duas superfícies lisas deslizam entre si, partículas, em função do movimento relativo e do atrito, desprendem-se dos corpos de origem. Estas partículas arrancadas podem adotar comportamentos distintos, podem simplesmente ser expulsas da interface, podem permanecer na região de contato e se tornarem causadores de desgaste por abrasão, podem também se aderir a superfície do outro material, assim como simplesmente retornarem ao corpo de origem. Geralmente as partículas desprendidas pertencem ao material de menor dureza do par tribológico (SEABRA, 2000).

Qualquer substância capaz de formar uma camada contaminante entre as superfícies em deslizamento, dificulta (ou até mesmo impossibilita) a adesão entre as partículas do par tribológico. Esta camada contaminante pode ser formada até mesmo pelo ar atmosférico presente entre os corpos. Maiores valores de rugosidade e dureza contribuem negativamente no aparecimento da adesão no contato entre superfícies (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

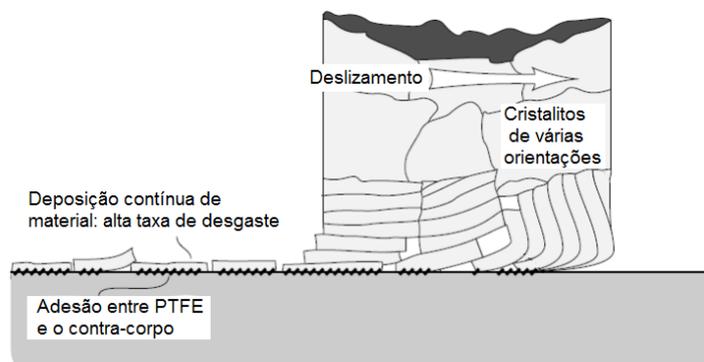
Se a superfície do contra-corpo apresentar baixa rugosidade, o desgaste tende a ser constituído pela adesão entre partículas. No caso de maiores rugosidades, as asperezas atuam na superfície do corpo de prova provocando deformações plásticas que, quando atingem certa profundidade, levam a desgaste por abrasão, ou geram, através da propagação de trincas, desgaste por fadiga (HUTCHINGS, 1992).

#### **2.3.1.1 Desgaste por adesão**

No desgaste por adesão, a transferência do material polimérico ocorre de duas maneiras distintas, dependendo do polímero em questão. A grande maioria dos polímeros apresenta o mecanismo de transferência normal (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001), esquematizado na Figura 2-7. Já alguns outros polímeros apresentam transferência de segmentos da cadeia do material, em que o desprendimento acontece sem o rompimento intermolecular, apresentado esquematicamente na Figura 2-8. Esta segunda forma de transferência de material é conhecida como filme transferido e acontece em polímeros com baixa força de coesão intermolecular, como por exemplo, o PTFE (HUTCHINGS, 1992).



**Figura 2-7 – Mecanismo de transferência normal, apresentado pela maior parte dos polímeros.**  
**Fonte: Adaptado de Stachoviak e Batchelor (2001).**



**Figura 2-8 – Desgaste e mecanismo de transferência de filme de PTFE em contra-corpo.**  
**Fonte: Adaptado de Stachoviak e Batchelor (2001).**

Como dito, são poucos os polímeros que se comportam de maneira semelhante ao PTFE no que diz respeito ao desgaste por filme transferido. A vasta maioria dos polímeros apresenta comportamento diferente no desgaste por adesão. Nestes polímeros o rompimento das junções causa o desprendimento de partículas, fragmentos, que são transferidos desta forma para o contra-corpo. Este fenômeno é conhecido comumente como transferência normal, e apresenta pouca contribuição vantajosa em relação ao atrito e a resistência ao desgaste, uma vez que as partículas transferidas possuem diâmetro médio de 1  $\mu\text{m}$ , sendo assim ineficazes na absorção das cargas aplicadas no deslizamento (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

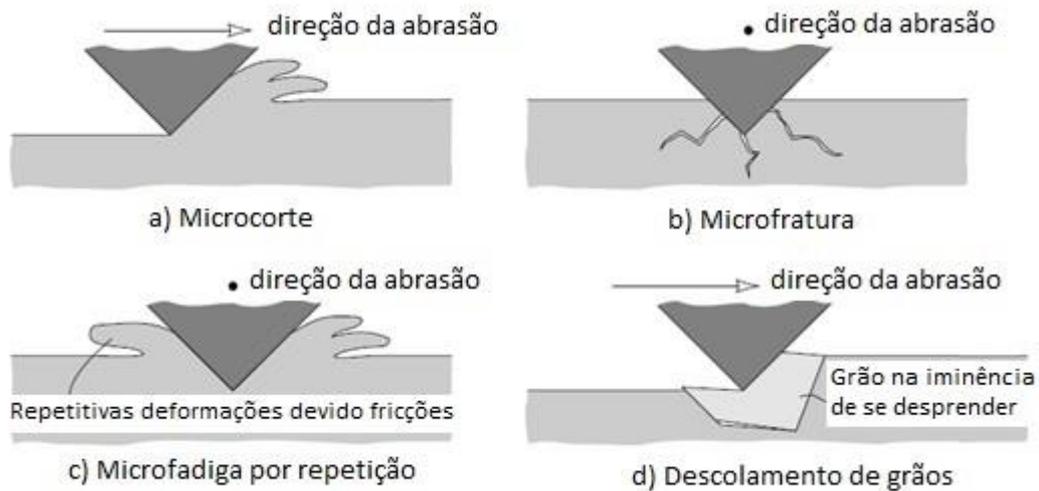
Quando deslizada contra uma superfície de metal, o PTFE perde material em forma de laminas para esta superfície. Este fenômeno resulta em um menor atrito, porém impõem altas taxas de desgaste ao polímero, o que muitas vezes limita sua aplicação (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

O desgaste causado na situação de transferência de filme aparenta depender mais da quantidade de material que é removido do filme localizado no contra-corpo, do que da quantidade de polímero transferido para o filme, pois uma vez formado o filme transferido, o contato de deslizamento deixa de ser metal-polímero e passa a ser polímero-polímero (HUTCHINGS, 1992). A formação do filme fortemente aderido à superfície do contra-corpo geralmente melhora significativamente o comportamento tribológico do sistema devido a diminuição do atrito e do desgaste do material (RYMUZA, 2007).

### **2.3.1.2 Desgaste por abrasão**

O desgaste abrasivo ocorre quando um material, de maior dureza e considerável rugosidade, desliza com carga aplicada sobre um material mais mole. (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001). O contato entre as asperezas proporciona atrito, proveniente da deformação, como já mostrado na Figura 2-3, o deslizamento nestas condições gera riscos de indentações, podendo arrancar material do corpo. O material eventualmente arrancado desprende-se podendo tornar-se também partícula de desgaste (SEABRA, 2000).

Stachoviak e Batchelor (2001) apontam quatro principais formas de se ter o desgaste por abrasão: microcorte, microfratura, descolamento de grãos (mais comumente encontrada em cerâmicos) ou microfadiga por repetidas deformações – cujos esquemas estão representados na Figura 2-9. A remoção de material, tanto por microcorte quanto por microfratura, pode ser ocasionada pelo movimento relativo entre o corpo e as asperezas do contra-corpo (ou partículas abrasivas). Partículas abrasivas que passem repetidas vezes por uma região de uma superfície proporcionam a remoção de material por microfadiga. O descolamento de grão ocorre de modo que a interação entre os corpos é capaz de expulsar um grão inteiro da superfície desgastada (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).



**Figura 2-9 – Mecanismos de desgaste por abrasão.**

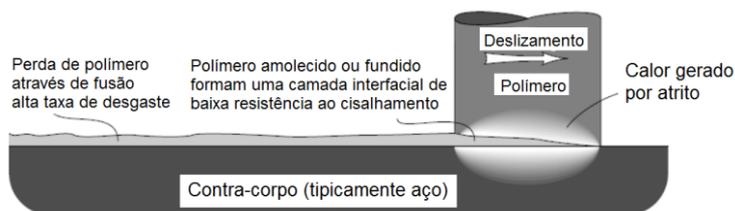
Fonte: Adaptado de Stachoviak e Batchelor (2001).

Devido às condições do corpo e do contra-corpo a serem utilizados neste trabalho, este mecanismo não deve apresentar significativa influência no desgaste.

### 2.3.1.3 Desgaste por fusão

Por apresentarem baixa condutividade térmica e baixo ponto de fusão, os polímeros podem alcançar, no contato entre as superfícies, temperaturas capazes de causar amolecimento ou mesmo fusão do material, ou ainda a sua degradação, durante o deslizamento.

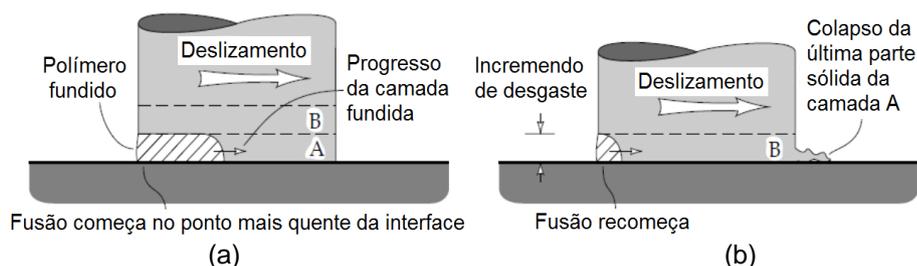
Ocorrendo isto, uma fina camada do polímero é transferida, prendendo-se no contra-corpo, que não chega a ser danificado, pois, se tratando normalmente de um metal, apresenta temperatura de fusão muito maior do que as atingidas no contato (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001). A Figura 2-10 esquematiza esta situação.



**Figura 2-10 – Mecanismo de desgaste por fusão em polímeros causado por elevadas temperaturas de contato alcançadas durante o deslizamento.**

Fonte: Adaptado de Stachoviak e Batchelor (2001).

É importante salientar que a temperatura crítica do contato não é, necessariamente, a temperatura de fusão do polímero. Quando isto ocorre, a temperatura não é suficientemente alta para causar a fusão contínua do material. Esta fusão parcial se dá de maneira cíclica, iniciando no ponto mais quente do contato e se propagando até a fusão completa de uma camada. Com o despreendimento desta camada fundida, o ciclo inicia-se novamente, em outra. A Figura 2-11 mostra o processo detalhadamente.



**Figura 2-11 – Mecanismos de fusão cíclica de polímeros em deslizamento a temperaturas abaixo da crítica: (a) início do processo de fusão (b) finalização da fusão da camada e reinício do ciclo.**

Fonte: Adaptado de Stachoviak e Batchelor (2001).

Este mecanismo de desgaste está vinculado fortemente à temperatura de contato e severidade do contato, conforme será discutido na Seção 2.4.

Podem ainda ocorrerem fusões localizadas, as quais ocorrem no contato entre o topo das asperezas do par tribológico, onde se verificam temperaturas mais altas que as encontradas na interface. Isto pode levar a alterações localizadas na superfície do polímero, mesmo que este não venha a fundir (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

### 2.3.1.4 Formação de Fibrilas

Um mecanismo associado ao desgaste observado nos polímeros é a formação de fibrila. Este fenômeno, que está relacionado à fase cristalina apresentada pelo polímero, vem de natureza de falha dúctil, e ocorre conforme é apresentado na Figura 2-12. Segundo Kitamura *et al.* (2000) a formação da fibrila é um processo que desenrola as regiões cristalinas, gerando uma estrutura similar a uma fita cristalina, com significativa elevação do grau de cristalinidade.

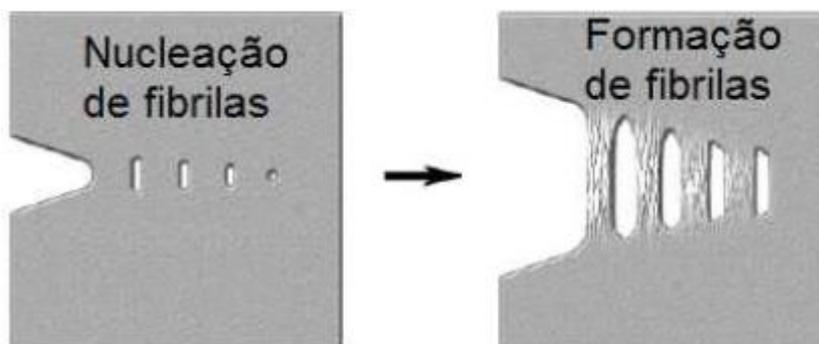


Figura 2-12 – Representação esquemática da formação de fibrilas.

Fonte: Adaptado por Vale e Silva (2015) de Brown e Dattelbaum (2005).

O PTFE apresenta três regiões cristalinas muito próximas, segundo (BROWN & DATTELBAUM, 2005) e (CONTE, *et al.*, 2013), as quais são associadas a condições de baixa pressão e temperatura, com transições entre 19 e 30°C, conforme mostra Figura 2-13.

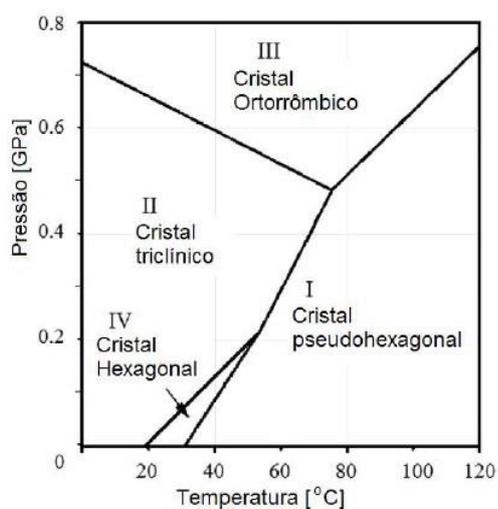


Figura 2-13 – Diagrama de fase do PTFE em função de pressão e temperatura.

Fonte: Adaptado por Vale e Silva (2015) de Conte *et al* (2013).

Nas fases I e IV existe maior capacidade de deformação na vizinhança dos microvazios, o que favorece a nucleação das fibrilas, conforme pode ser visto na Figura 2-12.

### 2.3.2 Quantificação do desgaste

Na tentativa de quantificar o desgaste e criar uma forma de comparar resultados entre experimentos distintos, Archard (1953) determinou que a taxa de desgaste por deslizamento independe da área aparente de contato ( $A_{ap}$ ) – medida geométrica da superfície – e sim da área de contato real entre os corpos ( $A_r$ ) – área de contato entre as asperezas das duas superfícies – que por sua vez está diretamente relacionada à carga aplicada sobre o corpo em deslizamento. Quanto maior o carregamento aplicado, maior a deformação local e, portanto, maior o número de asperezas em contato na superfície de deslizamento. Como pode ser visto na Figura 2-14, os polímeros apresentam uma faixa de aplicação reduzida em meio aos materiais de engenharia.

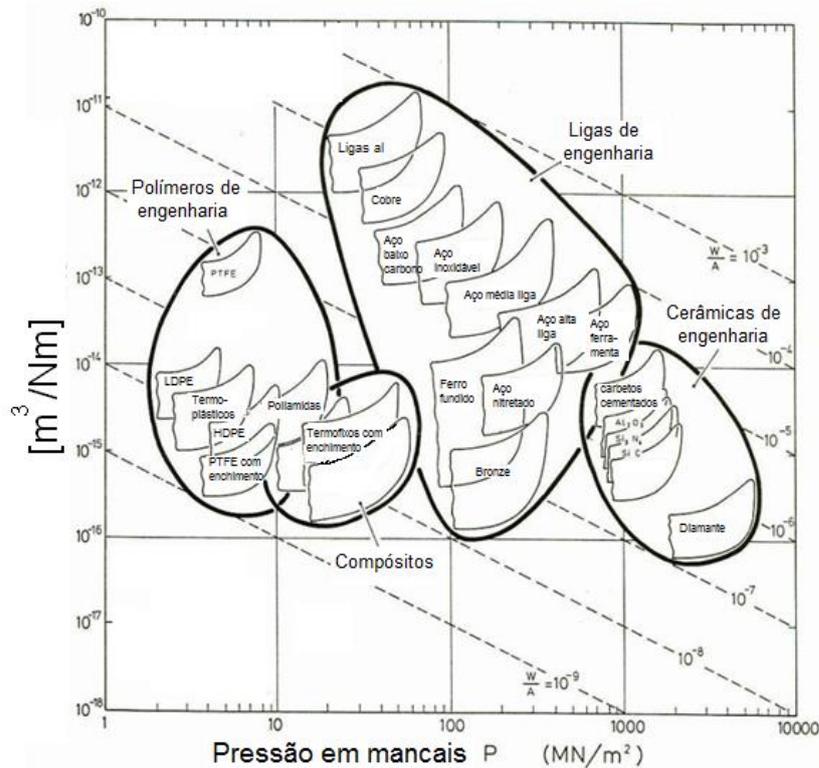


Figura 2-14 – Mapeamento qualitativo de desgaste em função da pressão de contato para diversos materiais.

Fonte: Adaptado de ASHBY (1992).

Outro fator que interfere diretamente no volume de (ou probabilidade de ocorrer) desgaste é a distância de deslizamento percorrida. Durante o deslizamento, as regiões mais proeminentes (asperezas) das superfícies entram em contato ao passarem uma sobre a outra. Neste momento existe uma probabilidade de ocorrer deformação plástica e conseqüentemente o desgaste na interface de deslizamento – como representado na Figura 2-15.

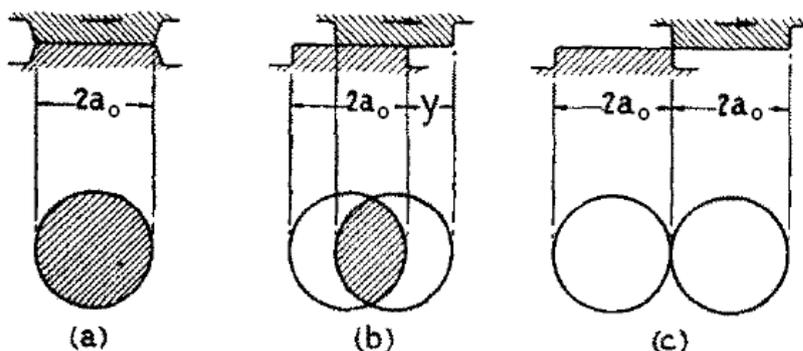


Figura 2-15 – Representação idealizada do contato em superfícies simples de deslizamento. (a) Contato máximo da área com raio  $a$ ; (b) Após deslizar por um comprimento  $y$ ; (c) Após deslizar por um comprimento  $2a$ , área de contato nula.

Fonte: Archard (1953).

Para cada encontro entre asperezas ao longo do movimento de deslizamento esta probabilidade se repete (HUTCHINGS, 1992).

Ao transcrever essa teoria em forma algébrica, Archard (1956) apresentou a Equação (2):

$$Q = K \frac{F_N}{H} \quad (2)$$

Em que:

- Q: Volume de desgaste por distância de deslizamento [ $m^3/m$ ];
- K: Coeficiente de desgaste adimensional [-];
- $F_N$ : Carregamento normal [N];
- H: Dureza da superfície mais mole [Pa].

Desta forma, podemos avaliar que este fator Q é proporcional ao valor de K, que por sua vez está relacionado à proporção de asperezas em contato que resultam em desgaste. O valor de K nunca deve exceder o valor unitário e, na prática, seu valor costuma ser da ordem de 0,001, com exceção para condições muito severas de

desgaste. Valores baixos de K sugerem que o desgaste ocorre devido apenas à uma pequena porção dos contatos entre asperezas (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001).

Com este valor de K é possível comparar as condições de severidade de desgaste em diversos sistemas para uma determinada classe de material (HUTCHINGS, 1992).

#### **2.4 Severidade do contato**

A velocidade de deslizamento e a pressão estão diretamente associadas a severidade do contato. Avaliar a severidade de contato é importante para estudos tribológicos uma vez que é oportuno para efeitos comparativos, assim sendo, justifica-se quantificar a magnitude da pressão de contato e a velocidade de deslizamento. Com este intuito, estabelece-se um parâmetro chamado de condição PV, que é o produto da velocidade de deslizamento e a pressão de contato, cuja unidade é MPa.m.s<sup>-1</sup> (YAMAGUCHI, 1990).

Em algumas situações, dependendo das condições do deslizamento, o material pode atingir seu ponto de fusão, ou apresentar mudanças consideráveis nas suas propriedades devido ao aquecimento causado pelo atrito. Quando o material não consegue mais suportar a condição que está sendo imposto, pode-se dizer que o material alcançou a condição de PV limite, a qual está associada a uma temperatura limite. Materiais com baixa condutividade térmica e baixo ponto de fusão merecem atenção especial com relação ao PV limite (YAMAGUCHI, 1990). A Figura 2-16 mostra o comportamento da temperatura em relação a crescentes condições PV. Pode-se perceber que a temperatura se estabiliza para diferentes condições PV até alcançar a condição PV limite (PV<sub>máx</sub> na figura), na qual ocorre fusão do material.

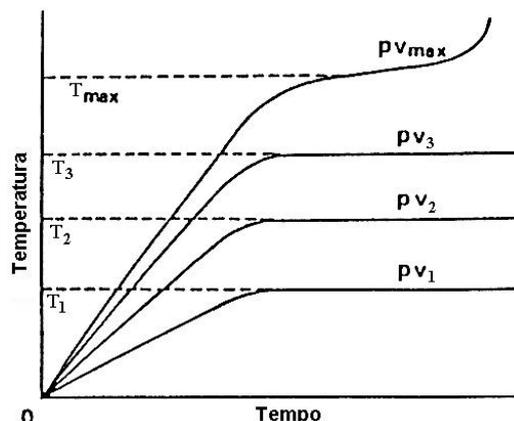


Figura 2-16 – Curvas de temperatura em função de diferentes condições PV  
 Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990).

O carregamento e a velocidade de deslizamento afetam a temperatura do contato, pois ambos controlam a energia que é dissipada na interface. A velocidade de deslizamento também afeta a condução térmica na superfície. Com baixas velocidades o calor gerado é facilmente dissipado, assegurando que a temperatura na superfície mantenha-se baixa. Com altas velocidades, apenas uma parcela do calor consegue ser conduzido, assim sendo, a temperatura na superfície se tornará alta (HUTCHINGS, 1992).

O aumento na velocidade de deslizamento promove aumento do coeficiente de atrito cinético (QUAGLINI, et al., 2009). A Figura 2-17 ilustra o comportamento do coeficiente de atrito cinético em relação à velocidade de deslizamento do PTFE sem lubrificação e com pressão de contato de 30 e 35 MPa, contra aço inoxidável AISI 304 com acabamento polido ( $R_a=0,1$  a  $0,2 \mu\text{m}$ ).

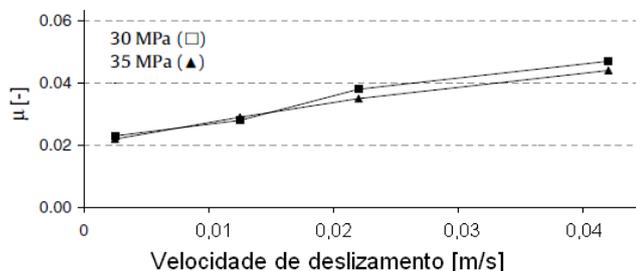


Figura 2-17 – Relação do atrito cinético em função da velocidade de deslizamento de PTFE contra aço austenítico polido ( $R_a=0,10$  a  $0,20 \mu\text{m}$ ) com pressões de contato 30 e 35 MPa.  
 Fonte: Adaptado de Quaglioni et al. (2009).

## 2.5 Características do PTFE

O politetrafluoretileno, como a maioria dos polímeros, é um derivado sintético do petróleo constituído basicamente de hidrocarbonetos. Sua cadeia molecular é composta pela sucessão de uma enorme quantidade de pequenas unidades repetidas, unidas por ligações covalentes (SEABRA, 2000). Na Figura 2-18 é apresentada a unidade repetida do PTFE.

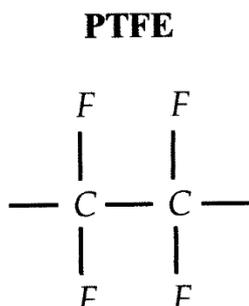


Figura 2-18 – Unidade de repetição na cadeia de PTFE.

Fonte: Adaptado de Seabra (2000).

O entendimento da formação do filme transferido é essencial no estudo tribológico deste material. Para isto, apresenta-se na Figura 2-19 o modelo esquemático do contato entre polietileno (PE) e uma superfície de aço, polímero este que, como o PTFE, também desenvolve o característico filme transferido.

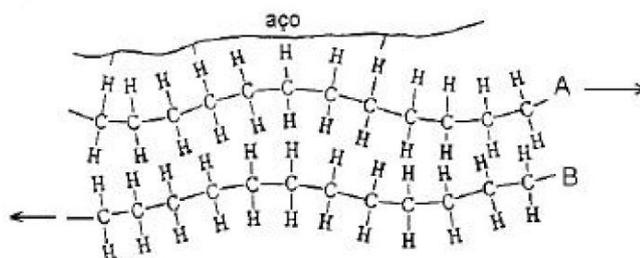


Figura 2-19 – Modelo esquemático do PE deslizando sobre uma superfície de aço.

Fonte: Adaptado de Yamaguchi (1990).

As ligações dos átomos nas camadas do polímero são do tipo covalente (caracteristicamente forte) e as ligações entre as cadeias são bastante fracas, do tipo Van Der Waals. No momento em que ocorre contato entre as superfícies, surgem forças de adesão entre a camada mais externa do polímero e o aço que vencem a força de atração existente entre as cadeias. Assim sendo, surge movimento relativo

entre as cadeias A e B durante este deslizamento, e o material passa aderir ao aço na forma lâminas de polímero. Com a continuidade do movimento na mesma direção, e sobre a mesma trilha, haverá redução do atrito (YAMAGUCHI, 1990).

## 2.6 Características do aço inoxidável

A principal característica dos aços inoxidáveis é a alta resistência à corrosão em diversos ambientes. Isso se deve principalmente ao alto teor de cromo em sua composição (de pelo menos 11%). É comum a adição de níquel e molibdênio para aumentar essa resistência à corrosão (CALLISTER, 2007).

Os aços inoxidáveis eram divididos em três classes que se baseavam de acordo com fase predominante na microestrutura: martensítica, ferrítica e austenítica. Os aços inoxidáveis martensíticos podem ser tratados termicamente a fim de manter a martensita com o seu principal microconstituente. Já os austeníticos e ferríticos são endurecidos através de trabalho a frio, visto que não são tratáveis termicamente. Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam a maior resistência a corrosão entre as três classes, isso se deve ao alto teor de cromo associado a adições de níquel (CALLISTER, 2007).

Atualmente existem outras classificações para os aços inoxidáveis, além das já citadas. Existe um grupo classificado como “Endurecíveis Por Precipitação”, este grupo de aços são endurecíveis por envelhecimento, por conta disso, apresentam alguma similaridade com os aços martensíticos, porém com processo metalúrgico diferente. Há também aços inoxidáveis classificados como “Dúplex”, que possuem esta denominação pois os aços desse grupo possuem estrutura mista de austenita e ferrita, desta forma possui características de ambos os tipos, austeníticos e ferríticos (ABINOX, 2014).

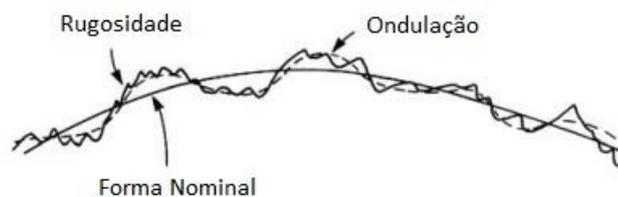
Há ainda outras “famílias” de aços inoxidáveis, bem como: super ferríticos, super austeníticos, super dúplex, martensíticos soldáveis de baixo carbono, aços austeníticos endurecíveis por precipitação, dentre outros (ABINOX, 2014).

Os aços inoxidáveis também são bastante utilizados a altas temperaturas e em ambientes severos porque possuem grande resistência à oxidação e conseguem

manter integridade nas suas propriedades mecânicas nessas condições (CALLISTER, 2007).

## 2.7 Topografia

Quase todas as superfícies conhecidas são rugosas, ou seja, a maior parte delas não é composta de regiões planas mas sim de sucessivos picos e vales. O perfil de uma superfície rugosa é quase sempre aleatório, a não ser que algum recurso padrão tenha sido deliberadamente introduzido (STACHOVIK & BATCHELOR, 2001). A rugosidade superficial é a parte associada às irregularidades deixadas na superfície após processo de fabricação. De forma geral a textura de uma superfície é composta pela forma nominal, ondulação e rugosidade (WHITEHOUSE, 2003), como mostra a Figura 2-20.



**Figura 2-20 – Textura de uma superfície com os desvios da forma nominal, ondulação e rugosidade.**

**Fonte: Whitehouse (2003)**

A fim de reduzir possíveis erros na medição da rugosidade é comum a utilização de filtros, conforme mostrado na Figura 2-21. A aplicação de filtros requer uma parcela menor da forma de onda original, assim sendo, também diminui a quantidade de informação utilizada e, conseqüentemente, otimiza a operação (WHITEHOUSE, 2003).

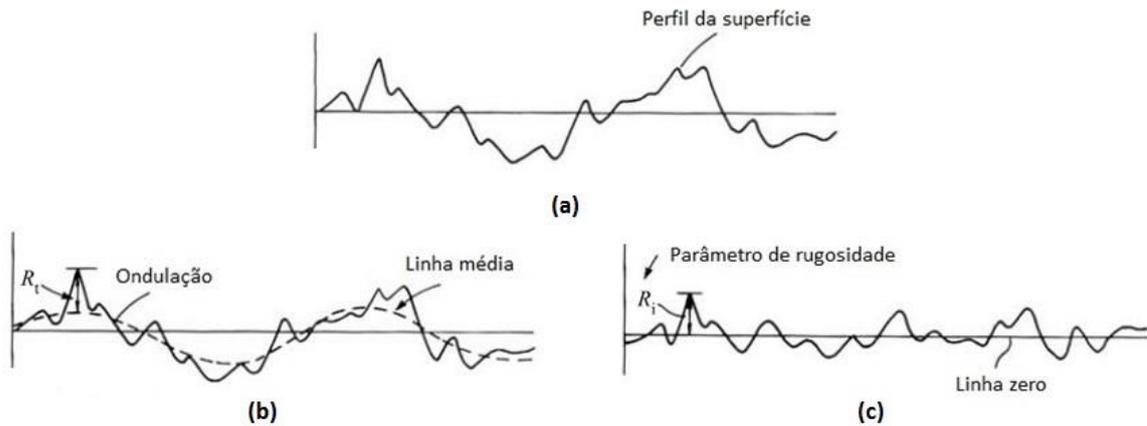


Figura 2-21 – Aplicação de filtro: (a) perfil da superfície original (b) delimitação da linha média (c) perfil filtrado.

Fonte: adaptado de Whitehouse (2003).

A linha média observada na Figura 2-21 é posicionada de forma que a área medida a cima da linha seja equivalente a área abaixo da mesma. A linha média é utilizada em vários parâmetros de rugosidade 2D e, análogo ao conceito dela, o plano médio é empregado para parâmetros 3D.

Na sequência são apresentados os parâmetros de rugosidade 3D utilizados neste trabalho.

### a) Parâmetro Sa [µm]

O parâmetro de rugosidade Sa está associado a média aritmética das alturas das asperezas em relação ao plano médio. A fórmula é apresentada na Equação (3) (WHITEHOUSE, 2003).

$$Sa = \frac{1}{L_1 L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} |f(x, y) - \bar{f}| dx dy \quad (3)$$

onde:

- $L_1$ : Extensão da amostragem no eixo x [µm];
- $L_2$ : Extensão da amostragem no eixo y [µm];
- $f(x, y)$ : Altura da superfície em (x,y) [µm];
- $\bar{f}$ : Altura do plano médio [µm];
- $dx$ : Comprimento diferencial no eixo x [µm];
- $dy$ : Comprimento diferencial no eixo y [µm];

### b) Parâmetro Sq [µm]

O parâmetro  $Sq$  está associado com a média quadrática das alturas das rugosidades em relação ao plano médio. A fórmula é apresentada na Equação (4) (WHITEHOUSE, 2003).

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{L_1 L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} |f(x, y) - \bar{f}|^2 dx dy} \quad (4)$$

### c) Parâmetro $Sz$ [ $\mu\text{m}$ ]

O parâmetro  $Sz$  está associado com a média obtida entre dez pontos de rugosidade, sendo cinco pontos obtidos dos picos mais altos e outros cinco pontos dos vales mais profundos em relação ao plano médio. A fórmula é apresentada na Equação (5)(12) (WHITEHOUSE, 2003).

$$Sz = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |P_i| + \sum_{i=1}^5 |V_i| \right) \quad (5)$$

onde:

- $P_i$ : Altura dos picos mais altos em relação ao plano médio [ $\mu\text{m}$ ];
- $V_i$ : Altura dos vales mais profundos em relação ao plano médio [ $\mu\text{m}$ ];
- $i$ : Parâmetro de contagem;

### d) Parâmetro $Sp$ [ $\mu\text{m}$ ]

O parâmetro  $Sp$  está associado à altura do maior pico em relação ao plano médio. A fórmula é apresentada na Equação (6) (WHITEHOUSE, 2003).

$$Sp = P_{max} \quad (6)$$

onde:

- $P_{max}$ : Altura do maior pico em relação ao plano médio [ $\mu\text{m}$ ];

### e) Parâmetro $Sv$ [ $\mu\text{m}$ ]

O parâmetro  $Sv$  está associado à altura do maior vale em relação ao plano médio. A formula é apresentada na Equação (7) (WHITEHOUSE, 2003).

$$Sv = |V_{max}| \quad (7)$$

onde:

$V_{max}$ : Altura do maior vale em relação ao plano médio [ $\mu\text{m}$ ];

**f) Parâmetro  $S_{ds}$  [ $\text{mm}^{-2}$ ]**

O parâmetro  $S_{ds}$  é associado à densidade das asperezas na superfície. A formula para o cálculo deste parâmetro é mostrada na Equação (8) (CHIFFRE, et al., 2000).

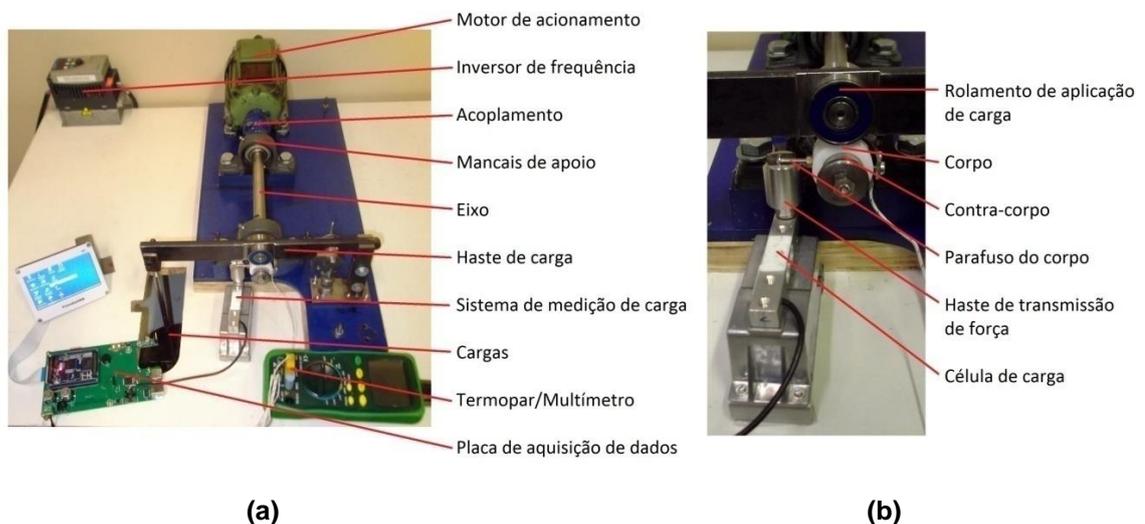
$$S_{ds} = \frac{\xi}{L_1 L_2} \cdot 10^{12} \tag{8}$$

onde:

$\xi$ : Número de picos da superfície [-];

**2.8 Ensaio mancal sobre eixo**

Os ensaios realizados por Do Vale (2014) foram realizados em uma máquina de atrito cinético (MAC), tipo mancal sobre eixo, desenvolvida no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR, a qual pode ser visualizada na Figura 2-22.



**Figura 2-22 – Fotografias da máquina de atrito cinético tipo mancal sobre eixo: (a) visão geral (b) detalhe do sistema de medição da força transmitida à célula de carga, cujo dado é fundamental para obtenção do coeficiente de atrito cinético.**

Fonte: Do Vale (2014).

O corpo de prova utilizado apresentou formato de bucha com adaptações para inserção de um termopar para coleta de temperatura. A Figura 2-23 ilustra a concepção do corpo de prova utilizado.

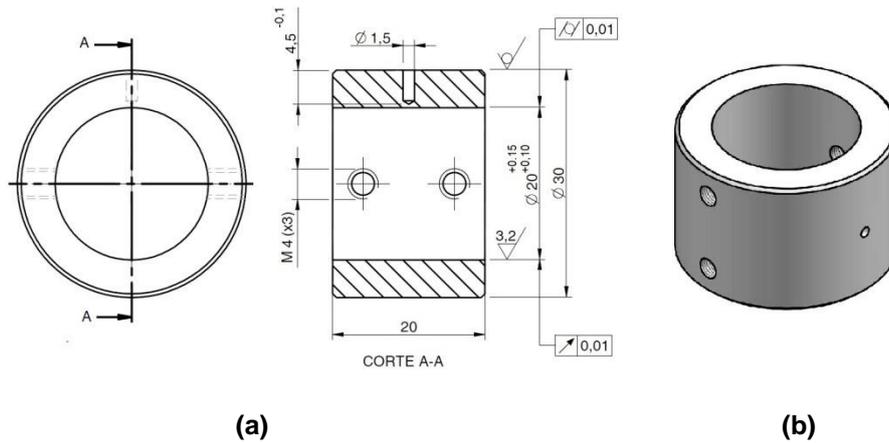


Figura 2-23 – Dimensões do corpo de PTFE: (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva.

Fonte: Do Vale (2014).

O contra-corpo de aço inoxidável AISI 304 foi utilizado segundo a concepção ilustrada na Figura 2-24.

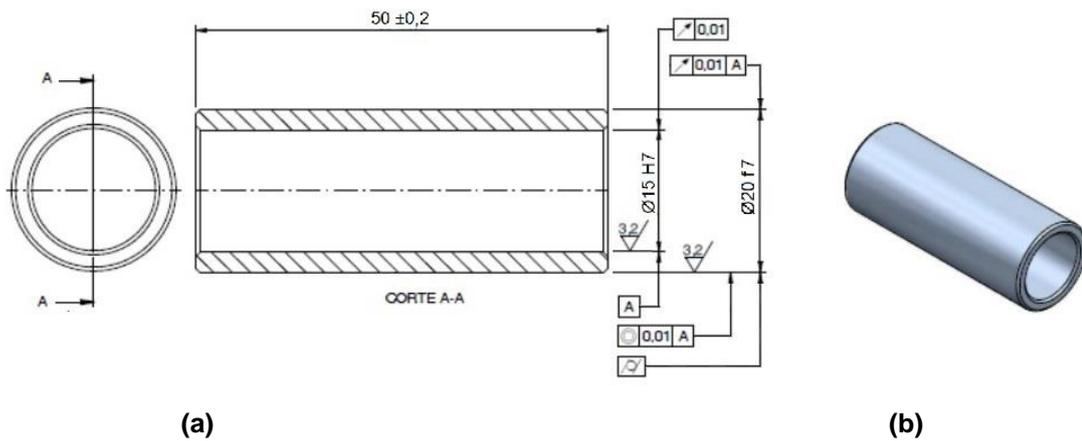


Figura 2-24 – Dimensões do contra-corpo de aço inoxidável AISI 304: (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva.

Fonte: Do Vale (2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os esquemáticos utilizados como corpo de prova e contra corpo, respectivamente dos materiais PTFE e aço inoxidável AISI 304, para os ensaios. Em seguida são apresentados os métodos utilizados neste trabalho para as análises dos materiais. Por último são apresentados o equipamento utilizado, os acessórios e o planejamento para a execução dos ensaios.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Corpo de prova

O material dos corpos de prova foi PTFE puro, o qual foi fornecido em barra extrudada com diâmetro de 7 mm e comprimento de 1000 mm. O certificado de matéria-prima encontra-se no Anexo A – Certificado de Fornecimento do PTFE.

Os corpos de prova apresentavam formato de pinos com 6,35 mm de diâmetro por 15 mm de altura, devidamente adaptados para a inserção no mandril do tribômetro, conforme sugere a Figura 3-1. Seguindo as recomendações de *ASM Handbook* volume 18 (1992), foi feito um furo de 1,5 mm na lateral dos corpos de prova a fim de possibilitar a inserção da junta quente de um termopar, deixando um espaçamento de 0,5 mm até o contato. O acabamento superficial foi tal a garantir que a rugosidade média da face de contato fosse próxima à utilizada nos ensaios de Do Vale (2014), em torno de 8,2  $\mu\text{m}$ .

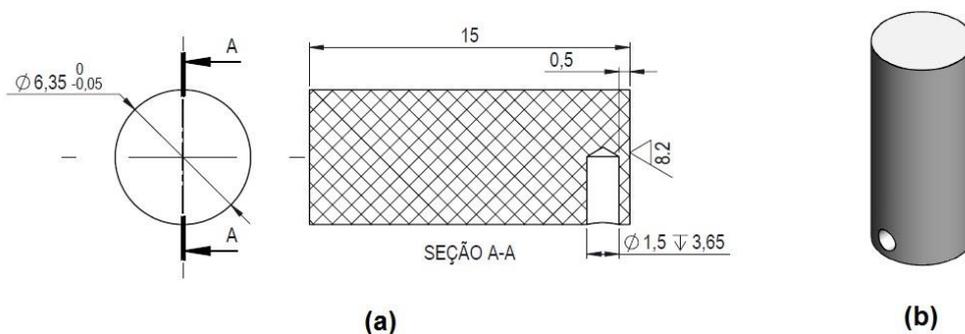


Figura 3-1 – Pino de PTFE: (a) detalhes de fabricação (b) vista isométrica.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Todas as Figuras e Tabelas sem fonte foram produzidas pelos autores do presente trabalho.

### 3.1.2 Contra-corpo

O material dos contra-corpos foi aço inoxidável AISI 304 e foram usinados no formato de disco com diâmetro de 85 mm e 10 mm de altura. Visando a fixação do disco na base do tribômetro, foram feitos dois furos (um de 6,5 mm e outro com 3 mm). O acabamento superficial foi tal a garantir que a rugosidade média das faces de contato seja próxima à utilizada nos ensaios de Do Vale (2014), em torno de  $2,2 \mu\text{m}$ . Os detalhes de fabricação do contra-corpo são mostrados na Figura 3-2.

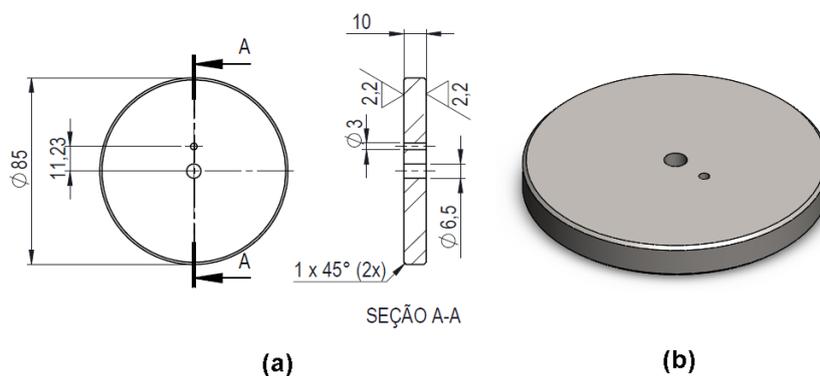


Figura 3-2 – Contra-corpo de aço inoxidável AISI 304: (a) detalhes de fabricação (b) vista isométrica.

## 3.2 Análise dos materiais

### 3.2.1 Análise topográfica

Para as análises topográficas foi utilizado o interferômetro de luz branca de medição 3D sem contato, fabricado pela Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI Lite. O equipamento oferece caracterização das superfícies para vários parâmetros de rugosidade 2D e 3D.

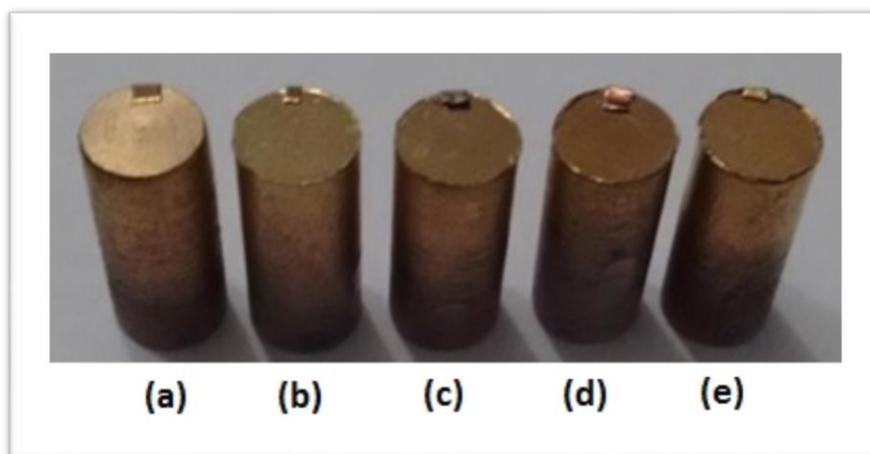
Foram feitas análises topográficas para cada nível de força normal para os corpos de prova e contra-corpos. Os parâmetros de rugosidade 3D selecionados, foram  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_p$ ,  $S_v$  e  $S_{ds}$ , os quais foram definidos na Seção 2.7.

A análise dos contra-corpos foi após os ensaios de desgaste e foram selecionados, para cada nível de carregamento normal, três pontos sobre a pista de deslizamento respectiva. Também foram analisados três pontos mais próximos do centro do disco como modelo de superfície não desgastada.

### 3.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a captura das imagens por MEV foi utilizado o equipamento da UTFPR da marca Zeiss, modelo EVO-MA15. Foram analisadas, para cada nível de força normal, as superfícies dos corpos de prova e contra-corpos e as partículas de desgaste de PTFE.

As amostras foram mantidas em secador, modelo Drybox-2 da marca Struers, por 40 minutos e então levadas para recobrimento com ouro utilizando o equipamento da marca Quorum, modelo Q150R ES. Esse recobrimento fez-se necessário uma vez que os polímeros são maus condutores de eletricidade e, para o MEV, é preciso projeção de elétrons na superfície das amostras para a formação da imagem. A Figura 3-3 evidencia os corpos de prova pós o recobrimento com ouro.



**Figura 3-3 – Corpos de prova recobertos com ouro: (a) pino não ensaiado, de (b) até (e) níveis crescentes de carregamento normal;**

### 3.2.3 Avaliação dos ensaios de desgaste

Para a avaliação dos ensaios de desgaste foi necessária a determinação do coeficiente adimensional de Archard, conforme apresentado na Equação (2). A taxa de desgaste mássico média do corpo de prova foi obtida pela razão entre a perda de massa durante o ensaio e o tempo de duração do ensaio. Esta relação é demonstrada na Equação (9).

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{t} \quad (9)$$

onde:

- $\dot{m}$ : Taxa de desgaste mássico média [g/h];  
 $\Delta m$ : Perda de massa do corpo de prova durante o ensaio [g];  
 $t$ : Tempo de ensaio [hora];

A perda mássica foi obtida através da pesagem dos corpos de prova, antes de depois de cada ensaio, utilizando uma balança eletrônica de precisão modelo Shimadzu. O tempo foi coletado pelo próprio *software* do tribômetro.

### 3.2.4 Espectrometria de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Realizaram-se FTIR em amostras do polímero na condição original e nos filmes multicamadas coletados em ensaios do primeiro e quarto níveis de força normal. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de infravermelho da marca Varian, modelo 640-IR. Adotou-se o método da radiação dispersa com brometo de potássio (KBr).

### 3.3 Tribômetro

O tribômetro utilizado nos ensaios pino sobre disco, do fabricante Bruker, foi o modelo CETR-UMT (*Comprehensive Materials Testing for Mechanical Tribological Properties*), conforme ilustrado na Figura 3-4.



Figura 3-4 – Tribômetro utilizado para a realização dos ensaios.

### 3.4 Acessórios para os ensaios

Durante os ensaios, para facilitar a fixação dos corpos de prova, utilizou-se um porta-amostras de latão. Ele possui uma extremidade para inserção no mandril do tribômetro e um furo lateral para fixar o pino de PTFE por meio de um parafuso, conforme mostra a Figura 3-5.



Figura 3-5 – Porta-amostras para fixação dos corpos de prova.

Para a aquisição da temperatura, usando o próprio tribômetro, foi utilizado o termopar da marca Minipa, modelo MTK-01, do tipo K, com junção cromel-alumel.

### 3.5 Planejamento dos ensaios

Inicialmente foram realizados testes preliminares com o tribômetro a fim de avaliar as condições de ensaio. Um dos objetivos dos testes preliminares foi verificar possíveis alterações na temperatura de uma pista para outra devido a diferença nas condições de dissipação térmica. Esse levantamento foi pertinente uma vez que se definiu a realização de dois ensaios por face do contra-corpo, conforme mostra a Figura 3-6.

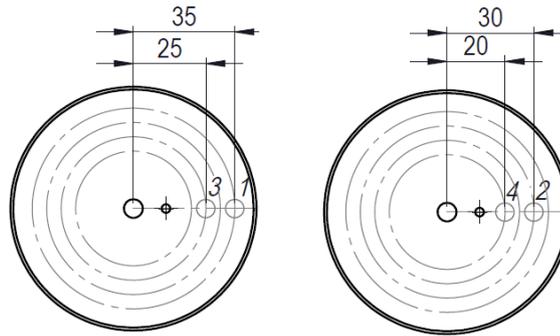


Figura 3-6 – Planejamento das pistas de deslizamento para os ensaios (dimensões em mm).

Os ensaios preliminares também serviram, através da análise de perda mássica, para definir a distância total percorrida por pista que seria utilizada nos ensaios de coleta de temperatura. Definiu-se a distância de 150 metros para os ensaios de coleta de temperatura e 500 metros para os ensaios de análise de perda mássica.

Os ensaios definitivos foram realizados em quatro níveis com valores pré-definidos de pressão, velocidade de deslizamento e, conseqüentemente PV, replicando as condições utilizadas por Do Vale (2014) que realizou ensaios do tipo mancal sobre eixo com condições semelhantes. Para todos os níveis a condição PV foi constante e dentro da faixa de operação do PTFE. Assim, conforme apresentado na Seção 1.3, tornou-se possível comparar os dois tipos de ensaio. As equações (10), (11) e (12) foram utilizadas para a dedução dos valores da força normal, e velocidade angular.

$$PV = P.V \quad (10)$$

$$F_N = P.A_{ap} \quad (11)$$

$$V = \frac{2.\pi.\omega.r}{60} \quad (12)$$

Em que:

$PV$ :	Condição PV [MPa.m.s-1].
$P$ :	Pressão de contato [MPa].
$V$ :	Velocidade de deslizamento [m/s].
$\omega$ :	Rotação [rpm].
$r$ :	Raio da pista de deslizamento [m].
$F_N$ :	Força normal [N].
$A_{ap}$ :	Área de contato aparente [m <sup>2</sup> ].

Os ensaios foram separados em duas categorias: temperatura e perda mássica. Nos ensaios de coleta de temperatura utilizou-se a extremidade apropriada com furo para a inserção do termopar e, nos ensaios de perda mássica, a extremidade maciça. Para a execução dos ensaios de ambas as categorias cada nível foi repetido cinco vezes. Antes dos ensaios as amostras ficaram em um dessecador por 48 horas.

Os valores que foram utilizados nos ensaios estão evidenciados na Tabela 3-1.

**Tabela 3-1 – Planejamento dos ensaios em quatro níveis de força normal.**

Variáveis	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
$F_N$ [N]	18,4	23,7	28,8	32
$A$ [m <sup>2</sup> ]	3,16692E-05	3,16692E-05	3,16692E-05	3,16692E-05
$P$ [MPa]	0,58	0,75	0,91	1,01
$V$ [m/s]	0,84	0,65	0,54	0,48
$\omega$ [rpm]	229,1	206,9	206,2	229,1
$r$ [m]	0,035	0,03	0,025	0,02
$PV$ [Mpa.m.s <sup>-1</sup> ]		0,49		

A Figura 3-7 ilustra a configuração típica do par tribológico antes dos ensaios.



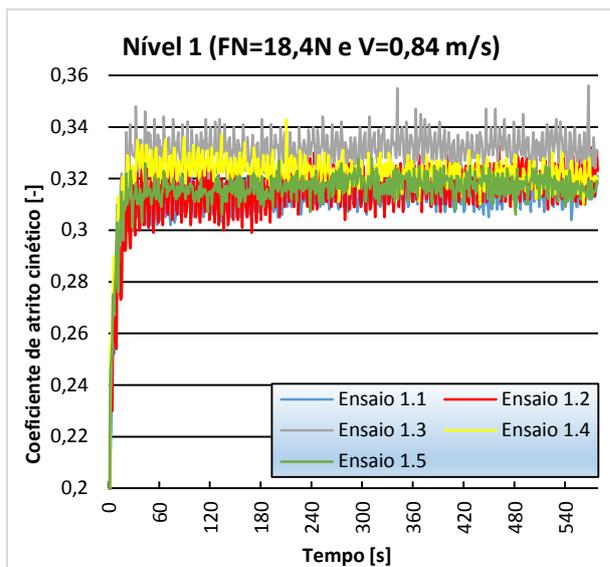
**Figura 3-7 – Configuração típica do par tribológico antes dos ensaios.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

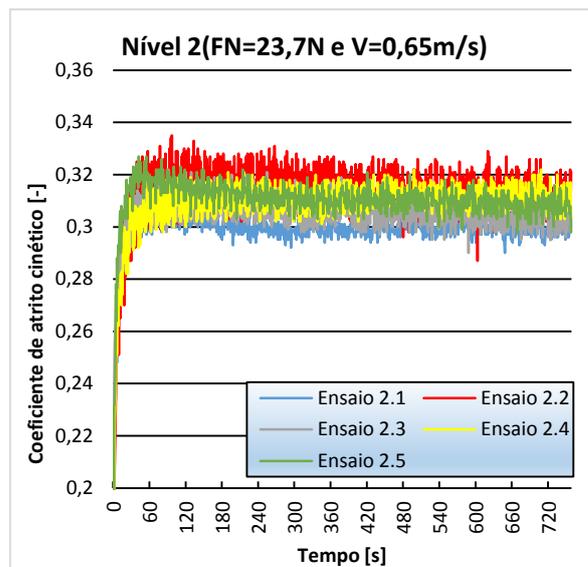
Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados no estudo do comportamento tribológico do PTFE em deslizamento, sem lubrificação, contra o aço inoxidável AISI 304. Os dados foram obtidos através de ensaios de deslizamento do tipo pino sobre disco, cujo planejamento foi detalhado na Seção 3.5. São apresentados na sequência: o coeficiente de atrito cinético, a temperatura de contato e o desgaste. Neste capítulo também foram apresentados os dados obtidos por Do Vale (2014), em ensaios do tipo mancal sobre eixo, a fim de permitir comparativo entre os dois tipos de ensaio.

### 4.1 Coeficiente de atrito cinético

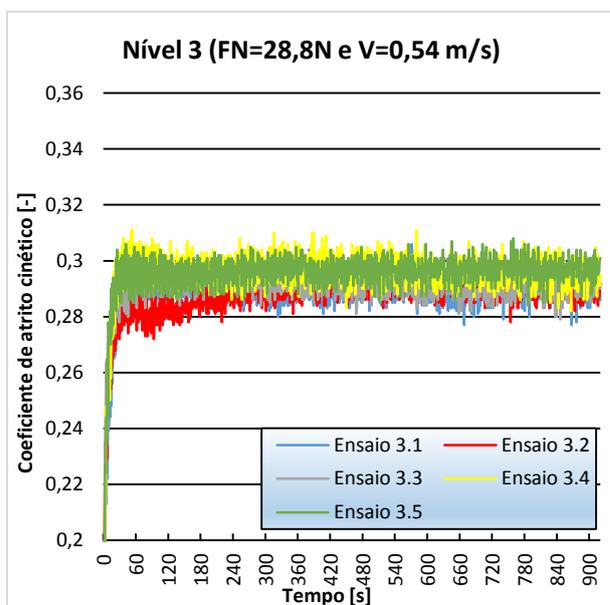
Os valores de coeficiente de atrito cinético estão dispostos em função do tempo para os quatro níveis de carregamento e velocidade de deslizamento (condição PV constante) nos gráficos da Figura 4-1. Verifica-se que por volta de 70 segundos após o início dos ensaios o coeficiente de atrito cinético alcança a um período de estabilidade, o que indica que a condição de transição inicial, denominada de amaciamento, foi transposta. Como exposto na seção 3.5, para estes ensaios a distância de deslizamento foi igual a 150 metros para os 4 níveis, o que resulta em ensaios de diferente duração.



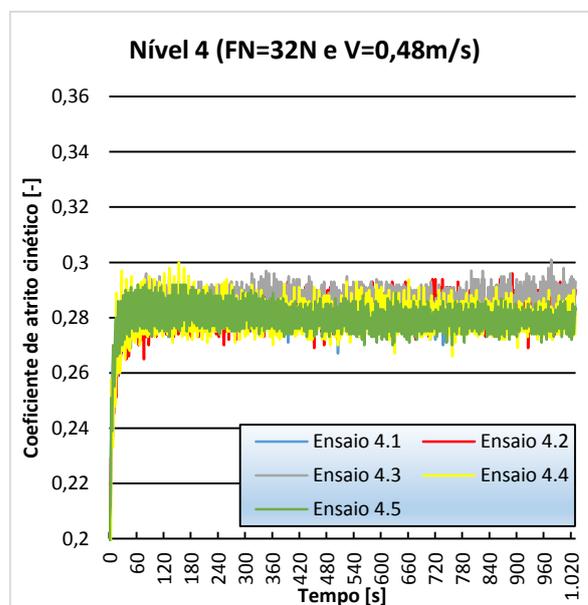
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4-1 – Dados do coeficiente de atrito cinético em função do tempo para ensaios com quatro níveis de força normal e velocidade de deslizamento e com condição  $PV = 0,49 \text{ Mpa.m.s}^{-1}$  constante: (a) nível 1 (b) nível 2 (c) nível 3 (d) nível 4.

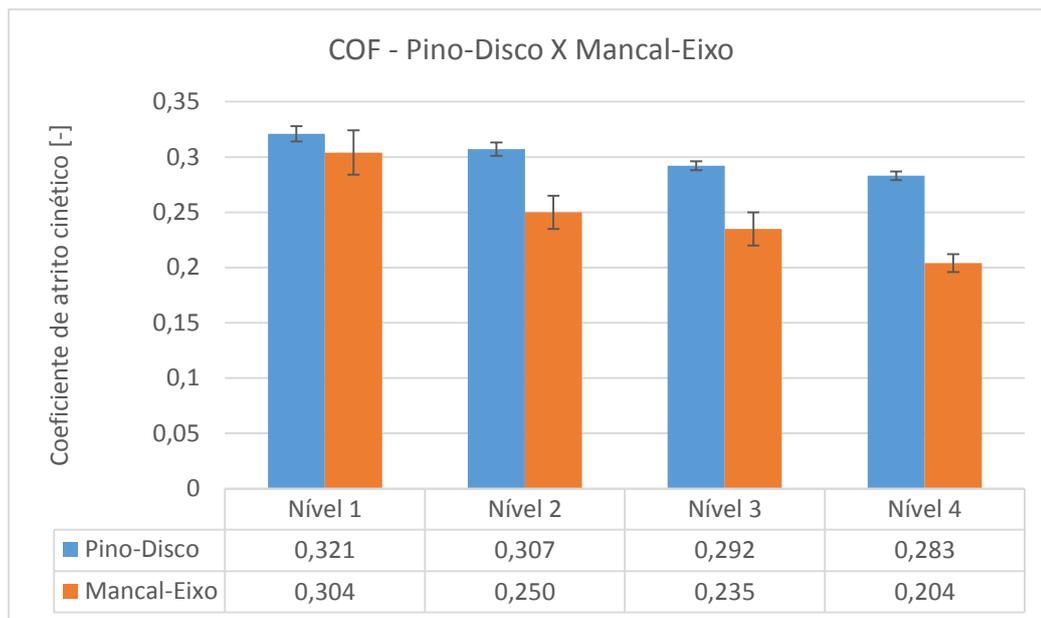
Em decorrência da diferente duração dos ensaios para os quatro nível optou-se por utilizar os valores de coeficiente de atrito cinético correspondentes aos 100 segundos finais de cada ensaio na determinação de um valor médio para estudo, conforme mostra a Tabela 4-1. Nos ensaios realizados por Do Vale (2014) a estabilização só foi obtida aproximadamente com 100 minutos. Esta situação ocorre devido à maior duração da fase de amaciamento. Devido à geometria do experimento,

a área de contato do mancal se altera de acordo com a distribuição da carga, até se acomodar em uma configuração de estabilidade. Esta situação não ocorre nos ensaios do tipo pino sobre disco, uma vez que a interface de contato se dá entre duas superfícies planas, o que leva a um período de amaciamento reduzido.

**Tabela 4-1 – Valores médios do coeficiente de atrito cinético, para os quatro níveis de força normal, considerando somente os últimos cem segundos de ensaio.**

Ensaio	Nível 01 [-]	Nível 02 [-]	Nível 03 [-]	Nível 04 [-]
1	0,315 ± 0,004	0,299 ± 0,003	0,290 ± 0,005	0,283 ± 0,003
2	0,320 ± 0,006	0,312 ± 0,007	0,289 ± 0,003	0,285 ± 0,004
3	0,332 ± 0,006	0,303 ± 0,005	0,290 ± 0,004	0,289 ± 0,005
4	0,321 ± 0,004	0,312 ± 0,005	0,295 ± 0,005	0,279 ± 0,005
5	0,317 ± 0,004	0,308 ± 0,004	0,297 ± 0,004	0,279 ± 0,004
Média	0,321 ± 0,007	0,307 ± 0,006	0,292 ± 0,004	0,283 ± 0,004

Os valores obtidos do coeficiente de atrito cinético, para os dois tipos de ensaio, são apresentados na Figura 4-2. Percebe-se uma maior taxa de diminuição no coeficiente de atrito com o aumento do carregamento nos ensaios tipo mancal sobre eixo. Esse fato pode ser atribuído, entre outros fatores, a diferença na geometria dos corpos de prova e contra-corpos utilizados nos dois ensaios. Deste modo, têm-se distribuições de pressão distintas em cada ensaio. Enquanto no pino sobre disco o contato se dá apenas em uma face, no ensaio mancal sobre eixo toda a área interna da bucha de PTFE fica em contato com o aço, o que propicia uma área maior contemplada com filmes do polímero.

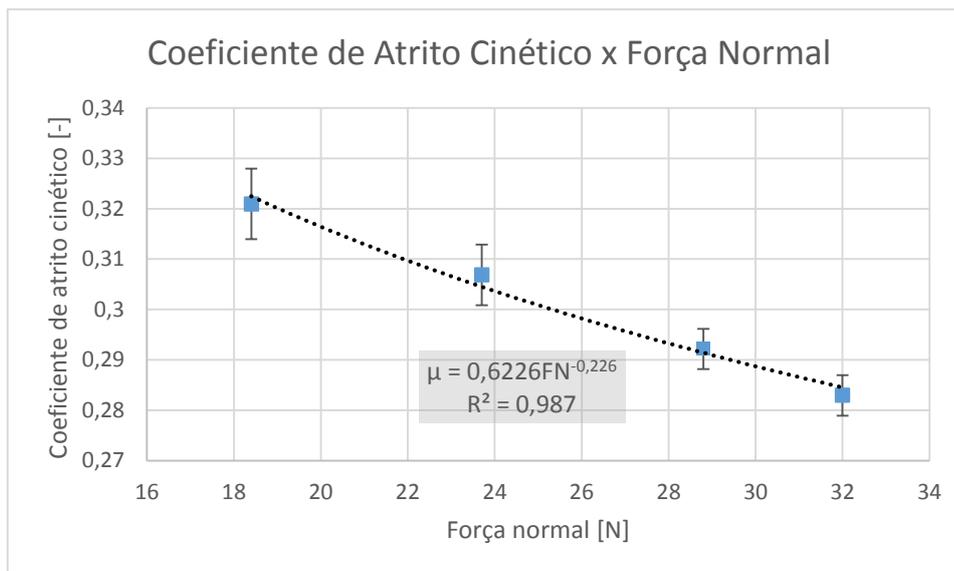


**Figura 4-2 – Gráfico comparativo entre os ensaios pino sobre disco (laranja) e mancal sobre eixo (azul).**

Nota-se que o valor do coeficiente de atrito cinético cai de acordo com o aumento da força normal. Como os materiais ensaiados possuem relativa baixa rugosidade e cargas normais consideráveis, utilizou-se o modelo de atrito de Archard (1957) que propõem que a interação entre as superfícies seja igual ao comportamento do contato de uma única aspereza, desta forma o coeficiente de atrito segue a relação apresentada na Equação (13), com um valor de expoente compreendido na entre 1/4 e 1/3, em módulo (ARCHARD, 1957). As curvas foram ajustadas conforme o método dos mínimos quadrados e determinou-se os coeficientes  $a_1$  e  $a_2$ , utilizando a Equação (14). Os resultados são apresentados na Figura 4-3.

$$\mu \propto F_N^{[-0,25 ; -0,33]} \tag{13}$$

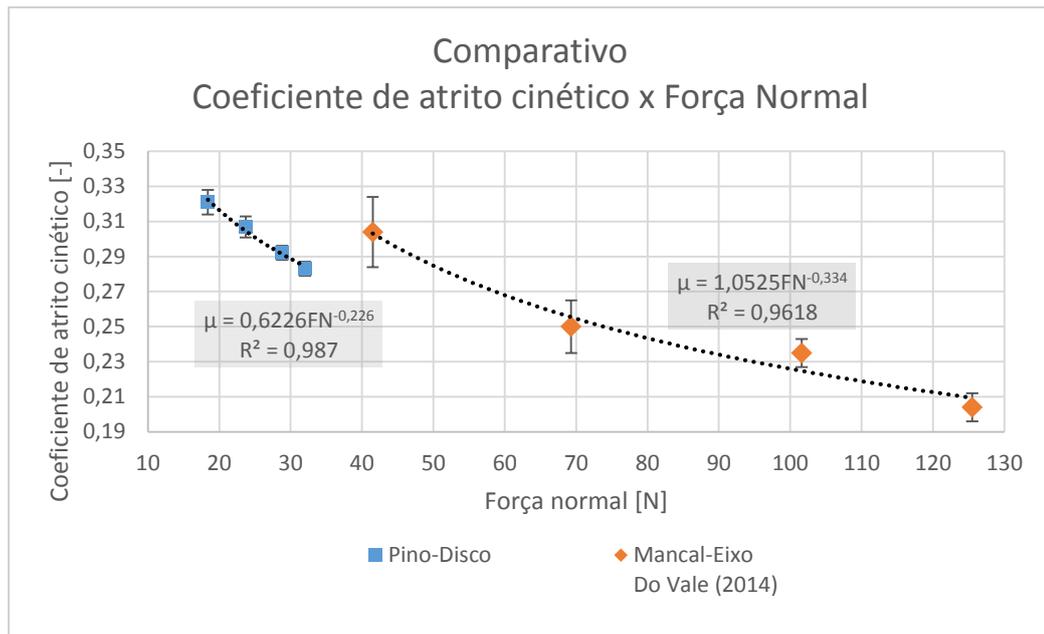
$$\mu = a_1 F_N^{a_2} \tag{14}$$



**Figura 4-3 – Valores médios para o coeficiente de atrito cinético para os quatro níveis de força normal, considerando os últimos cem segundos de ensaio.**

Os valores do parâmetro  $a_2$  são sabidamente negativos, porém, para facilitar o entendimento, serão tratados em módulo daqui em diante.

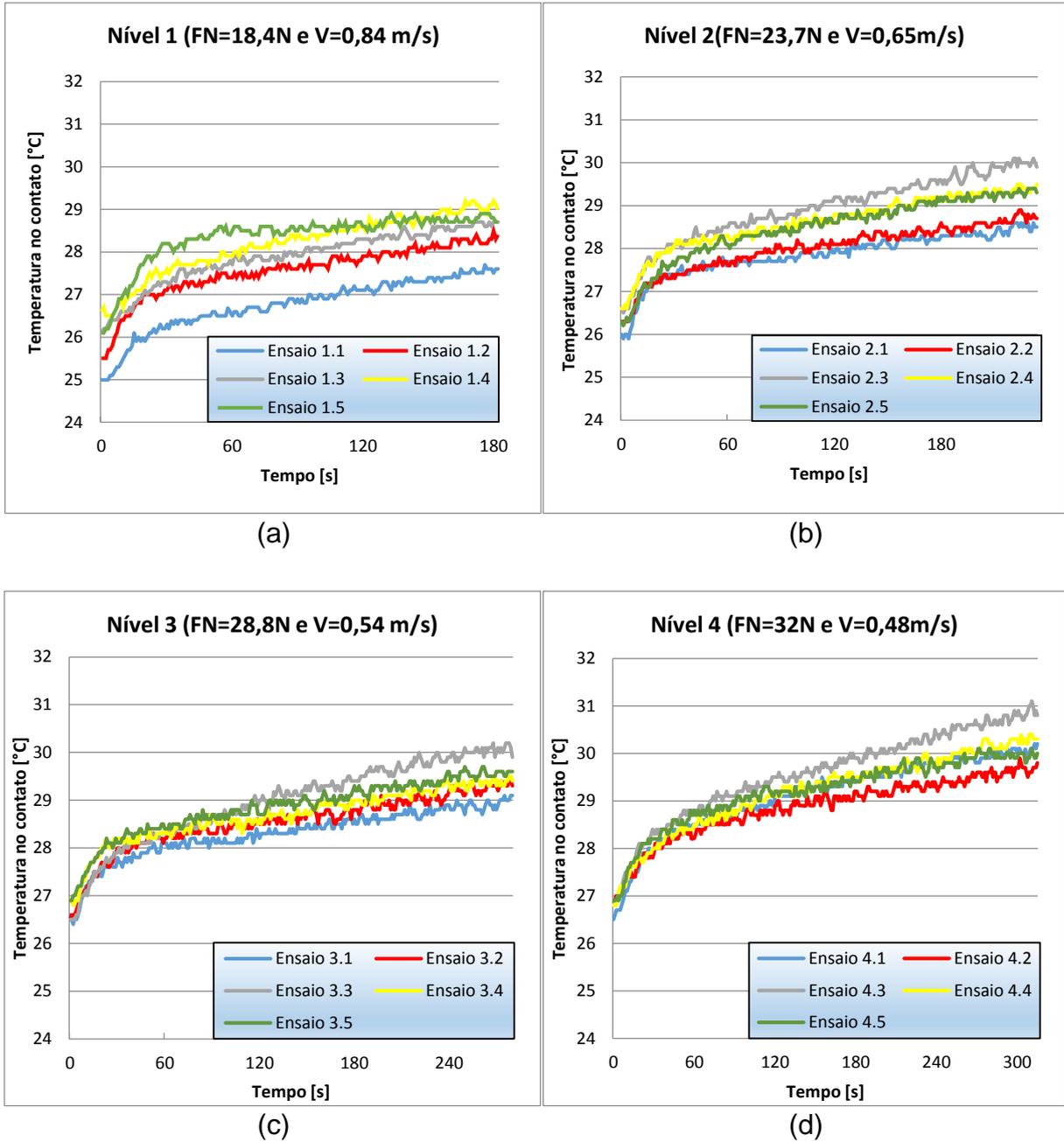
Percebe-se pela análise da Figura 4-3 que o parâmetro  $a_2$  obtido pela Equação (14) apresentou o valor 0,226, pouco abaixo do proposto por Archard, que é entre 0,33 e 0,25. Segundo Hutchings os valores abaixo de 0,33 podem ser associados à presença de plasticidade no contato. Nos ensaios do tipo mancal sobre eixo Do Vale (2014) encontrou, para essa mesma análise, para o parâmetro  $a_2$  o valor de 0,33. Um comparativo entre os dois ensaios pode ser visto na Figura 4-4. Ressalta-se que apesar de apresentarem ensaios com a mesma condição PV em ambos os métodos, a carga normal difere entre eles devido às diferentes áreas aparentes de contato das duas configurações. Deste modo, pode-se supor que os ensaios tipo pino sobre disco impõem maior plasticidade ao contato.



**Figura 4-4 – Comparativo entre os ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo dos valores do coeficiente de atrito cinético em relação a força normal.**

#### 4.2 Temperatura no contato

Os valores de temperatura no contato, coletados para os cinco ensaios de cada um dos quatro níveis, estão dispostos na Figura 4-5. Verifica-se uma clara semelhança no comportamento destes gráficos quando comparados com a Figura 2-16, apenas diferindo no fato de não ter-se atingido um patamar de estabilização.



**Figura 4-5 – Gráficos com a relação entre a temperatura e o tempo de ensaio: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível.**

Devido a condições inerentes ao experimento e a maneira como este foi concebido, mostrou-se impraticável a realização da coleta de temperatura no contato por tempo suficiente para que esta atingisse um patamar de estabilidade. Devido às condições de desgaste nos pinos de PTFE e da posição da junta quente do termopar (0,5 mm da face de contato), com poucos minutos de ensaio o corpo já estava desgastado o suficiente a ponto de o termopar estar na iminência de transpor a

interface de contato. Ainda assim, nota-se através da Figura 4-6 que as temperaturas atingidas durante o deslizamento estão abaixo dos valores apresentados por Do Vale (2014) para a mesma faixa de tempo.

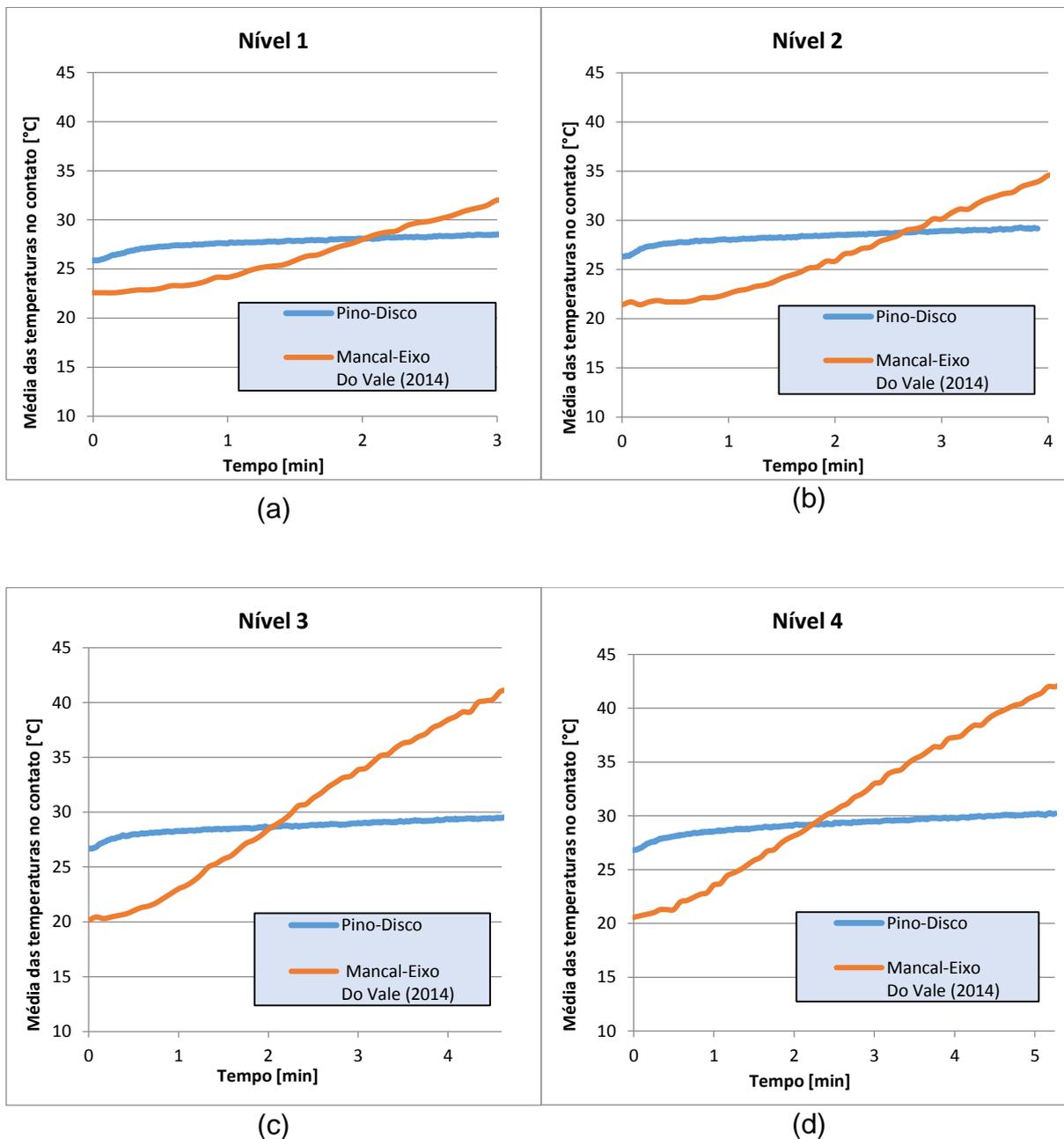
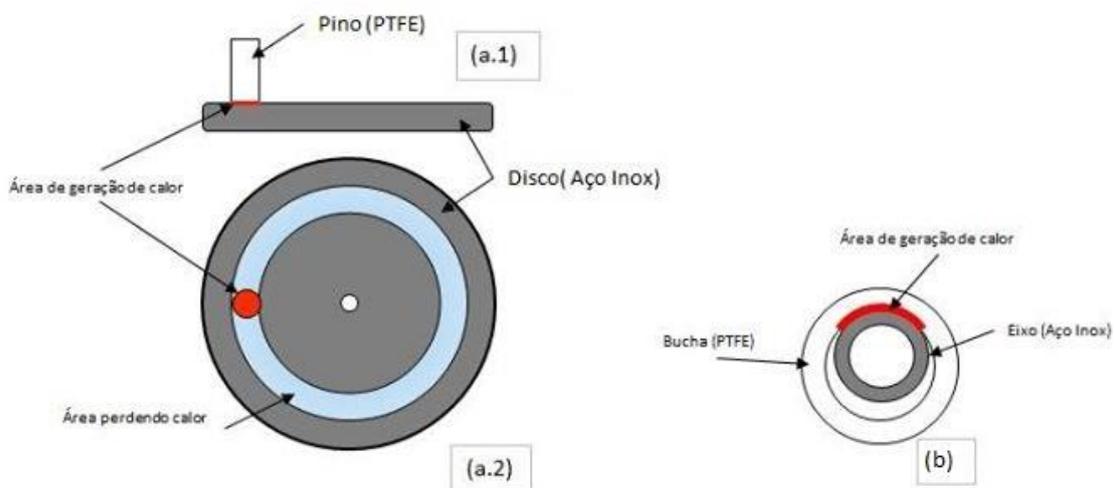


Figura 4-6 – Comparativo entre os ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo dos valores de temperatura em relação ao tempo de ensaio: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível.

Desta forma, caso os ensaios de pino sobre disco possuísem duração equivalente aos de mancal sobre eixo, acredita-se que não seria atingido o mesmo patamar de temperatura de estabilização.

Esta hipótese tem como fundamento as condições de dissipação de calor apresentadas em ambos os ensaios. Enquanto nos ensaios de pino sobre disco a pista de deslizamento passa a maior parte do ensaio livre do contato com o pino, sofrendo perda de calor por convecção para o ar, nos ensaios de mancal sobre eixo realizados por Do Vale (2014), a área do eixo em contato com a bucha de PTFE é próxima à metade da área total de deslizamento. Esta condição “confina” o calor na região proporcionando um maior aquecimento. A Figura 4-7 expõe de maneira esquemática as duas situações.



**Figura 4-7 – Comparativo esquemático entre ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo da relação da área de geração de calor: (a.1) vista frontal esquemática - pino sobre disco; (a.2) vista superior esquemática - pino sobre disco; (b) vista esquemática - mancal sobre eixo.**

No entanto, é importante salientar que as temperaturas coletadas estão muito a baixo do ponto de fusão do PTFE (de 327 °C), o que descarta a fusão ou degradação do material.

Diante do exposto, a avaliação da estabilização da temperatura no contato fica impossibilitada neste experimento, uma vez que esta condição não pode ser atingida quando se tem o aparato para aquisição de temperatura.

Todavia, pode-se verificar, dentro do período avaliado, que os ensaios de mancal sobre eixo impõem uma taxa de aquecimento maior devido à diferença na dissipação térmicas de cada tribossistema.

### 4.3 Desgaste

Nesta seção são apresentados os dados da quantificação do desgaste: a taxa de desgaste mássico e volumétrico e o coeficiente de desgaste adimensional de Archard. Também são abordadas as alterações topográficas nas superfícies do corpo de prova e do contra-corpo e, em seguida, a análise dos produtos do desgaste seguido das alterações impostas nos materiais devido ao ensaio.

#### 4.3.1 Taxa de desgaste mássico média

Uma maneira de se avaliar o desgaste em um par tribológico de forma quantitativa é fazendo uso da taxa de perda mássica média. As variações médias das massas para cada nível podem ser vistas na Tabela 4-2. O desgaste mássico no contra corpo de aço inoxidável não se mostrou significativo para a precisão da balança utilizada, portanto foi negligenciado.

A fim de se obter valores para taxa de desgaste mássico em gramas por hora, dividiu-se a perda mássica pelo tempo de ensaio em cada nível. O resultado pode ser visto também na Tabela 4-2.

**Tabela 4-2 – Taxa de desgaste mássico médio por nível para 500 m deslizamento.**

Nível	Perda mássica [g]	Duração do ensaio [min]	Taxa de desgaste mássico média [g/h]
1	0,013 ± 0,002	10,0	0,080 ± 0,009
2	0,018 ± 0,001	12,9	0,083 ± 0,003
3	0,020 ± 0,001	15,5	0,078 ± 0,006
4	0,024 ± 0,001	17,4	0,084 ± 0,005

Os valores da taxa de desgaste mássico foram estatisticamente iguais com valor médio de 0,08 g/h para os 4 níveis.

#### 4.3.2 Taxa de desgaste volumétrico média e coeficiente adimensional de Archard

Uma vez que os ensaios, para todos os níveis, tiveram suas distâncias de deslizamento determinadas como sendo 500 metros, os valores apresentados na seção 4.3.1 foram convertidos e calculados levando aos valores das taxas de desgaste volumétrico médias para os 4 níveis, que podem ser vistas na Figura 4-8.

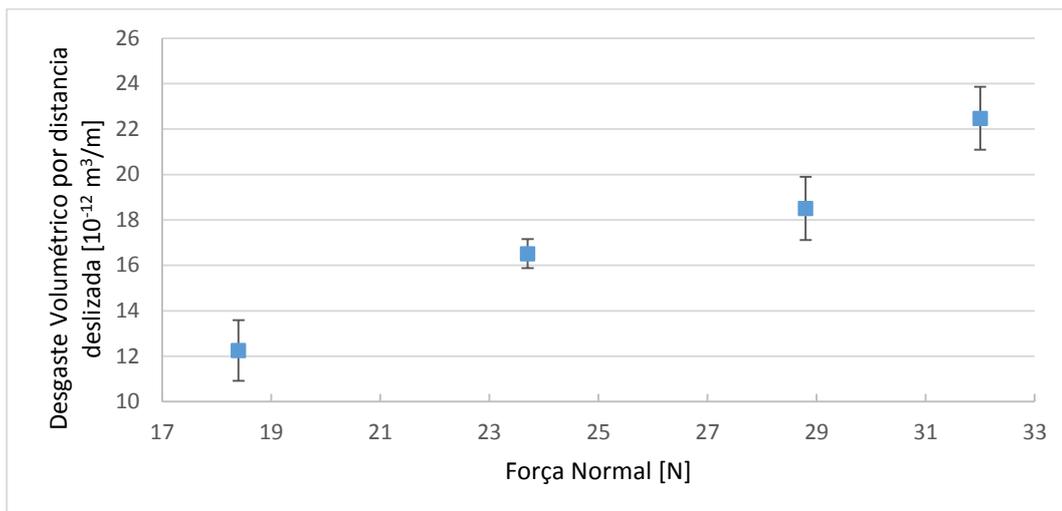


Figura 4-8 – Desgaste volumétrico médio em função da força normal

Esses dados foram utilizados no cálculo do coeficiente adimensional de Archard, de acordo com a Equação (2). Para o cálculo deste coeficiente foi utilizado o parâmetro de dureza do PTFE apresentado no laudo do fornecedor (58 Shore D), convertido para escala Brinell,  $40,9 \text{ N/mm}^2$ .

Em seus estudos Archard e Hirst (1956) concluíram que cada material possui um coeficiente de atrito adimensional próprio para uma determinada condição. Para o PTFE em deslizamento sem lubrificação contra aços, foi determinado o valor de  $2,5 \cdot 10^{-5}$ . Os valores calculados do coeficiente adimensional de Archard para os quatro níveis estão dispostos na Figura 4-9, a linha verde representa o valor determinado por Archard.

Nota-se que os valores encontrados estão próximos ao valor obtido por Archard e Hirst (1956). É importante perceber que em seus estudos, Archard (1953) realizou ensaios do tipo pino sobre anel, e ainda assim os resultados se aproximam. Da mesma maneira, os de resultados de Do Vale (2014), que fez uso de ensaio do tipo mancal sobre eixo, também estão consonantes com os aqui apresentados. Isso fica evidenciado através da Figura 4-10.

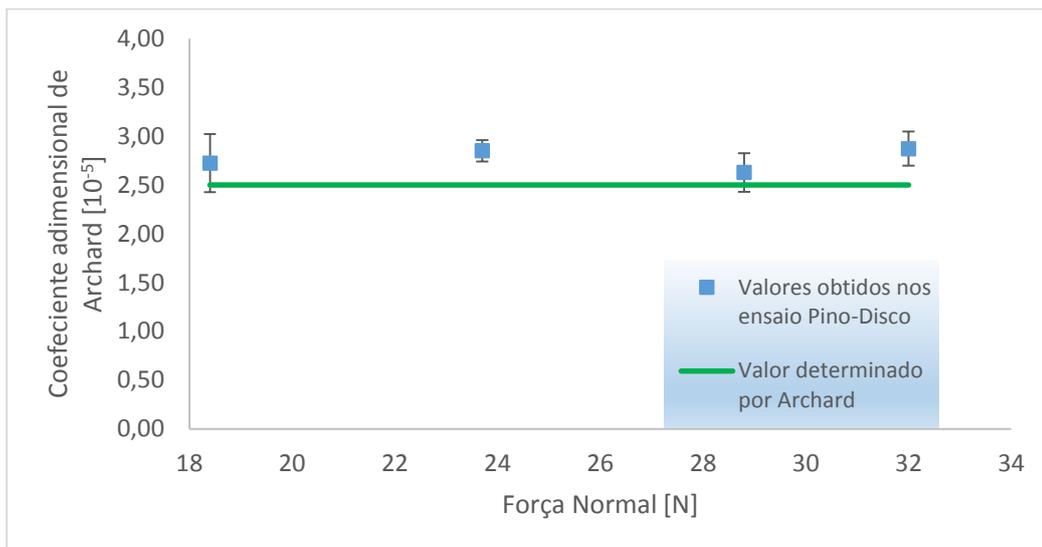


Figura 4-9 – Coeficiente adimensional de Archard para os quatro níveis e o valor determinado por Archard.

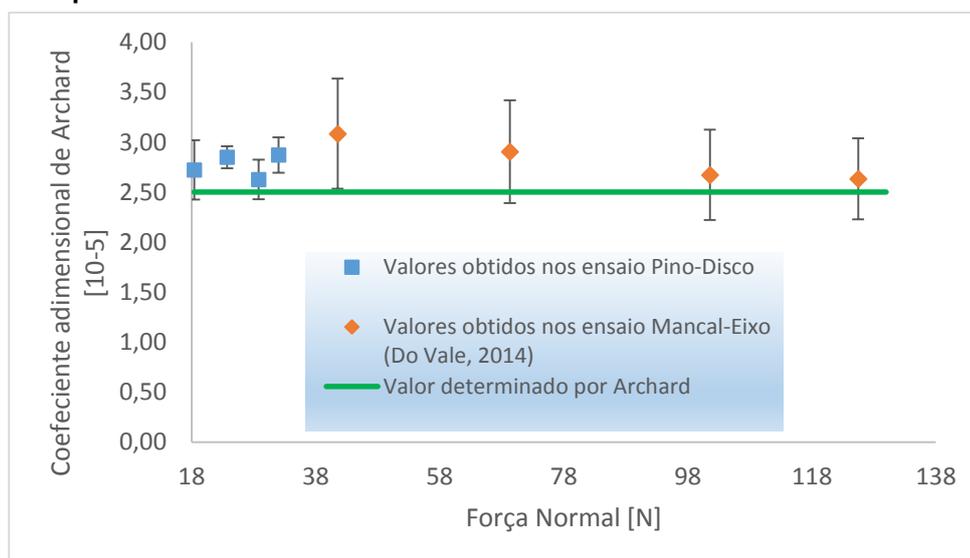


Figura 4-10 – Comparativo entre os valores do coeficiente adimensional de Archard.

Estas constatações reforçam a validade do uso do coeficiente adimensional de Archard como um padrão comparativo entre ensaios de diferentes configurações e geometria.

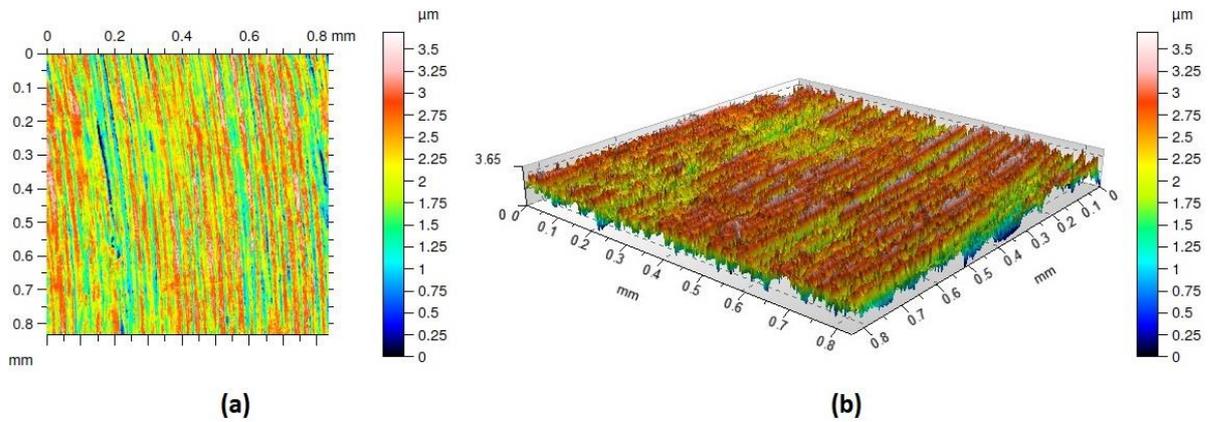
#### 4.3.3 Alterações topográficas das superfícies submetidas ao desgaste

A seguir são apresentadas as alterações impostas nas superfícies, do corpo de prova e contra-corpo, devido ao desgaste.

##### 4.3.3.1 Aço inoxidável

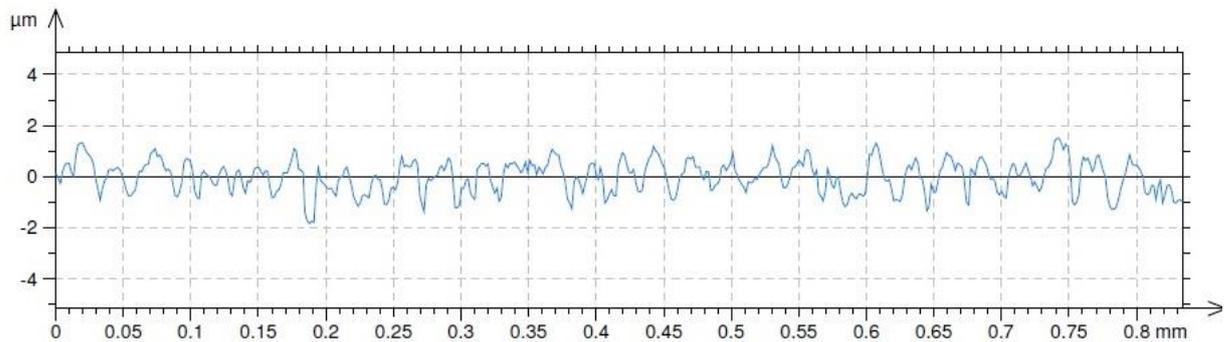
A topografia da superfície do contra-corpo, obtida por interferometria de luz branca (IDLB), em vista superior e em 3D, antes do ensaio de desgaste, é apresentada

na Figura 4-11. É fácil perceber pela imagem as ondulações na superfície em decorrência do processo de faceamento.



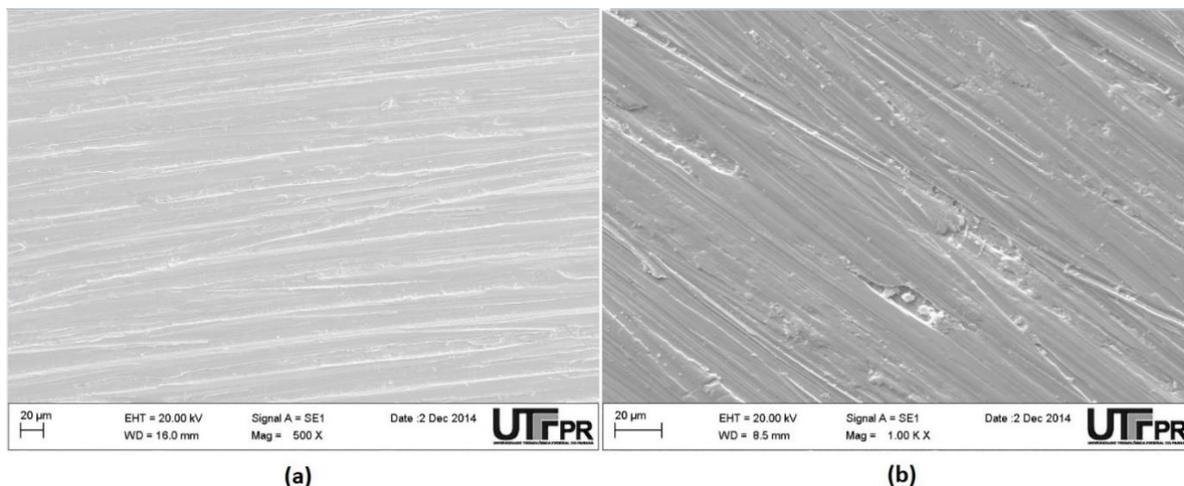
**Figura 4-11 – Topografias típicas do contra-corpo, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste: (a) vista superior (b) 3D.**

A fim de melhorar a visualização da ondulação é apresentado na Figura 4-12 o perfil de rugosidade típico do aço inoxidável antes do ensaio de desgaste.



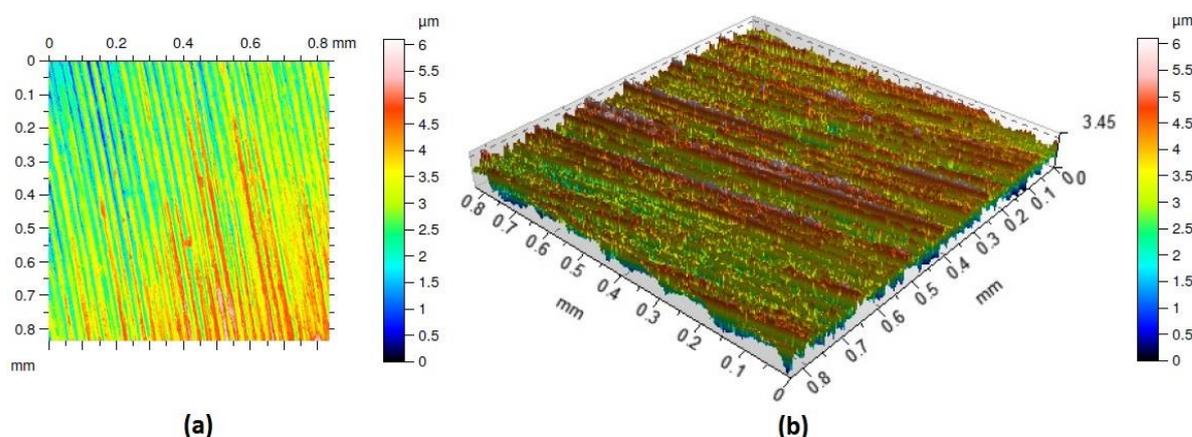
**Figura 4-12 – Perfil de rugosidade típico do contra-corpo, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste.**

A Figura 4-13 apresenta imagens obtidas por MEV da superfície do contra-corpo. Nesta ampliação é possível perceber defeitos presentes na superfície metálica na ordem de micrometros.



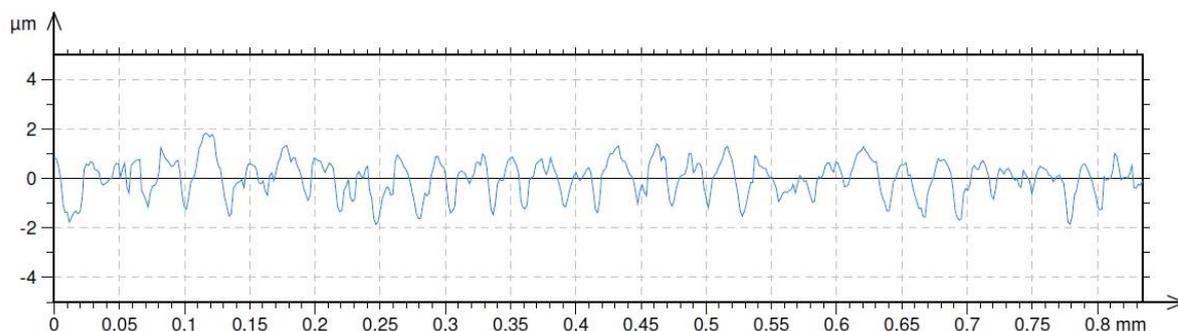
**Figura 4-13 –** Imagens obtidas por MEV: (a) superfície do contra-corpo antes do ensaio de desgaste (b) idem.

A seguir são apresentadas as análises topográficas do contra-corpo após os ensaios de desgaste. É apresentada na Figura 4-14 a topografia da vista superior e 3D. Pode-se perceber em comparação com a Figura 4-11, que praticamente não houve alterações.



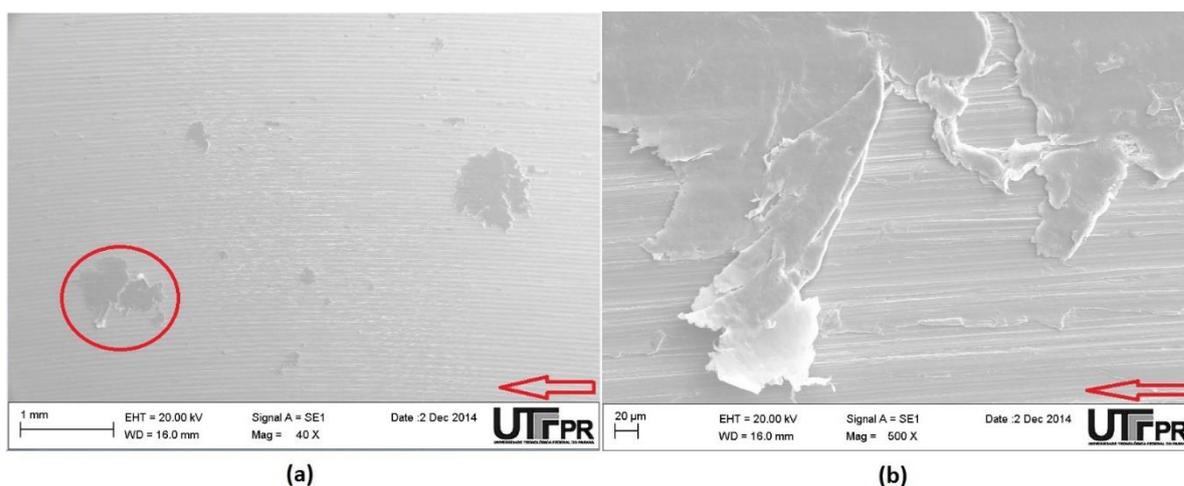
**Figura 4-14 –** Topografias típicas do contra-corpo, obtidas por IDLB, depois do ensaio de desgaste: (a) vista superior (b) 3D.

Ao analisar o perfil de rugosidade, apresentado na Figura 4-15, após o ensaio, também pode se concluir que não houve alterações significativas em comparação ao perfil apresentado na Figura 4-12.



**Figura 4-15 – Perfil de rugosidade típico do contra-corpo, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste.**

O contra-corpo apresentou, conforme pode ser visto na Figura 4-16(a), partículas de desgaste aderidas a sua superfície, bastante pequenas, na ordem de poucos milímetros de comprimento. Na Figura 4-16(b) pode-se perceber com maior aumento a partícula aderida ao contra-corpo.



**Figura 4-16 – Imagens obtidas por MEV da superfície do contra-corpo após o ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta vermelha): (a) partícula de desgaste aderida à superfície do aço (b) ampliação da região circunscrita em (a).**

A Tabela 4-3 apresenta alguns parâmetros de rugosidade para efeito comparativo entre quatro níveis de força normal antes e após os ensaios. Os parâmetros  $S_a$  e  $S_q$  mostram, em média, uma tendência extremamente pequena de aumento nos seus valores após ensaio. Acredita-se que este pequeno aumento está mais associado à diferença das condições no processo de usinagem do que com o desgaste pois, conforme explicado na Seção 3.2.1, foram utilizados os pontos mais internos do contra-corpo para analisar a superfície não ensaiada. No processo de faceamento existem mudanças nos parâmetros de usinagem, como a velocidade de

corde, à medida que a ferramenta se aproxima do centro, e que podem, desta forma, propiciar alterações topográficas diferentes entre a periferia e o centro do corpo usinado. Os parâmetros associados à média das amplitudes de rugosidade,  $S_z$ , e a altura máxima de vale,  $S_v$ , mostram, em média, leve tendência de diminuição. Isso demonstra que a superfície do contra-corpo deve ter sofrido desgaste ou deformação, ainda que em pequena quantidade. O parâmetro  $S_{ds}$  também apresentou redução após os ensaios. Como as alterações nos parâmetros de rugosidade foram bastante pequenas, na ordem de  $10^{-1}$  microns, pode-se associar essas diferenças a imprecisão nas medições nesta ordem de grandeza.

**Tabela 4-3 – Valores dos parâmetros de rugosidade para o contra-corpo, antes e após os ensaios, para quatro níveis de força normal.**

Parâmetro	Antes	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$0,56 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,08$	$0,69 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,04$	$0,65 \pm 0,08$
$S_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$0,69 \pm 0,05$	$0,97 \pm 0,08$	$0,83 \pm 0,06$	$0,71 \pm 0,04$	$0,78 \pm 0,09$
$S_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$4,5 \pm 0,7$	$4,9 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,2$	$3,7 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,3$
$S_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$1,8 \pm 0,30$	$2,6 \pm 0,10$	$1,9 \pm 0,20$	$1,8 \pm 0,03$	$1,8 \pm 0,20$
$S_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$2,6 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$
$S_{ds}$ [ $\text{mm}^{-2}$ ]	$13698 \pm 632$	$10949 \pm 1477$	$11928 \pm 666$	$12819 \pm 219$	$11743 \pm 2216$

A Figura 4-17 apresenta um comparativo entre os parâmetros de rugosidade dos contra-corpos utilizados nos ensaios do presente trabalho com os obtidos por Do Vale (2014) nos ensaios do tipo mancal sobre eixo.

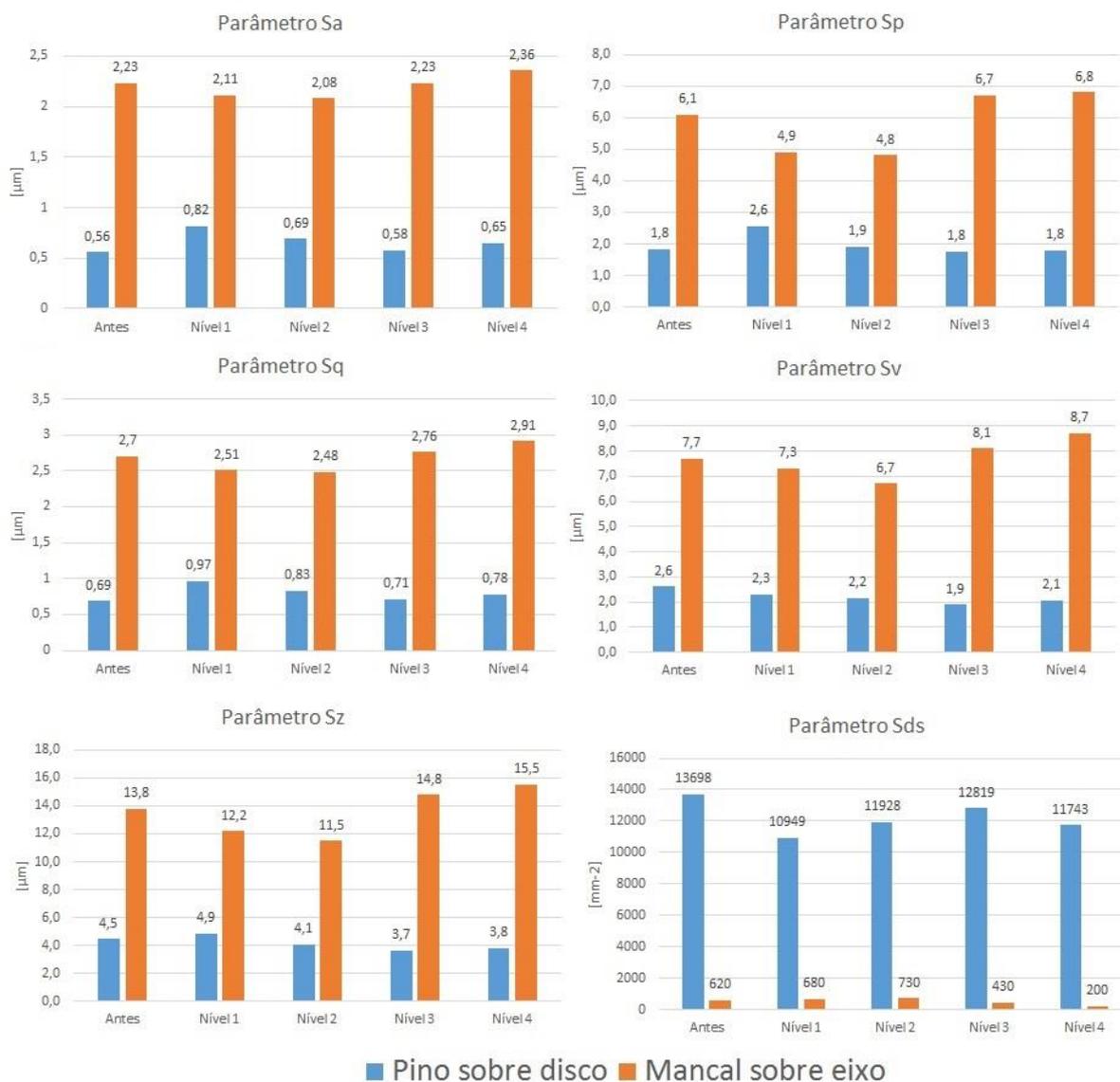


Figura 4-17 – Comparativo dos parâmetros de rugosidade obtidos dos contra-corpos dos ensaios pino sobre disco (em azul) e mancal sobre eixo (em laranja).

Ao analisar a Figura 4-17 constata-se que o acabamento superficial dos contra-corpos foi consideravelmente diferente: o parâmetro Sa obtido no contra-corpo do presente trabalho foi aproximadamente quatro vezes menor do que o obtido por Do Vale (2014). Essa relação diminui para três vezes após os ensaios. A diferença no acabamento superficial está associada aos processos de usinagem: faceamento para o ensaio pino sobre disco e torneamento externo para o ensaio mancal sobre eixo. Também se pode perceber, para ambos os tipos de ensaio, que a alteração topográfica foi extremamente sutil, apresentando uma leve tendência de desgaste das asperezas.

#### 4.3.3.2 PTFE

A topografia da superfície do corpo de prova, obtida por interferometria de luz branca (IDLB), em vista superior e em 3D, antes do ensaio de desgaste, é apresentada na Figura 4-18. Assim como observado no aço inoxidável na Seção 4.3.3.1, é fácil perceber pela imagem as ondulações na superfície em decorrência do processo de torneamento, porém, para o corpo de prova, torna-se mais evidente as ondulações se comparado com o observado na Figura 4-11. Isso se deve ao fato de que a área avaliada pelo interferômetro foi próxima ao centro do pino.

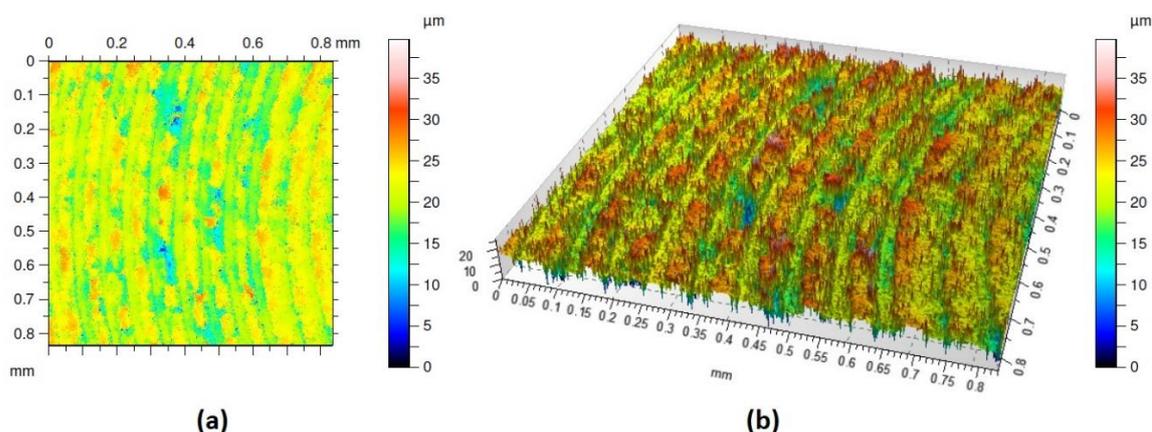


Figura 4-18 – Topografias típicas do corpo de prova, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste: (a) vista superior (b) 3D.

A Figura 4-19 apresenta o perfil de rugosidade típico da superfície do corpo de prova antes do ensaio de desgaste.

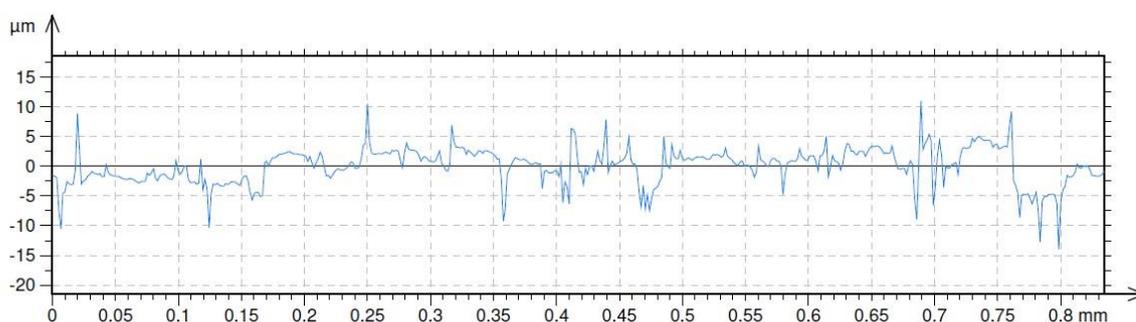
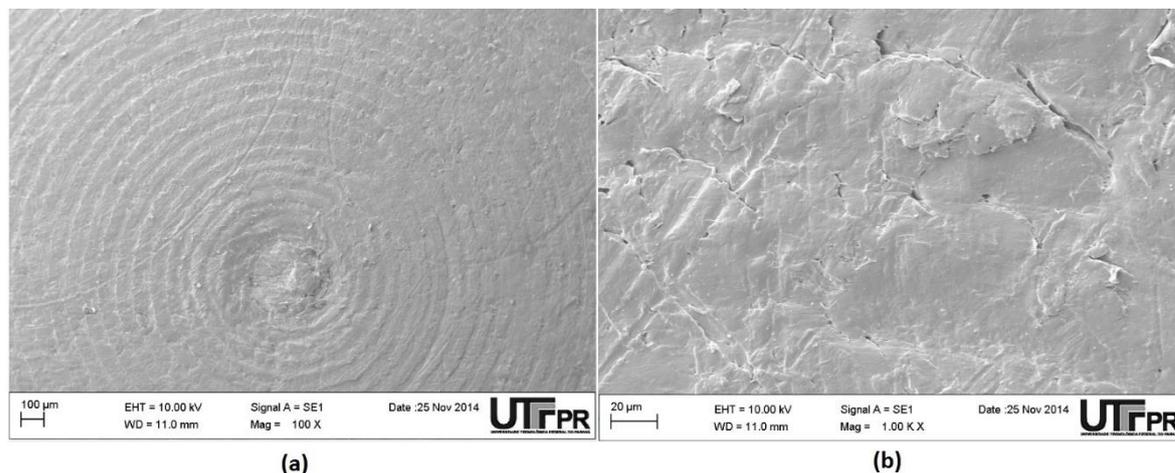


Figura 4-19 – Perfil de rugosidade típico do corpo de prova, obtido por IDLB, antes do ensaio de desgaste.

A Figura 4-20 apresenta imagens obtidas por MEV da superfície do corpo de prova. Nestas imagens fica evidente os sulcos provenientes do processo de usinagem que formam uma textura com círculos concêntricos, Figura 4-20(a), e as imperfeições

da superfície na Figura 4-20(b). Também pode-se perceber que o polímero apresenta-se de forma irregular, isso pode ser explicado pelo fato de que a usinagem neste tipo de material é consideravelmente ineficiente, ou seja, a remoção do material pela ferramenta de corte só é alcançada após grande deformação na superfície (CHALLEN & OXLEY, 1979).



**Figura 4-20 – Imagens obtidas por MEV: (a) superfície do corpo de prova antes do ensaio de desgaste (b) idem.**

A seguir são apresentadas as análises topográficas do corpo de prova após os ensaios de desgaste. É apresentada na Figura 4-21 a topografia da vista superior. Pode-se perceber em comparação com a Figura 4-18 que surgiram alterações consideráveis nas superfícies, diferentemente do que foi constatado com o contra-corpo. Fica evidente, desta forma, que o desgaste foi predominantemente do material polimérico. Também pode se perceber que as ondulações concêntricas observadas na Figura 4-18 foram substituídas por um perfil semelhante ao observado no contra-corpo como mostrado na Figura 4-14, assim, pode-se concluir que o formato do contra-corpo foi imposto na superfície do corpo de prova.

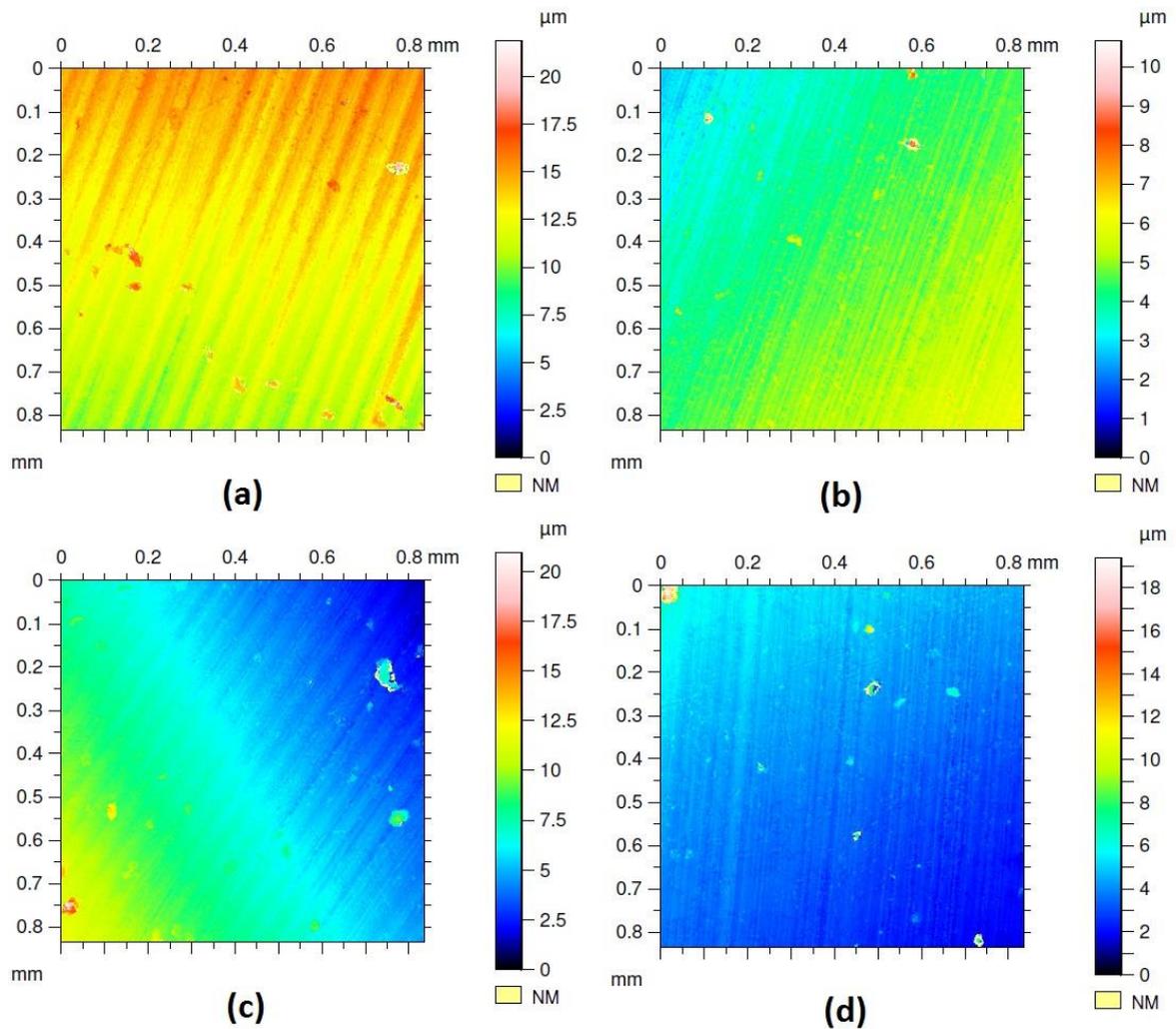


Figura 4-21 – Topografias, obtidas por IDLB, em vista superior dos corpos de prova após o ensaio de desgaste: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível.

A Figura 4-22 apresenta as topografias dos corpos de prova em 3D. Pode-se perceber que com o aumento da carga normal houve uma maior remoção de material polimérico e, por consequência, diminuição da rugosidade superficial. Também é possível perceber a presença de perturbações na Figura 4-21 e na Figura 4-22 que podem ser partículas aderidas no corpo de prova.

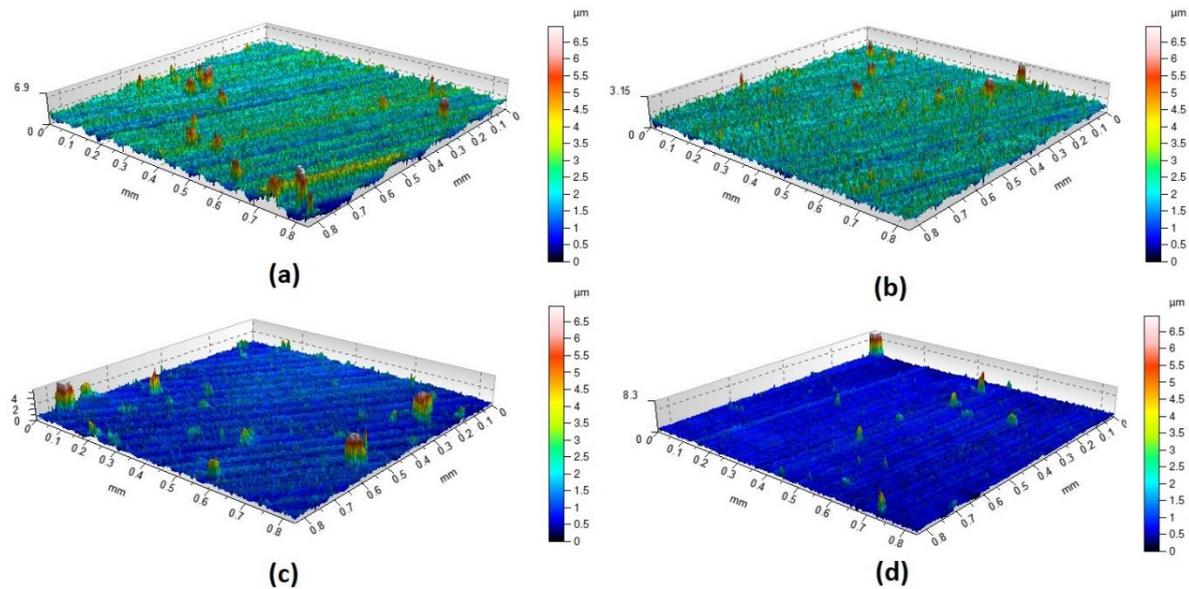
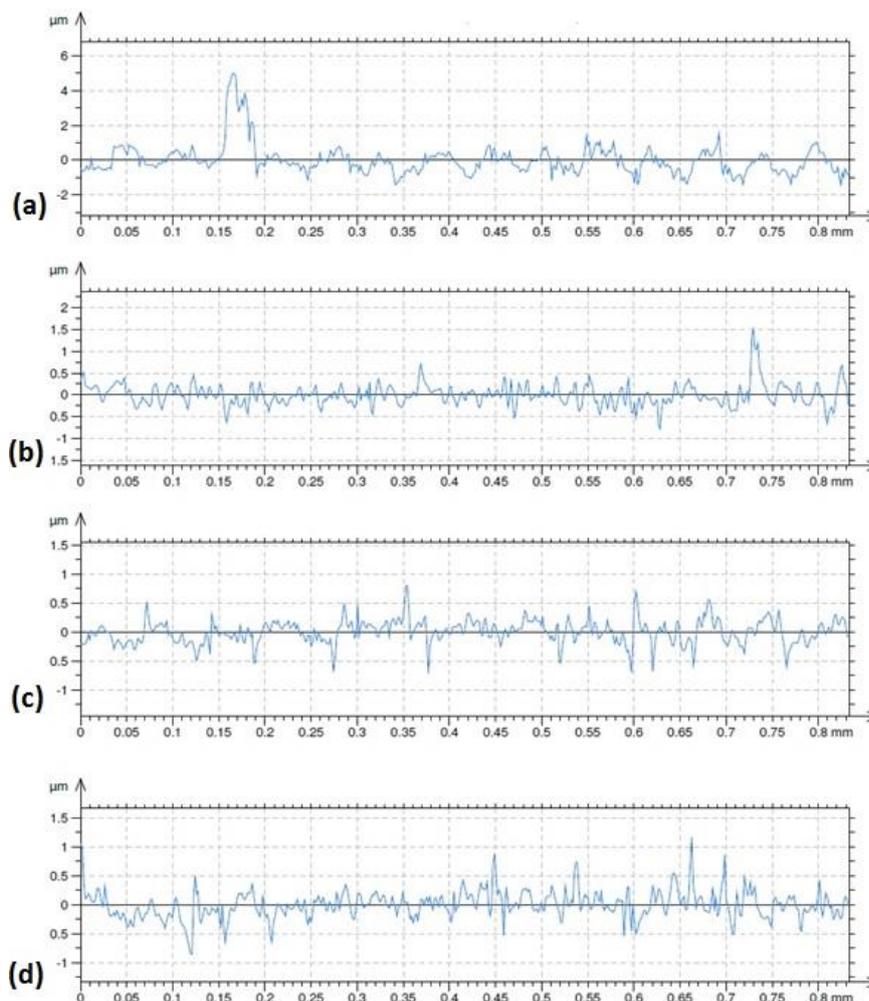


Figura 4-22 – Topografias, obtidas por IDLB, em 3D dos corpos de prova após os ensaios: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível.

A Figura 4-23 apresenta os perfis de rugosidade dos quatro níveis. É possível perceber, em comparação com a Figura 4-19, que após os ensaios o perfil apresentou uma amenização nos picos. Antes dos ensaios existiam picos com grandeza de até 10 µm e, após os ensaios, os picos passaram a valores entre 1 a 5 µm. Notou-se também que os perfis apresentaram, em relação ao aumento do carregamento normal, tendência de amenização, evidenciando a diminuição da rugosidade.



**Figura 4-23 – Perfis de rugosidade, obtidos por IDLB, dos corpos de prova após os ensaios: (a) primeiro nível (b) segundo nível (c) terceiro nível (d) quarto nível.**

A Tabela 4-4 apresenta alguns parâmetros de rugosidade para efeito comparativo entre quatro níveis de força normal antes e após os ensaios. Constatase que houve redução drástica em todos os parâmetros após os ensaios e independente do nível de força normal aplicado os resultados dos valores de rugosidade tiveram pouca dispersão, como pode ser verificado pelos desvios-padrão apresentados. Os valores médios de  $S_a$  e  $S_q$ , que eram respectivamente  $2,42 \pm 0,05$  e  $3,29 \pm 0,05$ , para as condições iniciais da superfície, passaram para valores, respectivamente, de  $0,19 \pm 0,01$  e  $0,33 \pm 0,06$  após os ensaios de quarto nível. Isso demonstra que os ensaios de desgaste tenderam a alisar as superfícies. Os parâmetros associados à média das amplitudes de rugosidade  $S_z$ ,  $S_p$  e  $S_v$  que apresentavam antes, respectivamente,  $27,5 \pm 0,6$ ,  $12,9 \pm 0,6$  e  $14,6 \pm 0,1$  passaram

para os valores  $5,7 \pm 2,4$ ,  $4,7 \pm 2,5$  e  $1,0 \pm 0,1$  após o quarto nível de ensaio. Por fim, foi constatado, porém em menor intensidade, a redução no parâmetro Sds.

**Tabela 4-4 – Valores dos parâmetros de rugosidade para o corpo de prova, antes e após os ensaios, para quatro níveis de força normal.**

Parâmetro	Antes	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	$2,42 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,08$	$0,19 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,01$
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	$3,29 \pm 0,05$	$0,67 \pm 0,09$	$0,28 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,1$	$0,33 \pm 0,06$
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	$27,5 \pm 0,6$	$6,2 \pm 0,7$	$4,1 \pm 0,8$	$5,0 \pm 1,6$	$5,7 \pm 2,4$
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	$12,9 \pm 0,6$	$4,4 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,6$	$4,2 \pm 1,5$	$4,7 \pm 2,5$
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	$14,6 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$
Sds [ $\text{mm}^2$ ]	$19330 \pm 304$	$18488 \pm 200$	$15140 \pm 292$	$15540 \pm 963$	$15847 \pm 213$

A Figura 4-24 apresenta um comparativo entre os parâmetros de rugosidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios do presente trabalho com os obtidos por Do Vale (2014) nos ensaios do tipo mancal sobre eixo. Constata-se que o acabamento superficial dos corpos de prova foi consideravelmente diferente: o parâmetro Sa obtido no corpo de prova do presente trabalho foi aproximadamente três vezes menor do que o utilizado por Do Vale (2014). Todos os parâmetros de rugosidade, com exceção do parâmetro Sds, apresentaram maior taxa de redução nos ensaios pino sobre disco do que nos de mancal sobre eixo.

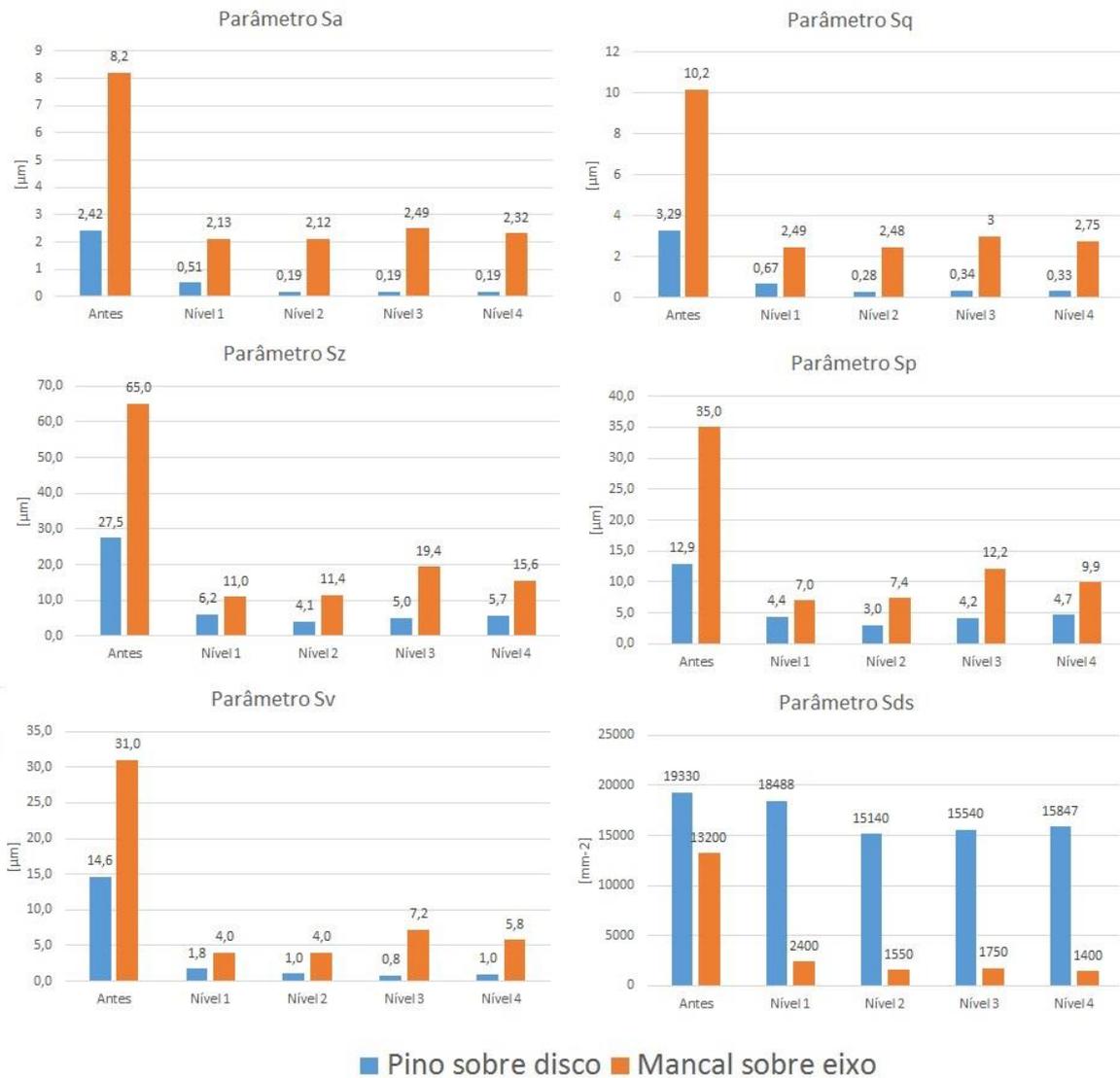
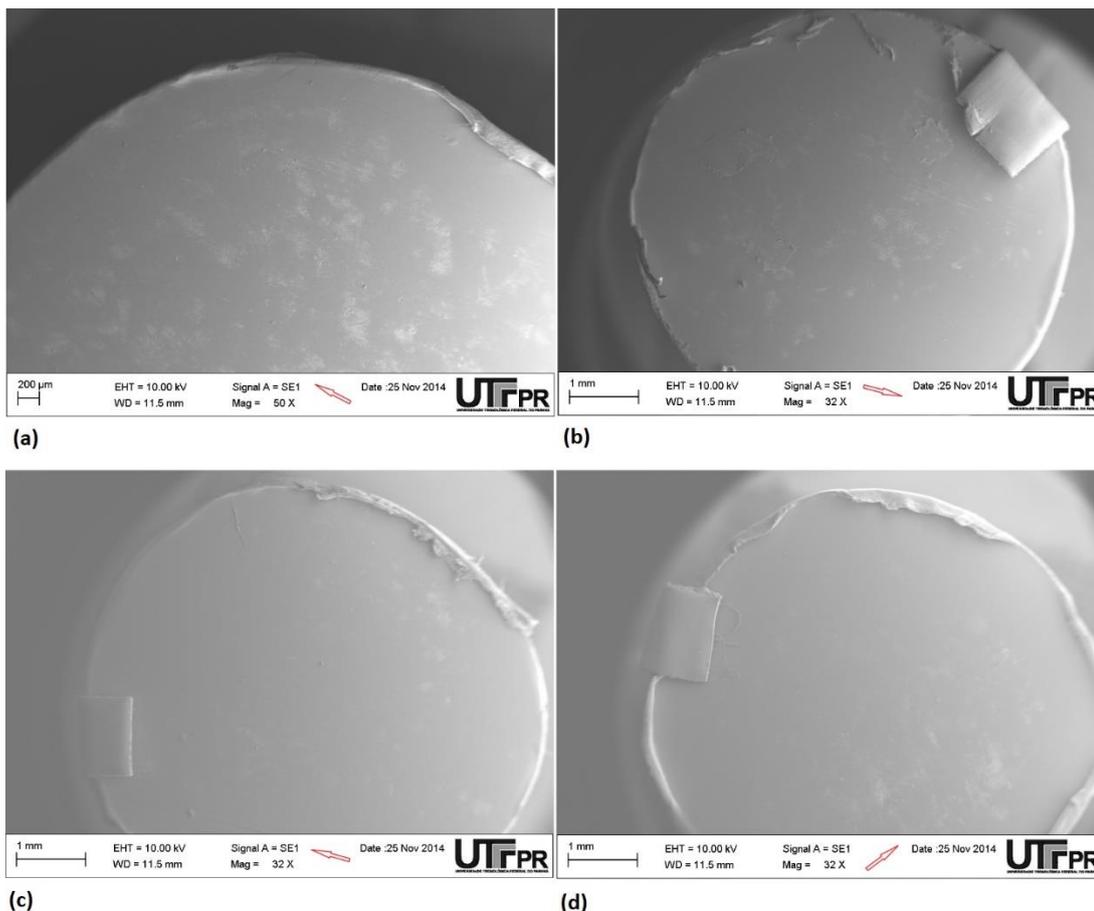


Figura 4-24 – Comparativo dos parâmetros de rugosidade obtidos dos corpos de prova dos ensaios pino sobre disco (em azul) e mancal sobre eixo (em laranja).

A Figura 4-25 apresenta imagens no MEV das superfícies dos corpos de prova do nível um a quatro. Percebe-se que com o aumento da carga normal existe um crescente acúmulo de material polimérico nas bordas dos corpos de prova.



**Figura 4-25 – Imagens obtidas por MEV da superfície dos corpos de prova após os ensaios de desgaste (o sentido de deslizamento é indicado pela seta vermelha): (a) nível um (b) nível dois (c) nível três (d) nível quatro.**

Na análise das superfícies poliméricas desgastadas após os ensaios verificou-se que houve deformação em pequenas regiões da superfície, presente em todos os quatro níveis, conforme ilustra a Figura 4-26(a). Acredita-se que este fator se deve ao resultado de forças adesivas entre o polímero e o aço que, com a sequência do movimento, resultaria no desprendimento de partículas poliméricas, Figura 4-26(b), caracterizando desgaste adesivo.

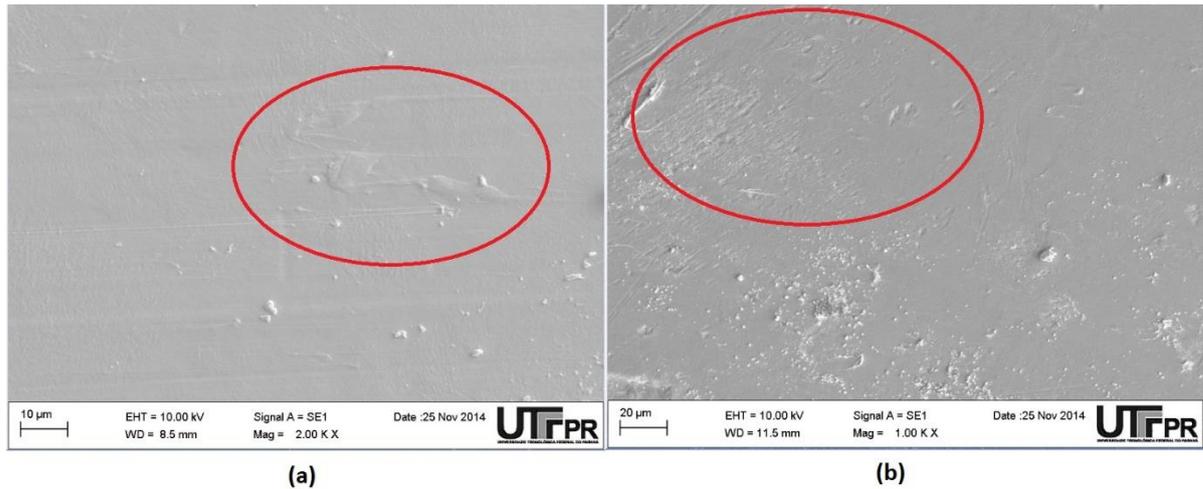


Figura 4-26 – Imagens obtidas por MEV das superfícies dos corpos de prova, após os ensaios: (a) região com formação de partículas poliméricas (b) região com desprendimento de partículas poliméricas.

Na Figura 4-27 são apresentadas partículas de desgaste aderidas à superfície do material polimérico. A discussão destes produtos do desgaste é apresentada na Seção 4.3.4.

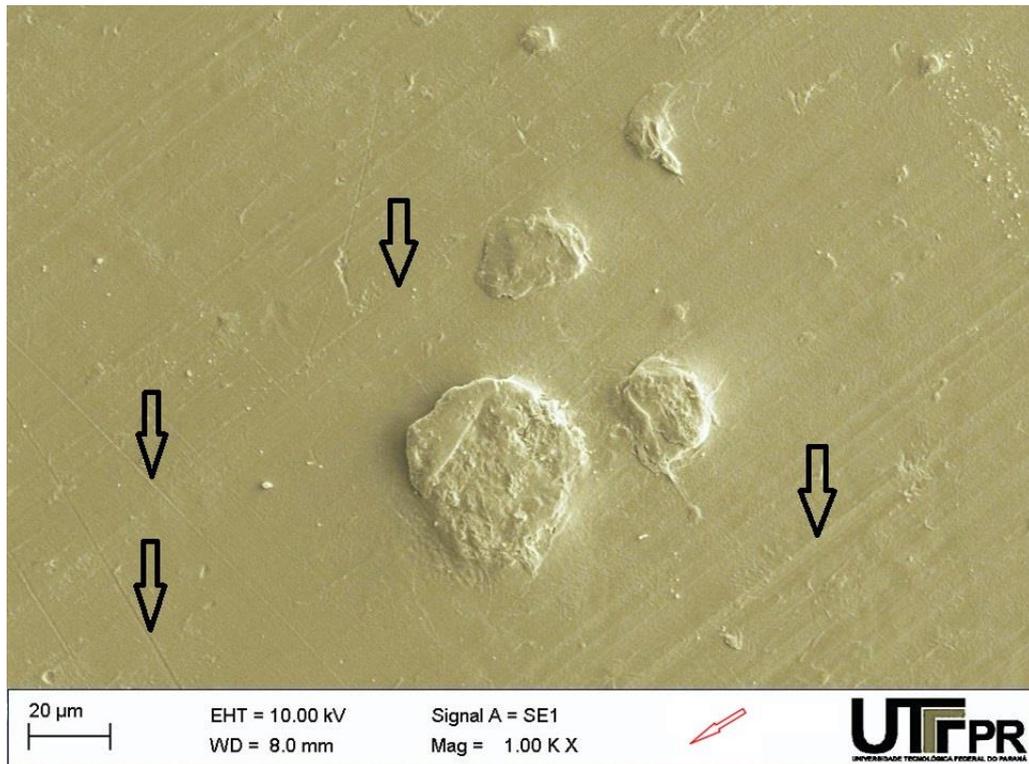


Figura 4-27 – Imagem obtida por MEV (o sentido de deslizamento é indicado pela seta vermelha) com partículas aderidas à superfície polimérica com riscos alinhados e não alinhados ao sentido de deslizamento.

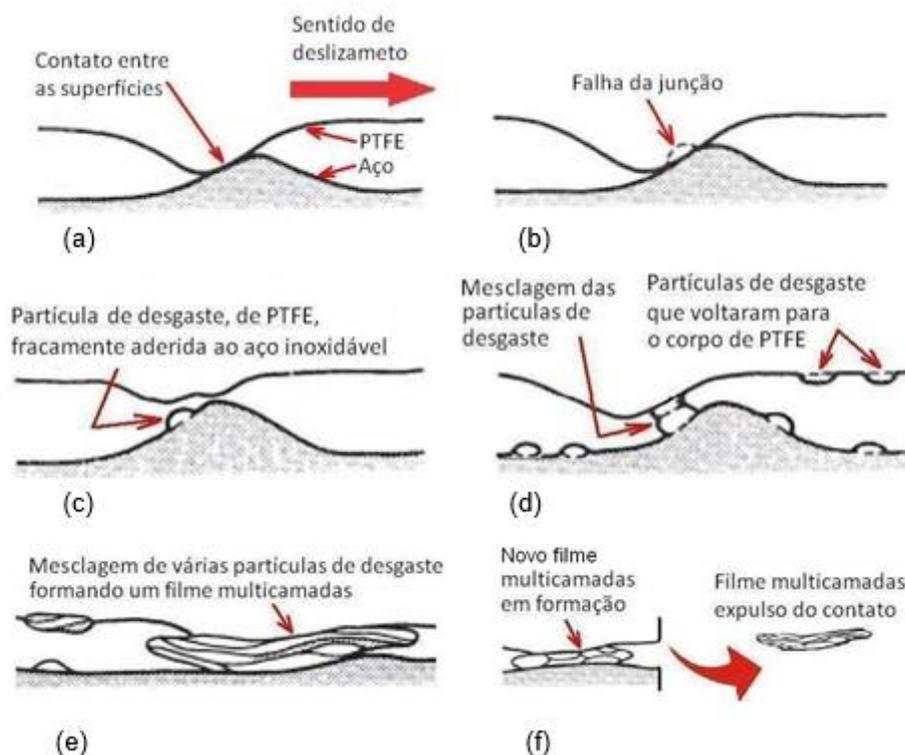
Na Figura 4-27 podem ser observados alguns riscos não alinhados ao sentido de deslizamento. A hipótese para o surgimento destes riscos é que estes foram resultantes do movimento das partículas de desgaste, formada no contato e expulsa durante o deslizamento. Devido a forma de contato e ao funcionamento do movimento entre corpo de prova e contra-corpo no ensaio pino sobre disco, a direção em que a partícula é expulsa do sistema é aleatória. Nos ensaios do tipo mancal sobre eixo os riscos associados à fuga de partículas apresentavam uma inclinação de 90 graus em relação ao sentido de deslizamento.

Também na Figura 4-27 encontram-se riscos alinhados ao sentido de deslizamento, que demonstram a existência de micromecanismos de abrasão na remoção do material demonstrados esquematicamente na Figura 2-9.

Pode-se então concluir que dois mecanismos de desgaste foram observados: adesivo e abrasivo, muito embora o primeiro tenha sido predominante para o sistema tribológico pino sobre disco. Nos ensaios realizados por Do vale (2014) também foram observados estes dois mecanismos de desgaste.

#### **4.3.4 Produtos do desgaste**

Conforme foi observado na Seção 4.3.3 o desgaste manteve-se predominantemente no material polimérico. A fim de um maior entendimento dos mecanismos envolvidos no desgaste faz-se necessário identificar as etapas de formação dos produtos de desgaste, conforme pode ser visto na Figura 4-28.



**Figura 4-28 – Esquema de formação dos produtos do desgaste: (a) contato entre as superfícies (b) falha da junção (c) desprendimento de partícula de desgaste (d) mesclagem das partículas de desgaste (e) formação do filme multicamadas (f) expulsão do filme multicamadas da região de contato.**

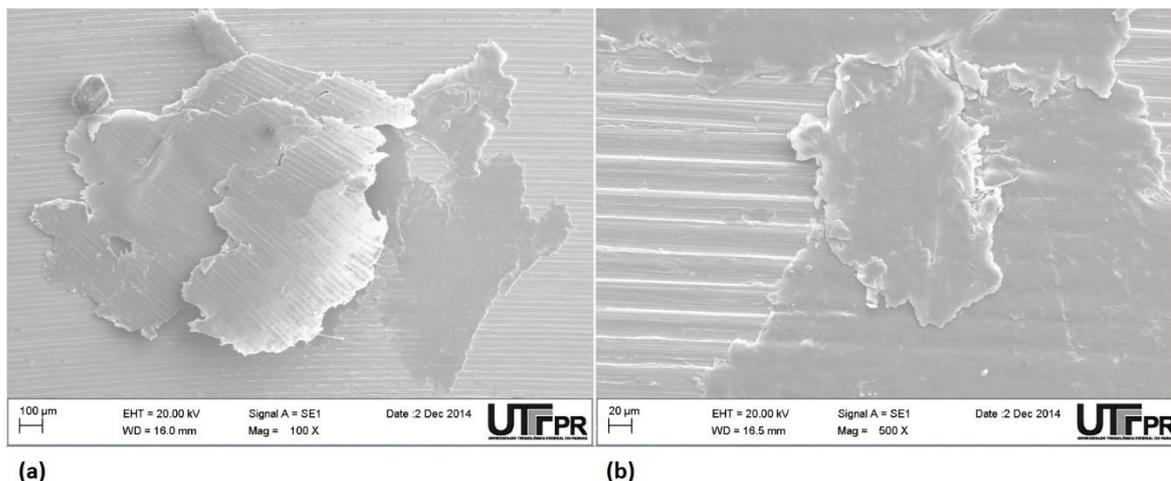
Fonte: Adaptado por Do Vale (2014) de Hutchings (1992 *apud* SASADA<sup>3</sup>, 1984).

No início do contato entre as superfícies, conforme pode ser visto na Figura 4-28(a), existe o surgimento de forças adesivas entre elas. Para o PTFE a intensidade das forças de adesão é tal que supera a intensidade das forças de ligação intermoleculares. Isso ocorre porque a ligação entre as cadeias de PTFE é bastante fraca, do tipo Van Der Waals. Com o deslizamento entre os corpos há o surgimento de tensões cisalhantes no contato que, devido ao atrito, causam deformações no material polimérico. A deformação apresentada na superfície do polímero pode ser vista na Figura 4-26.

Ao continuar o deslizamento, conforme visto na Figura 4-28(b), existe o surgimento de falhas nas junções do PTFE e, conseqüentemente, há o desprendimento das partículas de desgaste, formadas de segmentos do polímero, no formato de filmes de pequena espessura.

<sup>3</sup> SASADA, T. *Tribology in the 80s*, NASA Conf. Pub. 2300, Vol. I, p. 197-218, 1984.

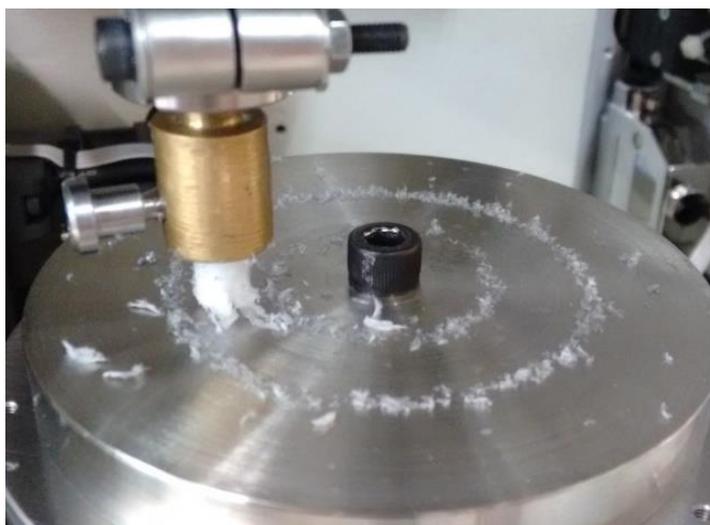




**Figura 4-30 – Imagens obtidas por MEV: (a) filmes multicamadas aderidas à superfície do contra-corpo (b) idem.**

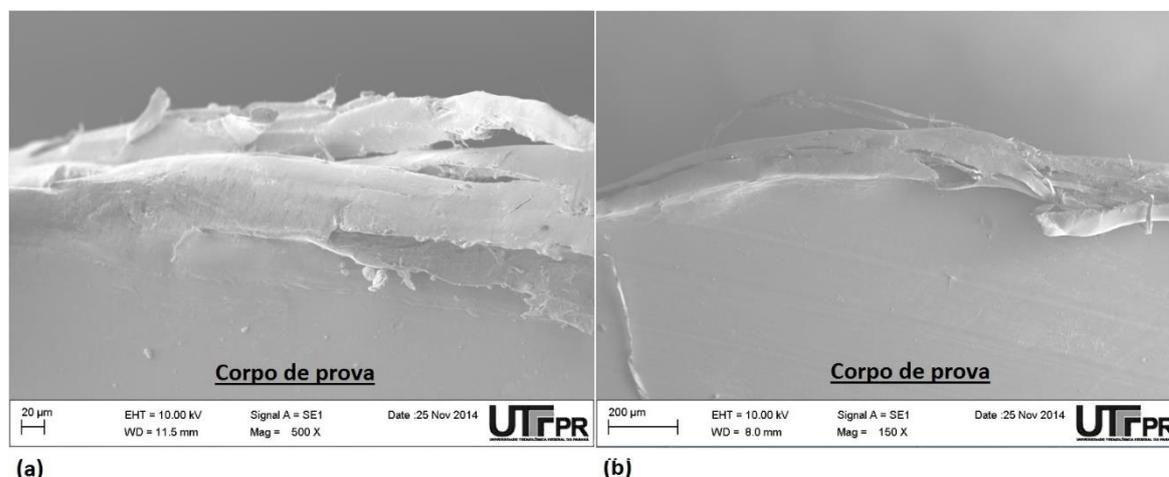
Na sequência do deslizamento, estes filmes multicamadas são expulsos do contato, conforme visto na Figura 4-28(f). Nesta condição, acredita-se que outros filmes multicamadas são gerados, devido à união das várias partículas de desgaste que são continuamente desprendidas no contato.

A condição típica, dos pares tribológicos, logo após a finalização dos ensaios é apresentada na Figura 4-31. Pode-se perceber que existe uma grande quantidade de filmes multicamadas expulsos do contato. Também é perceptível que existe o acúmulo de material polimérico nas laterais da pista de deslizamento.



**Figura 4-31 – Fotografia de um par tribológico, após o ensaio de desgaste, com a condição típica de vários filmes multicamadas expulsos e o acúmulo de material polimérico nas laterais da pista de deslizamento.**

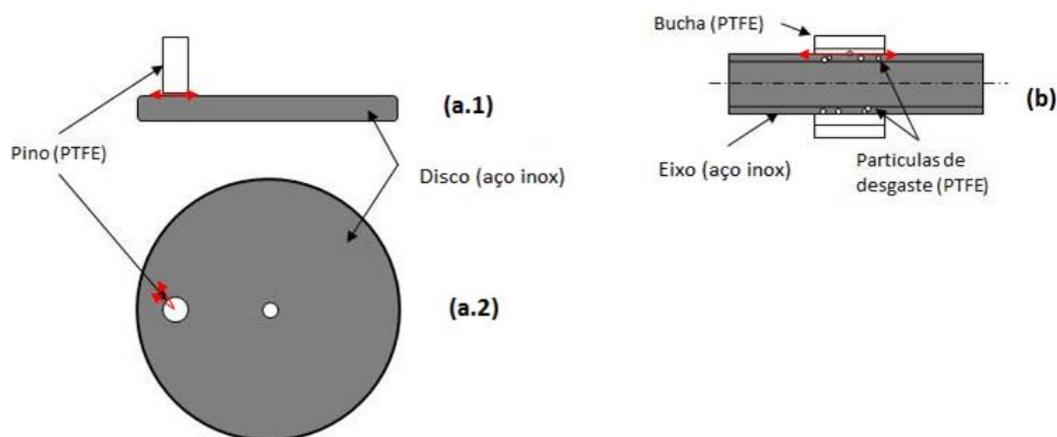
A Figura 4-32 apresenta imagens, obtidas por MEV, em que pode-se perceber o acúmulo de filmes multicamadas de PTFE nas bordas dos corpos de prova.



**Figura 4-32 – Imagem obtida por MEV: (a) borda de um corpo de prova com acúmulo de filmes multicamadas (b) idem.**

O comportamento das partículas de desgaste dos ensaios pino sobre disco e mancal sobre eixo foi bastante semelhante. Apesar do tamanho das partículas expulsas no ensaio pino sobre disco apresentarem-se menores que as do mancal sobre eixo, as diferenças observadas nas partículas dos dois ensaios foram sutis, e estão mais atreladas aos diferentes formatos dos corpos de prova e contra-corpos. Diferença esta pode ser observada na forma como as partículas e filmes são projetados com o movimento do contra-corpo. Para o ensaio mancal sobre eixo as partículas tendem a ser projetadas formando ângulo de 90 graus com o sentido de deslizamento. No ensaio pino sobre disco o material polimérico é projetado, com inclinações aleatórias conforme foi observado na Figura 4-27, para a borda da pista de deslizamento, onde é constatado acúmulo de material.

A diferença de tamanho das partículas dos dois ensaios pode ser explicada por este mecanismo de projeção das partículas dos dois sistemas tribológico, e por diferentes propensões para acúmulo de filmes multicamadas ainda no contato. Enquanto no ensaio pino sobre disco a partícula desprendida precisa percorrer uma distância máxima equivalente ao raio do pino, no ensaio mancal sobre eixo a partícula provavelmente percorreria uma distância maior, visto que o formato da bucha faz com que seja necessário maior deslocamento, conforme esquematizado na Figura 4-33.

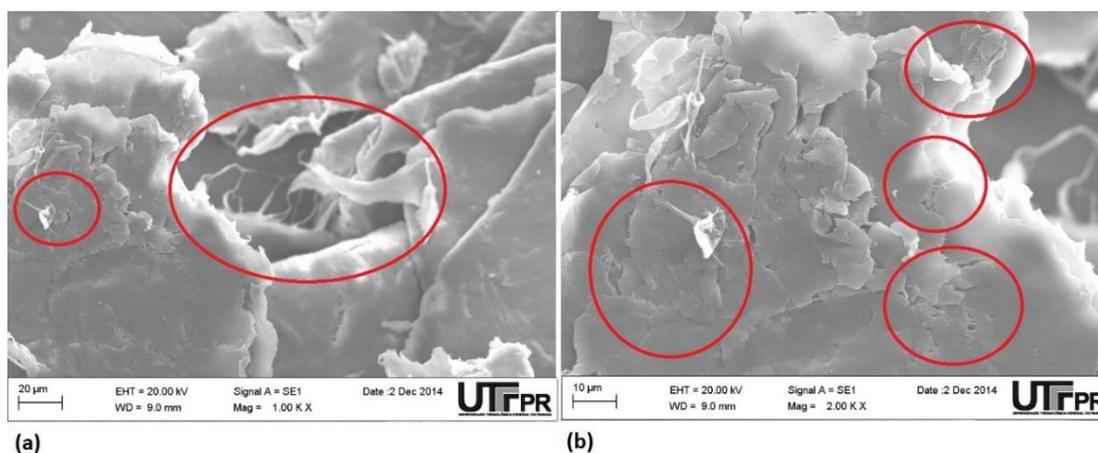


**Figura 4-33 – Esquemático do mecanismo de expulsão das partículas (setas vermelhas indicam possível sentido de expulsão das partículas): (a.1) vista lateral - pino sobre disco (a.2) vista superior - pino sobre disco (b) vista lateral - mancal sobre eixo.**

Conforme pode ser visto na Figura 4-33 as partículas desprendidas no sistema mancal sobre eixo possuem, em geral, maior distância a percorrer e, assim, maior probabilidade à adesão a outras partículas desprendidas e, desta forma, a geração de maiores filmes multicamadas.

#### 4.3.5 Alterações nas propriedades dos materiais devido ao ensaio de desgaste.

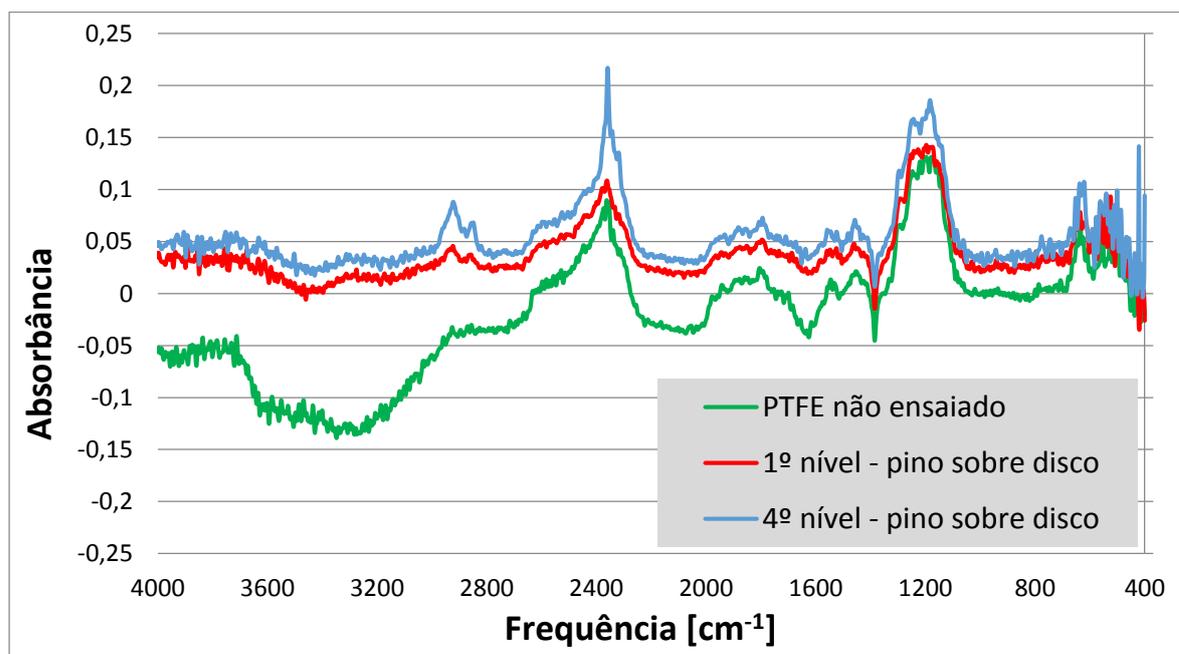
O polímero após os ensaios apresentou formação de fibrila. Conforme explicado na Seção 2.3.1.4, a formação da fibrila é um processo que desenrola as regiões cristalinas, o que gera uma estrutura similar a uma fita cristalina, com significativa elevação do grau de cristalinidade. A Figura 4-34 apresenta imagens obtidas por MEV que evidenciam a presença de fibrilas nas partículas de desgaste.



**Figura 4-34 – Imagens obtidas por MEV: (a) material polimérico com a presença de fibrilas (b) idem.**

Nos ensaios realizados por Vale e Silva (2015), do tipo mancal sobre eixo, também foi constatado a formação de fibrilas, o que evidenciou aumento de cristalinidade no material polimérico.

A Figura 4-35 apresenta os espectros de FTIR referentes aos filmes multicamadas coletados nos ensaios do primeiro e quarto nível de carregamento normal e para o PTFE não submetido ao ensaio de desgaste. Percebe-se que os perfis são bastante semelhantes com exceção de algumas regiões nos espectros dos filmes multicamadas, em que percebe-se o surgimento de picos que contrastam com o do PTFE não ensaiado. Conforme Vale (2014) essas regiões indicam possível quebra nas ligações entre flúor e carbono e, devido à combinação de fatores externos (umidade e oxigênio) junto com o aumento da temperatura e esforços mecânicos envolvidos no processo de desgaste, surgimento de diferentes ligações.



**Figura 4-35 – Espectros de FTIR para os filmes multicamadas do primeiro e quarto nível de carregamento normal e para o PTFE não submetido ao ensaio de desgaste.**

A Figura 4-36 apresenta o comparativo entre os espectros obtidos, para o quarto nível de carregamento normal, do presente trabalho com os do sistema mancal sobre eixo. Percebe-se que os picos encontrados em ambos os sistemas tribológicos ocorrem nas mesmas faixas de frequência, porém com maior intensidade para o sistema mancal sobre eixo. A diferença de amplitudes se deve ao maior esforço encontrado no sistema mancal sobre eixo que, associado aos fatores externos,

propicia mais quebras das ligações entre flúor e carbono no polímero. Como constatou Do Vale (2014), para as energias próximas de  $2942\text{ cm}^{-1}$  encontraram-se sinais exclusivos para os filmes submetidos ao desgaste e que são característicos de interações primárias e secundárias entre diferentes grupos OH.

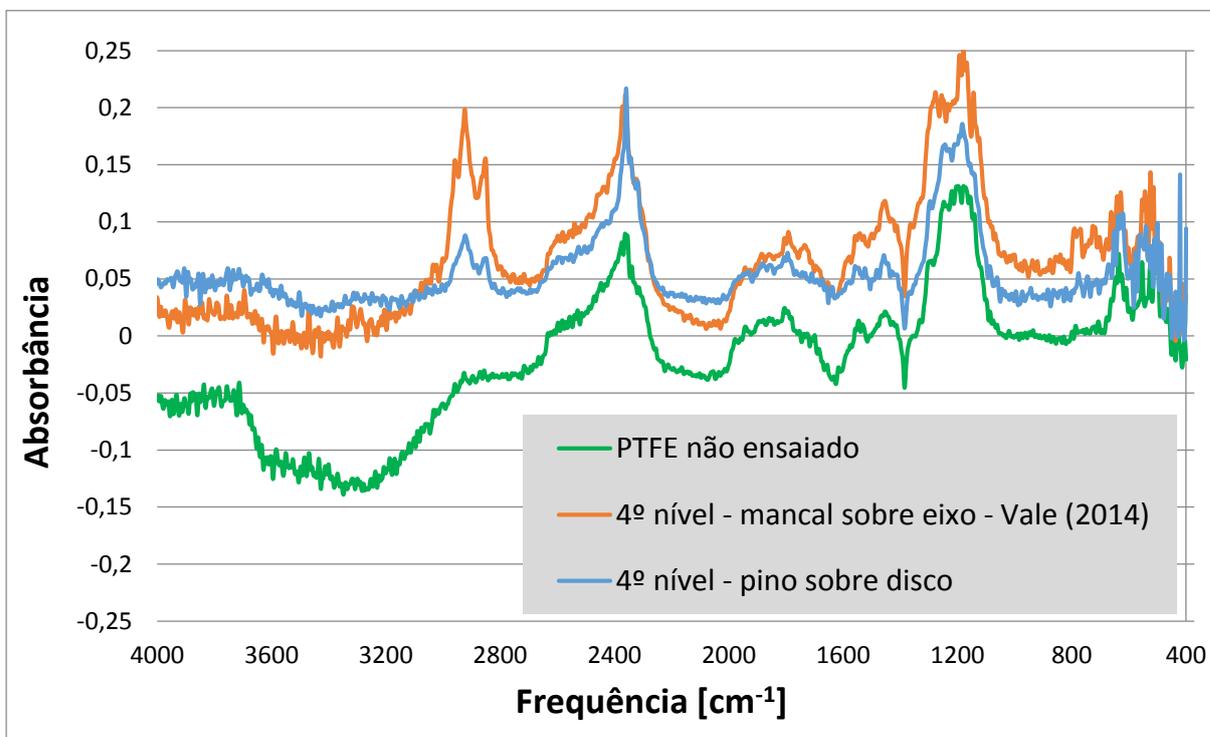


Figura 4-36 – Espectros de FTIR obtidos para os sistemas pino sobre disco e mancal sobre eixo para os filmes multicamadas do quarto nível de carregamento normal.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho de conclusão de curso em que se estudou o comportamento tribológico do sistema PTFE em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável AISI 304, com condição PV constante, em ensaios do tipo pino sobre disco, comparando-os com os realizados por Do Vale (2014), do tipo mancal sobre eixo, concluiu-se que:

- ❖ O coeficiente de atrito cinético no sistema pino sobre disco estabilizou após 70 segundos de ensaio. Este tempo de estabilização foi muito inferior aos 100 minutos necessários na configuração mancal sobre eixo. As médias dos últimos 100 segundos, foram proporcionais a  $F_N^{-0,226}$ , enquanto na configuração mancal sobre eixo os valores médios, no patamar da estabilidade, foram proporcionais a  $F_N^{-0,33}$ . Esta diferença se dá provavelmente à presença de maior plasticidade no ensaio pino sobre disco;
- ❖ Os valores do coeficiente de atrito cinético apresentaram maior diminuição com o aumento do carregamento normal para os ensaios mancal sobre eixo;
- ❖ Mostrou-se impraticável, por tempo suficiente para se atingir uma patamar de estabilidade, a coleta de temperatura no contato na configuração proposta, pois a concepção utilizada para o corpo de prova impossibilitou ensaios com maior duração, ainda assim, dentro do mesmo tempo de ensaio, os valores mostraram-se abaixo dos encontrados para ensaio mancal sobre eixo. Essa diferença foi constatada devido às diferentes condições de dissipação térmica dos dois ensaios;
- ❖ Os corpos de PTFE apresentaram taxa de desgaste estaticamente iguais, com valor médio de 0,08 g/h para os quatro níveis de carregamento normal.
- ❖ Os valores de desgaste volumétrico por distancia de deslizamento apresentaram aumento com acréscimo da força normal;
- ❖ Os coeficientes de desgaste adimensional de Archard foram muito próximos entre si para os quatro níveis, e também próximos aos valores encontrados por Do Vale (2014) e o valor determinado por Archard (2013);
- ❖ A topografia dos contra-corpos apresentou-se com ondulações provenientes do processo de usinagem, e teve alterações sutis após os ensaios de desgaste,

assim como constatado por Do Vale (2014) no sistema mancal sobre eixo. Foram encontradas partículas de desgaste aderidas às superfícies após os ensaios em ambos os sistemas;

- ❖ Para os corpos de prova constatou-se que com o aumento do carregamento normal existiu maior alisamento da superfície para ambos os sistemas tribológicos. Percebeu-se também que, para ambos os tipos de ensaio, houve uma tendência de imposição do perfil do contra-corpo no corpo de prova;
- ❖ O mecanismo predominante no desgaste do PTFE foi o adesivo, assim como constatado nos ensaios do tipo mancal sobre eixo;
- ❖ Foram encontrados indícios de processo de microcorte no sentido de deslizamento nas partículas aderidas ao corpo de prova, assim como constatado nos ensaios do tipo mancal sobre eixo;
- ❖ As partículas de desgaste foram mescladas no contato e, desta forma, formaram filmes multicamadas que posteriormente foram expulsos do contato devido ao movimento relativo entre o corpo e o contra-corpo. Os filmes expulsos acumularam-se nas laterais das pistas de deslizamento. As partículas encontradas no sistema pino sobre disco foram menores do que as do sistema mancal sobre eixo;
- ❖ Constatou-se formação de fibrila, durante o estiramento das partículas de desgastante, em ambos os ensaios.
- ❖ Os espectros de FTIR, para ambos os sistemas tribológicos, indicam quebras nas ligações entre flúor e carbono no PTFE desgastado. A combinação da presença de umidade e oxigênio associados com elevada temperatura no contato e esforços mecânicos sofridos pelo material durante a remoção das partículas de desgaste é a possível causa das alterações na cadeia polimérica.

Diante do exposto conclui-se que se obteve sucesso na avaliação do comportamento tribológico. Houve semelhança entre os dois sistemas nos mecanismos de desgaste e nas alterações topográficas encontradas, enquanto que para os valores de temperatura e coeficiente de atrito cinético foram encontradas diferenças: maior aquecimento e maior diminuição no coeficiente de atrito para os ensaios tipo mancal sobre eixo. Por fim conclui-se que a utilização do sistema pino

sobre disco como base de dados para o projeto de um mancal de deslizamento não é ideal.

Sugestão para trabalhos futuros:

- ❖ Reavaliar a concepção do corpo de prova de modo que seja possível alcançar o patamar de estabilidade na coleta de temperatura;
- ❖ Avaliar as alterações impostas pelo desgaste utilizando o método por calorimetria explanatória diferencial (DSC).
- ❖ Realizar ensaios no sistema pino sobre disco para valores de  $F_N$  iguais aos utilizados Do Vale (2014).

## 6 REFERÊNCIAS

ABINOX, s.d. COLETÂNEA DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS – AÇO INOXIDÁVEL. [Online]

Available at: <http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/tipos-de-acos-inoxidaveis.pdf>

[Acesso em 19 Agosto 2014].

Anon., 2014. Taylor Hobson. [Online]

Available at: [http://www.taylorhobson.com.br/pdf/147\\_espec.pdf](http://www.taylorhobson.com.br/pdf/147_espec.pdf)

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

ARCHARD, J. F., 1957. Elastic deformation and the laws of friction. *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 190-205.

ARCHARD, J. F. & HIRST, W., 1956. The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings of the Royal Society of London*, Volume 236, pp. 397- 410.

ASHBY, M. F., 1992. *Materials Selection in Mechanical Design*. 1ª ed. Oxford: Pergamon Press Ltd.

ASM Handbook, 1992. *Friction, Lubrification and Wear Technology*. s.l.:s.n.

BOWDEN, F. P. & TABOR, D., 1950. *The Friction and Lubrication of Solids*. New York: Oxford University Press.

BROWN, E. N. & DATTELBAUM, D. M., 2005. The role of crystalline phase on fracture and microstructure evolution of. *Polymer v.46*, pp. 3056-3068.

CALLISTER, W. D. J., 2007. *Materials Science and Engineering*. 7ª ed. Utah: John Wiley & Sons, Inc..

CHALLEN, J. M. & OXLEY, P. L. B., 1979. Slip-line fields for explaining the mechanics of polishing and related processes. *Wear. v. 53*, pp. 229-243.

CHIFFRE, L. et al., 2000. Quantitative Characterisation of Surface Texture. *Manufacturing Technology*, pp. 635-652.

CONTE, M., PINEDO, B. & IGARTUA, A., 2013. Role of crystallinity on wear behavior of PTFE composites. *Wear. v. 307*, pp. 81-86.

DO VALE, J. L., 2014. *Estudo do comportamento tribológico do politetrafluoretileno em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável*. Curitiba: s.n.

DO VALE, J. L. & SILVA, C. H., 2015. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO E DAS ALTERAÇÕES DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO POLITETRAFLUORETILENO IMPOSTAS POR ENSAIO DE DESGASTE.. *COBEF*.

HUTCHINGS, I. M., 1992. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Cambridge: Butterworth-Heinemann.

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

KITAMURA, T. et al., 2000. Morphology Change in Polytetrafluoroethylene (PTFE) Porous Membrane Caused by Heat Treatment.. *Polymer Engineering And Science*., pp. 809-817.

QUAGLINI, V., DUBINI, P., FERRONI, D. & POGGI, C., 2009. Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications. *Materials and Design*, Volume 30, pp. 1650-1658.

RYMUZA, Z., 2007. Tribology of Polymers. *ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING*, p. 8.

SEABRA, L. M. S. d. C., 2000. *Comportamento tribológico de polímeros alimentares contra aço inoxidável em escorregamento não lubrificado*. Porto: s.n.

SILVA, C. H., 2003. *Degradação de UHMWPE e de POM Devido à Ação Tribológica Contra Aço Inoxidável e Alumina*.. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

STACHOVIK, G. W. & BATCHELOR, A. W., 2001. *Engineering Tribology*. 3ª ed. s.l.:Butterworth Heinemann.

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

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

## ANEXO A – CERTIFICADO DE FORNECIMENTO DO PTFE

**PAG COMERCIO E REPRESENTAÇÕES DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA**

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

CNPJ: 75.117.101/0001-46

I.E.: 101.34.470-35

Fone: (41) 3026-1634

Fax: (41) 3332-6075

Site: [www.peage.com.br](http://www.peage.com.br)E-mail: [pag.vendas@peage.com.br](mailto:pag.vendas@peage.com.br)

Curitiba, 26 de Junho de 2014

**CERTIFICADO DE CONFORMIDADE N° 1.368/14 – L****A****Fricnotec Industria e comercio de correias Ltda- CNPJ: 09394425/0001-05**

Almirante Tamandare - Pr

A/c: Sr(a). Felipe

Depto: Compras

Fone: 41 3657-4290

E-mail: [fricnotec@fricnotec.com.br](mailto:fricnotec@fricnotec.com.br)

Certificamos para os devidos fins que o material fornecido para a empresa acima, através da **NOTA FISCAL ELETRONICA N° 033.238** de 06/05/2014 e abaixo discriminados, atendem as normas de propriedades para:

Item	Cod.	Class. Fiscal	Descrição
01	121516	3916.9090	BASTAO PTFE BCO 07 MM

**AS PROPRIEDADES ABAIXO REPRESENTAM VALORES DE CATÁLOGO**

PROPRIEDADES	METODO DE ENSAIO	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO/TESTES
SPECIFIC GRAVITY	DIN 53479	G/CM3	2.1+/-0.02	2.17
TENSILE STRENGTH CD	DIN 53455	N/MM2	32	36
ELONGATION CD	DIN 53455	%	359	356
HARDNESS	INTERNO	SHORE D	60/54	58
BULK DENSITY	DIN 53268	G/L	600/800	620
SHRINK DURING SINTERING	INTERNO	%	3+/-0.05	3
FLOW	INTERNO	SEC/50G	3+/-1	
FLOW STABILITY	INTERNO	SEC/50 G	3+/-1	3
AVERAGE PELLET SIZE	INTERNO	MICRON	700-400	650

**ATENÇÃO:** Este material não pode ser utilizado em aplicações medicas que envolvem implantes permanentes no corpo humano.

Atenciosamente

ENG° AFONSO GRÖTZNER NETO