

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GERMANO WANDEMBRUCK

WILSON EDUARDO BARIONI

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE COMPOSTOS DE  
POLITETRAFLUORETILENO EM ENSAIO DE DESGASTE TIPO  
MANCAL SOBRE EIXO SEM LUBRIFICAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

GERMANO WANDEMBRUCK

WILSON EDUARDO BARIONI

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE COMPOSTOS DE  
POLITETRAFLUORETILENO EM ENSAIO DE DESGASTE TIPO  
MANCAL SOBRE EIXO SEM LUBRIFICAÇÃO**

Orientador: Prof. João Luiz do Vale, MSc  
Co-orientador: Prof. Carlos Henrique da  
Silva, Dr.

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

CURITIBA

2015

## TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “Avaliação tribológica de compostos de politetrafluoretileno em ensaio de desgaste tipo mancal sobre eixo sem lubrificação.”, realizada pelos alunos Germano Wandembruck e Wilson Eduardo Barioni, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. João Luiz do Vale, MSc

Co-orientador: Prof. Carlos Henrique da Silva, Dr.

Curitiba, 03 de Março de 2015.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Avaliação tribológica de compostos de politetrafluoretileno em ensaio de desgaste tipo mancal sobre eixo sem lubrificação”, realizada pelos alunos Germano Wandembruck e Wilson Eduardo Barioni, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. João Luiz do Vale, Msc  
Departamento, DAMEC da instituição  
Orientador

Prof. Carlos Henrique da Silva  
Departamento, DAMEC da instituição  
Co-orientador

Prof. Andre Nozomu, Msc  
Departamento, DAMEC da instituição  
Avaliador

Prof. Dr. Eng. Marco Antonio Luersen  
Departamento, DAMEC da instituição  
Avaliador

Curitiba, 03 de Março de 2015

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todos que colaboraram com a realização deste trabalho:

Primeiramente, ao Professor orientador Mestre João Luiz do Vale, juntamente com o co-orientador Doutor Carlos Henrique da Silva que nos auxiliaram na realização do trabalho.

Ao Sr. Vismar dos Anjos Junior, funcionário da empresa FGM – Plásticos de engenharia LTDA, que nos forneceu os polímeros.

A Sra. Ivone Kanarski, gestora de vendas da empresa Aceinox – Aço Inoxidável LTDA, que nos forneceu o material dos contra corpos.

Ao Sr. Dirceu, funcionário da empresa FERRALEN – Ferramentaria e Usinagem, que auxiliou-nos com a usinagem dos corpos e contra corpos.

Ao Victor Beltrão, estagiário do Laboratório de Metrologia Mecânica da UTFPR, pelo apoio nas medições com o interferômetro de luz branca.

Ao Professor Doutor Julio Cesar Klein das Neves pelo suporte dado para as análises de Microscopia Eletrônica De Varredura.

Aos Professores Mestre André Nozomu e Doutor Marco Antonio Luersen pelas sugestões e discussões nas defesas parciais desta dissertação.

Por fim, agradecemos aos amigos e familiares pelo apoio e compreensão constantes.

## RESUMO

Barioni, Wilson Eduardo. Wandembruck, Germano. **AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE COMPOSTOS DE POLITETRAFLUORETILENO EM ENSAIO DE DESGASTE TIPO MANCAL SOBRE EIXO SEM LUBRIFICAÇÃO**. Dissertação de trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O presente trabalho analisou o politetrafluoretileno (PTFE), um polímero muito utilizado em aplicações tribológicas, com dois tipos de enchimento, bronze e grafite, no intuito de verificar o desempenho tribológico e comparar com o PTFE puro. Sabe-se que o PTFE é um polímero que apresenta alta versatilidade de uso em várias áreas, tendo a combinação de suas propriedades químicas e mecânicas, como seu baixo coeficiente de atrito, torna-o interessante para aplicação como mancal de deslizamento. Dessa forma foi feita uma revisão bibliográfica com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre os materiais poliméricos e seus enchimentos, bem como os parâmetros que poderiam influenciar no atrito e no desgaste destes materiais. Dessa maneira, fez-se ensaios de longa duração no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR, para estudo do coeficiente de atrito cinético, temperatura no contato, verificação do desgaste e topografia da superfície. Executaram-se ensaios com um eixo metálico de aço inoxidável acoplado a um motor que deslizou sobre uma bucha polimérica, simulando o uso do PTFE com enchimentos como mancais de deslizamento. Foram realizadas cinco repetições, para quatro condições pré-definidas para cada material. Obtiveram-se os coeficientes de atrito e temperatura no contato para tais condições. Avaliações pré e pós ensaios das superfícies em contato foram feitas através das ferramentas de interferometria de luz branca, microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica. O PTFE com enchimento de grafite teve o menor coeficiente de atrito e menor desgaste da superfície. Em relação à temperatura no contato, para alta velocidade e baixa carga normal, obtêm-se o menor valor para o PTFE com enchimento de bronze, já para velocidade baixa e carga normal elevada o PTFE puro é o que alcançou menor valor de temperatura.

**Palavras-chave:** Atrito; Desgaste; Politetrafluoretileno; Enchimentos; Mancais de deslizamento.

## **ABSTRACT**

*This study examined the polytetrafluoroethylene (PTFE), a polymer widely used in tribological applications, with two types of filling, bronze and graphite, in order to verify the tribological performance and compare with pure PTFE. It is known that PTFE is a polymer which has a high versatility of use in various areas, taking a combination of chemical and mechanical properties, such as its low friction coefficient, makes it interesting for use as a sliding bearing. Thus was made a literature review in order to increase knowledge of polymeric materials and their fillers, and the parameters that could influence the friction and wear of these materials. Thus, long-term studies was made in the surfaces and Contact Laboratory (LASC) UTFPR to study the coefficient of kinetic friction, temperature in contact, check the wear and surface topography. Assays were performed with a stainless steel metal shaft coupled to a motor slid onto a polymeric bushing, simulating the use of fillers such as PTFE plain bearings. Five replicates were performed for four predefined conditions for each material. Afforded the temperature coefficients of friction and the contact to such conditions. Pre- and post testing of surfaces in contact were made through interferometry tools of white light, scanning electron microscopy and light microscopy. PTFE filled with graphite had the lowest coefficient of friction and low wear surface. Regarding the temperature in contact, for high speed and low normal load, we obtain the lowest value for PTFE with bronze filler, as for low speed and high normal load pure PTFE is what achieved lower temperature.*

**Keywords:** *Friction; wear; polytetrafluoroethylene; fillers; plain bearings .*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 - Mancal de deslizamento plano .....	18
Figura 2-2 - Tipos de mancais (a) Mancal de esferas (b) Mancal de rolos (c) Mancal bipartido com lubrificação.....	19
Figura 2-3 – Estrutura química do mero e da cadeia do PTFE .....	21
Figura 2-4 - Representação da área real de contato .....	24
Figura 2-5 - Representação da real área de contato com aumento da força normal .....	24
Figura 2-6 - Superfícies em contato .....	25
Figura 2-7 - Desgaste e mecanismo de transferência de filme de PTFE .....	26
Figura 2-8 - Irregularidades de materiais sólidos, evidenciando vales e picos .....	27
Figura 2-9 - Desgaste por adesão (a) Real (b) Esquemático .....	29
Figura 2-10 - Desgaste por abrasão (a) real (b) representativo .....	29
Figura 2-11 - Representação do desgaste por fadiga de contato.....	30
Figura 2-12 - Desenvolvimento do contato entre duas asperezas (I) Total contato (II) Contato em parte (III) Contato finalizado.....	31
Figura 2-13 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura no contato para PTFE e Poliester.....	32
Figura 2-14 - Análise qualitativa de desgaste em função da pressão de contato para diferentes materiais .....	33
Figura 2-15 - Curvas de temperatura no contato em função do tempo, para diferentes condições PV35	
Figura 2-16 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da condição PV para PEAD - Polietileno de alta Densidade.....	35
Figura 3-1 - Dimensões do corpo de PTFE com enchimento de bronze e grafite (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva .....	38
Figura 3-2 - Dimensões do contra-corpo de aço inoxidável AISI 304 (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva .....	38
Figura 3-3 - Esquema de medição do corpo para análise dimensional.....	39
Figura 3-4 - Esquema de medição do contra corpo para análise dimensional (a) vista isométrica do contra corpo (b) vista frontal .....	40

Figura 3-5 - 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 .....	42
Figura 3-6 - Detalhe do modo de aplicação de carga através de sistema de peso morto .....	42
Figura 3-7 - Vista explodida da montagem do contra corpo, corpo e parafuso de fixação na MAC ....	43
Figura 3-8 - Detalhes do corpo com adaptação do termopar para medição da temperatura no contato: vista em perspectiva com detalhes acrescentados .....	44
Figura 3-9 - Detalhes do corpo com adaptação do termopar para medição da temperatura no contato: fotografia da montagem do termopar no corpo .....	44
Figura 3-10 - Diagrama de corpo livre (a) corpo (b) haste de carga.....	46
Figura 3-11 - Preparação dos corpos para análises no MEV .....	50
Figura 4-1 - Dados do coeficiente de atrito cinético em função do tempo.....	53
Figura 4-2 - Médias do coeficiente de atrito cinético para cada condição ensaiada .....	55
Figura 4-3 - Valores médios para o coeficiente de atrito cinético para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos 20 minutos de ensaio.....	57
Figura 4-4 - Dados da temperatura no contato em função do tempo .....	59
Figura 4-5 - Médias da temperatura no contato para cada condição ensaiada .....	61
Figura 4-6 - Verificação do modelo de Bhushan (2002) com valores dos termos da Equação (13) em função do carregamento normal.....	62
Figura 4-7 - Distribuição de pressão para contato cilíndrico (a) distribuição de pressão elipsoidal prismática no contato cilíndrico (b) distribuição de pressão na região de contato.....	64
Figura 4-8 - Variação da largura da região de contato para os quatro níveis de força normal antes e após ensaios.....	64
Figura 4-9 - Largura nominal após os ensaios para as quatro condições de carga normal.....	65
Figura 4-10 - Topografias típicas do aço inoxidável, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste (a) em vista superior (b) em 3D .....	66
Figura 4-11 - Topografias do Aço Inoxidável trabalhando com PTFE com enchimento de bronze, obtidas por IDLB vista 3D, após o ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4.....	67
Figura 4-12 - Topografias do Aço Inoxidável trabalhando com PTFE com enchimento de grafite, obtidas por IDLB vista 3D, após do ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4.....	68

Figura 4-13 - Contra corpo de aço inoxidável, limite da área de contato (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul) .....	71
Figura 4-14 - (a) Região de contato entre os corpos onde se dá a formação do filme (b) Região do limite da área de contato (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul) .....	72
Figura 4-15 - Topografias típicas do PTFE com enchimento, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste (a) em vista superior do PTFE com enchimento de bronze (b) em 3D do PTFE com enchimento bronze (c) em vista superior do PTFE com enchimento grafite (d) em 3D do PTFE com enchimento grafite .....	73
Figura 4-16 - Imagens obtidas por MEV (a) topografia do PTFE com enchimento de bronze antes do ensaio (b) topografia do PTFE com enchimento de grafite antes do ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul).....	74
Figura 4-17 - Topografias, obtidas por IDLB, em vista superior dos corpos de PTFE com enchimento de bronze após ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul) (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4 .....	75
Figura 4-18 - Topografias, obtidas por IDLB, em vista superior dos corpos de PTFE com enchimento de grafite após ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul) (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4 .....	76
Figura 4-19 - Topografias do PTFE com enchimento de bronze, obtidas por IDLB vista 3D, após do ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4.....	77
Figura 4-20 - Topografias do PTFE com enchimento de grafite, obtidas por IDLB vista 3D, após do ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4.....	77
Figura 4-21 - Sobreposição de filme aderido no mancal de PTFE com enchimento de grafite após ensaio. Imagens obtidas por MEV (o sentido de deslizamento é indicado pelas setas azuis e sobreposição de filme indicado pelas setas vermelhas) .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Propriedades Mecânicas e Térmicas do PTFE .....	22
Tabela 2-2 - Enchimentos para PTFE e suas vantagens .....	23
Tabela 2-3 - Propriedades mecânicas e térmicas do aço inoxidável AISI 304.....	24
Tabela 3-1 - Verificação dimensional dos corpos .....	39
Tabela 3-2 - Principais dimensões dos contra-corpos de aço inoxidável.....	41
Tabela 3-3 - Planejamento dos ensaios em quatro níveis de força normal para o PTFE com enchimento de bronze .....	47
Tabela 3-4 - Planejamento dos ensaios em quatro níveis de força normal para o PTFE com enchimento de grafite .....	47
Tabela 4-1 - Valores de temperatura e umidade relativa do laboratório .....	52
Tabela 4-2 - Valores médios do coeficiente de atrito cinético, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio do PTFE com enchimento de bronze.....	54
Tabela 4-3 - Valores médios do coeficiente de atrito cinético, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio do PTFE com enchimento de grafite.....	55
Tabela 4-4 - Valores médios para a temperatura no contato, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio para o PTFE com enchimento de bronze.....	60
Tabela 4-5 - Valores médios para a temperatura no contato, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio para o PTFE com enchimento de grafite.....	60
Tabela 4-6 - Parâmetros de rugosidade para o aço inoxidável, antes e após ensaios, para quatro condições de força normal.....	70
Tabela 4-7 - Valores dos parâmetros de rugosidade para o PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, antes e após ensaios, para quatro condições de força normal .....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{mh}$	Força atribuída a massa do conjunto da haste de carga medido no ponto de aplicação da carga normal no corpo [g];
$F_{at}$	Força de atrito na interface [N];
$F_N$	Força normal aplicada na interface do contato do par tribológico [N];
$g$	Aceleração da gravidade [ $\text{mm.s}^{-2}$ ];
$H$	Dureza da superfície mais mole do par tribológico [ $\text{Nmm}^{-2}$ ];
$L_B$	Distância do centro do corpo até a célula de carga [m];
$L_c$	Distância do centro de giro da haste de carga até o ponto da aplicação das cargas [mm];
$L_w$	Distância do centro de giro da haste de carga até o ponto de aplicação da carga normal no corpo [mm];
$m_B$	Força transmitida pelo parafuso do corpo, à haste de transmissão de força e, medida na célula de carga [g];
$m_c$	Massa das cargas acrescidas à MAC [g];
$P_{max}$	Pressão máxima do contato entre corpo e contra-corpo [MPa];
$P_{média}$	Pressão média do contato entre corpo e contra-corpo [MPa];
$PV$	Parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [ $\text{MPa.m.s}^{-1}$ ];
$PV_{max}$	Condição máxima para parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [ $\text{MPa.m.s}^{-1}$ ];
$PV_{média}$	Condição média para parâmetro associado ao produto pressão de contato e velocidade de deslizamento no contato [ $\text{MPa.m.s}^{-1}$ ];
$\dot{Q}$	Taxa de energia dissipada em forma de calor [J/s];
$Q$	Volume desgastado por distância de deslizamento [ $\text{m}^3/\text{m}$ ];
$R_1$	Raio externo do contra-corpo [mm];
$R_2$	Raio interno do corpo [mm];
$t$	Tempo de duração do ensaio de desgaste [h];
$T$	Temperatura no contato [ $^{\circ}\text{C}$ ];
$V$	Velocidade de deslizamento no contato [m/s];
$\mu$	Coeficiente de atrito [-];
$A$	Área [ $\text{m}^2$ ]
$A_r$	Área de contato [ $\text{m}^2$ ]
$\alpha$	Fator de desgaste [ $\text{g/Nm}$ ]
$\dot{m}$	Taxa de desgaste mássico [g/h]
$\Delta m$	Perda de massa do corpo de prova durante o ensaio [g]
$\tau_c$	Tensão cisalhante nas junções dos contatos entre as asperezas [MPa].

## SUMÁRIO

TERMO DE ENCAMINHAMENTO	i
TERMO DE APROVAÇÃO	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos	15
1.2 Justificativa	15
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>17</b>
2.1 Mancais de Deslizamento	17
2.2 Polímeros	20
2.2.1 PTFE	21
2.3 Aço Inoxidável AISI 304	23
2.4 Atrito cinético em polímeros	24
2.4.1 Atrito devido à adesão	25
2.4.2 Atrito devido á deformação	26
2.5 Desgaste	27
2.5.1 Desgaste por adesão	28
2.5.2 Desgaste por abrasão	29
2.5.3 Desgaste por fadiga de contato	30
2.5.4 Modelo de Archard para quantificar o desgaste	30
2.6 Condições relevantes no contato	31
2.6.1 Velocidade de deslizamento	32
2.6.2 Pressão de contato	33
2.6.3 Condição PV	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
3.1 Materiais	37
3.2 Análise dimensional	38
3.3 Aparato	41
3.3.1 Modelo de atrito cinético para as condições geométricas da MAC	45
3.4 Planejamento dos ensaios	46
3.5 Avaliação dos ensaios de desgaste	49
3.6 Atmosfera do laboratório	49
3.7 Análises das superfícies das amostras	49
3.8 Análises topográficas	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>52</b>
4.1 Atmosfera do laboratório	52
4.2 Coeficiente de atrito cinético	52
4.3 Temperatura no contato	58
4.4 Desgaste	63

4.4.1	Quantificação de desgaste do par tribológico	63
4.4.2	Alterações na topografia do Aço Inoxidável	66
4.4.3	Alteração na topografia do PTFE com enchimento	72
5	CONCLUSÕES	81
6	REFERÊNCIAS	83
7	Anexo A	88
8	Anexo B	89

# 1 INTRODUÇÃO

O atrito é um fenômeno físico que consiste no efeito proveniente do movimento relativo de duas superfícies em contato, gerando assim forças tangenciais (NUNES, 2008). Apresentando uma grande importância prática, além de diversos efeitos negativos na economia, seja nos custos de uma empresa, seja no valor de um componente presente em uma máquina (KHODDAMZADEH *et al.*, 2009).

Tribologia é a ciência que estuda o atrito, sendo assim, tem caráter multidisciplinar, pois durante o contato entre duas superfícies em movimento relativo, ocorre transferência de energia e possibilidade de alteração das propriedades mecânicas e químicas destas superfícies (BHUSAN, 1999). A palavra tribologia vem do grego “tribo” que significa atrito, “logos” ciência ou estudo, e foi criada em 1967 (FRENE, 1990). Portanto, tribologia é o estudo do atrito que inclui lubrificação e desgaste provenientes da interação entre corpos que possuam movimentos relativos.

As primeiras análises científicas sobre atrito datam de muitos anos, especificamente no século XV, com o “pai da tribologia” como é conhecido hoje Leonardo Da Vinci (1452–1519) (BLAU, 2009). Em seus estudos, Da Vinci, analisou a força de atrito em planos horizontais e inclinados, tendo como conclusão que essa força é independente da área de contato aparente e dependente da força normal ao deslizamento dos corpos, com isso pode indicar a diferença de atrito de escorregamento e de rolamento, e propôs pela primeira vez o coeficiente de atrito, esse sendo proporcional à força normal (ZUM-GAHR, 1987).

Os impactos econômicos estudados pela tribologia foram publicados primeiramente por Jost e, devido a isso, considerados um marco na criação desta ciência, segundo ele, é possível reduzir as perdas por desgaste em aproximadamente 20% quando se faz uso do conhecimento existente (JOST, 1966). Além disso, torna-se importante levar em consideração o aspecto ambiental para a análise deste tipo de perda, visto que o resfriamento e a exaustão são considerados as maiores perdas em automóveis que transitam em uma cidade, visto que em média, num motor de automóvel, há 15% de perda por atrito. (ANDERSON, 1991).

Os prejuízos das indústrias e empresas com o desgaste por atrito estão relacionados com os custos em lubrificação, equipes de manutenção, reposição de peças e tempo de máquinas paradas. Estudos indicam que cerca de 70% das paradas de máquinas estejam relacionados com a degradação das superfícies, que se dão devido à má lubrificação em rolamentos, redutores, motores elétricos e acoplamentos. Nos custos com lubrificação também tem-se perdas com vazamentos, contaminação de lubrificantes e despesas com a equipe de manutenção que precisa fazer o mapeamento e controle de pontos críticos (CARDOSO, 2012). Em relatórios de manutenção fica evidente que as maiores causas de paradas de equipamentos estão relacionadas com componentes móveis, como engrenagens, acoplamentos, cames e com maior frequência de falhas os mancais (NORTON, 2003).

Segundo Norton (2003, p. 543) "sempre que duas partes têm movimento relativo, elas constituem um mancal por definição". Dessa maneira pode-se denominar como mancais: a camisa do cilindro do motor do carro, uma bucha em um eixo ou mesmo um pino num ferrolho. Com isso, percebe-se o quanto é vasto e ampla a aplicação de mancais nos equipamentos desenvolvidos pela humanidade.

Existe a possibilidade da utilização de lubrificantes para a diminuição do atrito e assim aumentar a vida útil do componente devido à redução do desgaste, porém em algumas aplicações não podem ser utilizados, como é o caso das indústrias de alimentos, em rolamentos que trabalham no vácuo, em temperatura elevadas entre outros (HUTCHINGS, 1992). Por esse motivo, e também levando em consideração a tendência dos lubrificantes elevarem o valor final do produto (KHODDAMZADEH *et al.*, 2009) e a degradação ambiental (CONTE *et al.*, 2012), nos últimos anos estão surgindo linhas de pesquisas para desenvolver materiais que sejam auto lubrificantes e atendam às necessidades de manutenção (GGB, 2010), assim surgindo espaço para aplicação de sólidos não-metálicos em mancais de deslizamento auto lubrificantes (HUTCHINGS, 1992).

Embora os sólidos metálicos e não-metálicos terem semelhanças fundamentais no comportamento ao desgaste devido ao atrito, existe significativas diferenças nos mecanismos envolvidos. Esta diferença pode ser explorada para produzir materiais para mancais de deslizamento, com melhor desempenho tribológico (STACHOVIAK;

BATCHELOR, 2001). Um exemplo disso é o Politetrafluoretileno (PTFE) que apresenta excelente propriedade auto lubrificante (TERVOORT, 2002), e pode proporcionar um coeficiente de atrito próximo de 0,05 na ausência completa de qualquer lubrificante. Porém, existem características que não são favoráveis como a sua alta taxa de desgaste, de modo que fica necessário a adição de enchimento de outros materiais (STACHOVIÁK; BATCHELOR, 2001).

## **1.1 Objetivos**

O presente trabalho teve como objetivo realizar a avaliação do desempenho tribológico de dois compostos comerciais de PTFE, um com 40% de enchimento de bronze, e outro com 20% de enchimento de grafite, em deslizamento sem lubrificação contra o aço inoxidável AISI 304. Estudaram-se fatores como coeficiente de atrito cinético, temperatura no contato, desgaste e alterações topográficas das superfícies.

Buscou-se, também, como objetivo secundário, comparar alguns resultados obtidos em trabalhos anteriores com PTFE puro nas mesmas condições de ensaio.

## **1.2 Justificativa**

Devido à ampla utilização de mancais poliméricos, características como a sua resistência a contaminação, baixa adesividade, baixos coeficientes de atrito, determinam esses materiais como opção em mancal de precisão (MARX; JUNGHANS, 1996; LIU e SCHAEFER, 2006). Neste sentido, a busca pelo entendimento do comportamento tribológico de materiais utilizados em mancais, pode apresentar diversos ganhos, que vão desde a melhoria no rendimento de uma fábrica até para a economia global. Acrescenta-se, que o estado da arte em mancais planos, visa o desenvolvimento de uma variedade grande de materiais que sejam auto lubrificantes e com maior durabilidade (INDUSTRY & ENGINEERING, 2010).

Todavia, há uma grande complexidade no comportamento dos materiais em uma aplicação tribológica e, muitas vezes, depende da natureza e da morfologia dos componentes do par tribológico e dos enchimentos adicionados (HARRIS, 2007).

Devido a isso, ensaios experimentais são de extrema importância para uma completa compreensão do desempenho tribológico de determinado material (MARX; JUNGHANS, 1996).

Sabendo, então, da grande complexidade no comportamento dos materiais em uma aplicação tribológica, onde há uma grande procura por parte de projetistas de máquinas e desenvolvedores de mancais por uma maneira de reduzir o atrito sem adição de lubrificantes líquidos, pelo fato que estes encarecem o projeto, além de contaminarem o meio ambiente (HARRIS, 2007; CONTE e IGARTUA, 2012), o presente estudo visa gerar informações úteis para tais profissionais utilizarem materiais corretos. Um deles é o PTFE, um material com baixo coeficiente de atrito e boa qualidade auto lubrificante. Sendo assim, a possibilidade de adicionar enchimentos a matriz de PTFE, acarreta melhoras significativas em seu desempenho. Dessa maneira, enchimentos de bronze, na busca que haja uma melhora na dissipação de calor e enchimento de grafite, para que haja melhora no coeficiente de atrito do par tribológico, devido sua característica de lubrificante, foram feitas e analisadas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas pesquisas voltadas aos assuntos de interesse do trabalho, visando maior esclarecimento e base teórica sobre o tema. Inicia-se com a descrição dos mancais de deslizamento, visto que esse elemento será o corpo da prova. Na sequência, os polímeros serão descritos, com foco no PTFE e suas características, bem como os enchimentos de bronze e grafite que serão utilizados. Segue-se com uma discussão sobre os principais parâmetros que podem influenciar o atrito e o desgaste e, posteriormente, será realizado um estudo dos principais mecanismos de desgaste que geralmente atuam em polímeros.

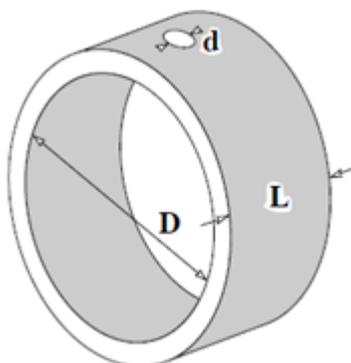
Além disso, tornou-se necessário descrever sobre as características dos aços inoxidáveis AISI 304, visto que este material será utilizado como contra corpo do trabalho.

### 2.1 Mancais de Deslizamento

Pode-se definir mancal como sendo um elemento de máquina que geralmente possui apenas um grau de liberdade, permitindo apenas movimento de rotação (STOETERAU, 2004). Toda vez que duas partes têm movimento relativo, elas constituem um mancal por definição não levando em consideração sua forma ou disposição. Mancais têm movimentos de escorregamento, rolamento ou ambos simultaneamente.

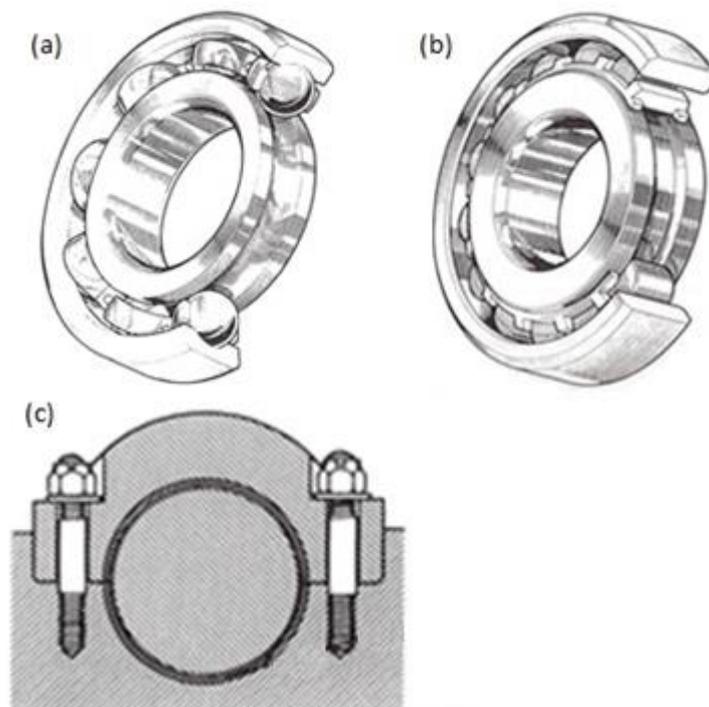
Dentre os mancais, os mancais de deslizamento foram os primeiros a serem criados pelo homem, esses possuem suas superfícies de movimento relativo em contato direto, podendo ter lubrificação ou não (STOETERAU, 2004). Estes mancais podem ser subdivididos em radiais, com eixo esférico, pivotado, axiais, mancais de deslizamento com geometria cônica e entre outros (DAVIDSON, 1972). Geralmente são utilizados em máquinas simples ou aparelhos de precisão, devido a característica de apresentarem elevada força de atrito entre as superfícies de contato que estão em movimento relativo (STOETERAU, 2004). Assim, por causa dessa característica, surge a necessidade de pesquisas de novos materiais para o desenvolvimento de mancais de deslizamento mais eficientes e confiáveis, que

atendam às necessidades de manutenção e de baixo valor. Na Figura 2-1 está representado um mancal de deslizamento plano.



**Figura 2-1 - Mancal de deslizamento plano**  
**Fonte: Adaptado de Stachoviak; Batchelor (2001)**

Um mancal plano é composto de materiais que se esfregam entre si, por exemplo, superfície plana que escorrega sobre outra superfície. Nos mancais desse tipo, uma das partes móveis provavelmente será de aço, ferro fundido ou outro material que apresente a resistência e dureza requeridas; já as partes contra as quais eles se movem são geralmente feitas de um material de apoio como polímeros não metálicos, bronze, etc. Mancais planos radial podem ser bipartidos para que sejam montados no eixo, ou podem ter formato de um círculo completo, chamado de bucha. Mancais axiais são aqueles que suportam cargas axiais. De maneira alternativa, existem mancais de elementos rolantes, os quais têm esferas endurecidas ou rolos depositos em pistas de aço endurecido, pois permite atrito muito baixo. Alguns tipos de mancais são apresentados na Figura 2-2.



**Figura 2-2 - Tipos de mancais (a) Mancal de esferas (b) Mancal de rolos (c) Mancal bipartido com lubrificação**

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

Com isso, sabe-se que mancais planos são tipicamente projetados sob especificação para determinada aplicação, já os mancais de elementos rolantes são determinados através do uso de catálogos de fabricantes para atender especificações, segundo cargas, velocidades e vida em aplicação (NORTON, 2003).

A utilização de lubrificantes em interfaces deslizantes tem muitos efeitos benéficos no coeficiente de atrito, podendo os lubrificantes ser líquidos, gasosos ou sólidos. Os lubrificantes sólidos ou líquidos têm em comum as propriedades de baixa resistência ao cisalhamento e alta resistência à compressão. Os lubrificantes gasosos são usados para obter atrito baixo em situações especiais e também para remover o calor da interface (NORTON, 2003).

Algumas propriedades procuradas em materiais de mancais são: baixo coeficiente de atrito entre as superfícies de contato que estão em movimento relativo, resistência à temperatura e à corrosão, que atendam às necessidades de manutenção e de baixo valor. Tais materiais de mancal devem ter pelo menos um terço da dureza do material que está se movendo em relação a ele, a fim de prover

acoplamento correto, sem contar a análise que diz respeito a compatibilidade dos materiais em contato (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001).

Com isso, alguns materiais não metálicos oferecem melhores desempenhos trabalhando a seco do que os metálicos, que geralmente apresentam desgastes severos. Alguns termoplásticos, como Nylon, Acetal e Teflon, oferecem um coeficiente de atrito pequeno contra qualquer metal, mas apresenta resistência a temperatura de fusão baixa, que combinadas com a condução de calor baixa, fazem com que haja limitação nas cargas e velocidades de operação (HUTCHINGS, 1992). Então mancais de termoplásticos são práticos quando as cargas e velocidades são baixas, podendo ser alterados com a adição de enchimentos que melhorem tais deficiências do material. As principais características do corpo de prova que será utilizado no trabalho são: substância praticamente inerte, baixo coeficiente de atrito e baixo índice de aderência, que serão melhor discutidos na seção 2.2.1.1.

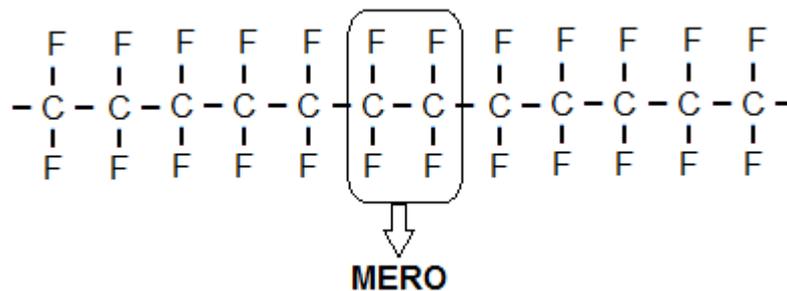
## **2.2 Polímeros**

Muitos dos polímeros são compostos orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos, cuja estrutura molecular consiste em repetições de unidades químicas simples, conhecidos como meros. Sua composição química é baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não metálicos. É importante ressaltar que possuem estruturas moleculares muito grandes, por serem formados por moléculas mais pequenas, as quais estão ligadas em blocos, e com isso estes materiais possuem baixa densidade e podem ser extremamente flexíveis em sua utilização. De fato os polímeros são um dos materiais mais utilizados no nosso dia a dia, isso fica evidenciado pelo fato de em muitas aplicações serem utilizados, e também por terem substituído peças de madeira, metálicas e outras, onde os plásticos mostram propriedades melhores, visto suas aplicações e custo benefício.

A seguir é apresentado em detalhe o PTFE, com suas características e demais informações.

### 2.2.1 PTFE

O PTFE (politetrafluoretileno) pertence à família dos polímeros conhecidos como fluorcarbonetos e é mundialmente conhecido como Teflon. Foi descoberto de maneira acidental por Roy J. Plunkett (1910-1994) para a empresa DuPont no ano de 1938, a qual é proprietária da patente, tendo sua apresentação para fins comerciais sendo feita no ano de 1946. Apresenta cadeias lineares de átomos de carbono ligados a átomos de flúor (CALLISTER, 2007) sendo assim um fluoropolímero e um fluorocarbono. Uma das principais virtudes deste material é que ele é uma substância praticamente inerte, não reagindo com outras substâncias, exceto em situações remotas, fato este que se deve praticamente devido a proteção dos átomos de flúor sobre a cadeia de carbonos. Outra característica é seu baixo coeficiente de atrito e também seu baixo índice de aderência. As estruturas do seu mero e de sua cadeia são mostradas na Figura 2-3.



**Figura 2-3 – Estrutura química do mero e da cadeia do PTFE**

**Fonte: Própria**

O PTFE pode ser aplicado como lubrificante sólido que se impregna por laminação ao ser friccionado formando um filme antiaderente e quimicamente inerte, com isso apresenta um menor coeficiente de atrito estático e dinâmico, os quais têm mesmos valores, também resiste até a 260°C em trabalho, apresenta quase nula absorção de líquidos, apresenta fácil usinagem, tem alta resistência à corrosão e baixo peso molecular. Mesmo com todas essas boas características, ele apresenta coeficiente de condutibilidade térmica baixo, o que em aplicações tribológicas, resulta em má dissipação de calor tendo como consequência altas taxas de desgaste, situação que limita sua aplicação (KHODDAMZADEH *et al.*,2009). Visto isso, a existência de opções de enchimentos no PTFE, traz a possibilidade de melhora significativa das propriedades, e principalmente a respeito do desempenho

tribológico que poderá dissipar mais calor, e por consequência desgastar menos. (KHODDAMZADEH *et al.*, 2009).

A Tabela 2-1 mostra algumas propriedades mecânicas e térmicas do PTFE.

**Tabela 2-1 - Propriedades Mecânicas e Térmicas do PTFE**

Material	Características Mecânicas			Características Térmicas		
	Densidade absoluta	Módulo de elasticidade	Limite de Resistência à tração	Taxa alongamento na fratura	Calor específico	Condutividade térmica
PTFE	2,14-2,20	0,40-0,55	20,7-34,5	200-400	1050	25
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[GPa]	[MPa]	[%]	[J/kg.K]	[W/m.K]

Fonte: Adaptado de Callister (2007).

### 2.2.1.1 Enchimentos

Muitas pesquisas e estudos são feitos, visando melhorar o desempenho quando se utiliza PTFE no atrito sem lubrificação. Uma alternativa é a adição de enchimentos no material de PTFE, fazendo com que vantagens sejam obtidas devido a essas alterações. Algumas opções de enchimentos disponíveis, comercialmente, estão mostradas na Tabela 2-2, abordando as vantagens, com relação ao material de PTFE puro.

Tabela 2-2 - Enchimentos para PTFE e suas vantagens

Material	Vantagens
Fibra de vidro	Aumenta resistência ao desgaste Aumenta resistência à compressão Aumenta dureza
Bissulfeto de molibdênio (MoS <sub>2</sub> )	Aumenta dureza e rigidez Reduz coeficiente de atrito Melhor desempenho sem lubrificação Aumenta condutibilidade térmica e resistência à fluência
Bronze	Aumenta resistência ao desgaste Baixo coeficiente de atrito
Grafite	Aumenta condutibilidade térmica

Fonte: Adaptado de Polifluor (2012)

No presente estudo foram verificadas as melhoras na utilização de PTFE com enchimento de bronze e grafite. Para isso, tais informações foram comparadas com as informações apresentadas por Vale (2014).

As aplicações desses materiais em geral são em vedações industriais, mancais com trabalho a seco, devido suas características favoráveis (VEIGA, 2003).

### 2.3 Aço Inoxidável AISI 304

O aço inoxidável foi utilizado como contra corpo, que se mostra o material com maior dureza em relação ao PTFE. A Tabela 2-3 mostra as propriedades mecânicas e térmicas à temperatura ambiente do aço inoxidável AISI 304.

Tabela 2-3 - Propriedades mecânicas e térmicas do aço inoxidável AISI 304

Material	Características Mecânicas				Características Térmicas	
	Densidade absoluta	Módulo de elasticidade	Limite de resistência à tração	Alongamento na fratura	Calor específico	Condutividade térmica
Aço Inoxidável AISI 304	8	193	540	56	500	16,2
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[GPa]	[MPa]	[%]	[J/kg.K]	[W/m.K]

Fonte: Adaptado de Callister (2007)

## 2.4 Atrito cinético em polímeros

Sempre que existir um movimento, ou tendência de movimento, de uma superfície em relação à outra, haverá uma força contrária, essa força chama-se atrito. Em alguns casos, o atrito é necessário e útil, como exemplo nos sistemas de freios e em outros extremamente indesejados, pois dificulta o movimento e consome energia motriz, sem produzir trabalho (MOURA,1987). Mesmo que a superfície seja considerada polida, ela apresenta imperfeições, ainda que em escala microscópica. O contato se dá, deste modo, nos picos de duas superfícies, assim a área real de contato é uma pequena fração da área aparente. Verifica-se nas Figura 2-4 e Figura 2-5, que aumenta-se a área real de contato quando se aumenta a força normal praticada, fazendo com que os picos se deformem.

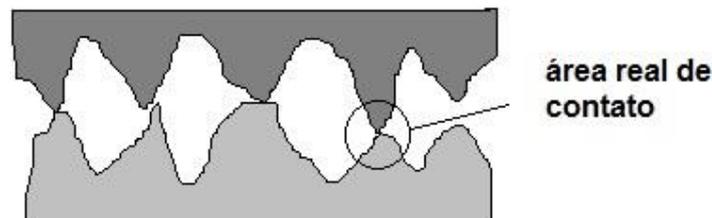


Figura 2-4 - Representação da área real de contato

Fonte: Krim (1996)

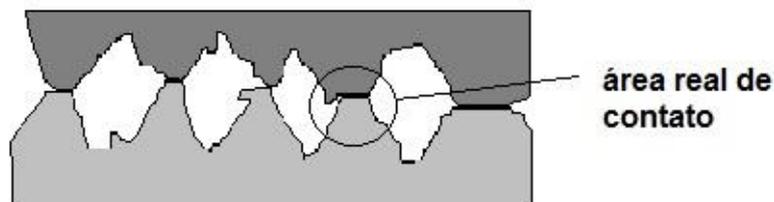


Figura 2-5 - Representação da real área de contato com aumento da força normal

Fonte: Krim (1996)

Assim, a partir dos modos que se relacionam tais superfícies, obtêm-se os mecanismos de atrito por: deformação e adesão (MOURA, 1987).

O contato entre polímeros ou polímeros e metais, são predominantemente elásticos, exceto quando temos elevada rugosidade. Lembra-se, que com isso o atrito de polímeros é fundamentalmente diferente que os dos metais, pois os polímeros têm baixo coeficiente de atrito, com valores normalmente entre 0,1 e 0,5. Outro fator que determina o comportamento tribológico dos polímeros, é sua característica visco-elástica (HUTCHINGS, 1992), assim, suas propriedades mecânicas são dependentes da temperatura, da taxa de deformação e do tempo (NORTON, 2003). A Figura 2-6 mostra o detalhamento na zona de cisalhamento, que ocorre no contato entre os materiais.



**Figura 2-6 - Superfícies em contato**  
**Fonte: Adaptado Hutchings (1992)**

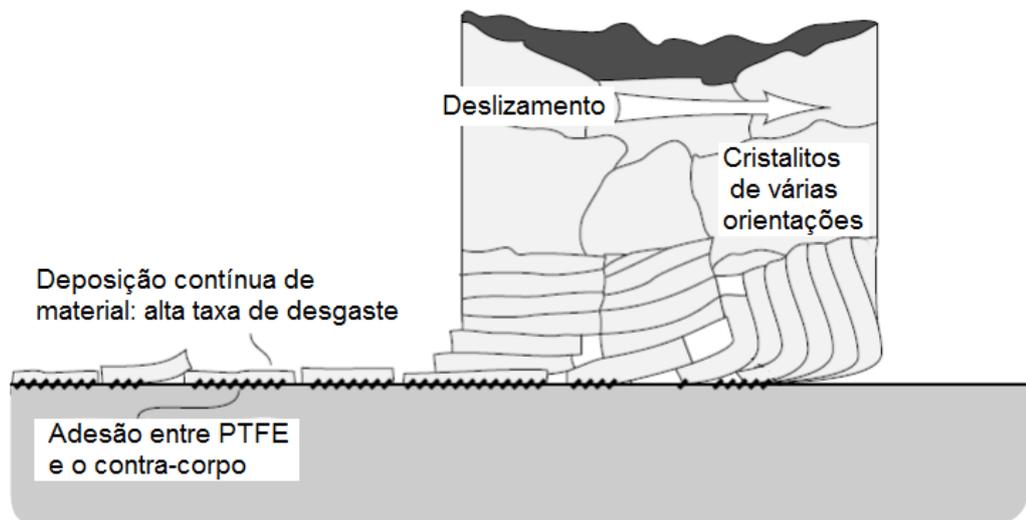
As seções seguintes irão detalhar os mecanismos de atrito citados acima.

#### **2.4.1 Atrito devido à adesão**

Adesão é uma parcela do atrito, onde a força de atrito origina-se pela força de adesão devido as forças moleculares das superfícies em contato, e há perda de massa devido a interação entre as partículas (MOURA, 1987). Além disso, a força está diretamente ligada a quebra das ligações dos átomos por meio do cisalhamento

e as falhas das ligações têm maior possibilidade de ocorrer dentro do polímero e não na superfície em contato.

Alguns polímeros em contato com superfícies relativamente duras e tendo ligações interfaciais do contra corpo maior que a do próprio polímero, irá ocorrer a formação de filme transferido, que tem significância no atrito e desgaste dos polímeros. A partir do momento que o filme é transferido, o contato subsequente será entre polímero e filme de material de mesma origem, transferido para o contra corpo, assim fazendo com que o polímero continue se desgastando, somente se a ligação interfacial entre polímero e contra corpo for maior que a ligação interna do polímero (HUTCHINGS, 1992). Pode-se observar na Figura 2-7 a transferência de filme do polímero para o contra corpo.



**Figura 2-7 - Desgaste e mecanismo de transferência de filme de PTFE**

Fonte: Stachoviak; Batchelor (2001)

#### 2.4.2 Atrito devido á deformação

Todos os tipos de superfícies sólidas, desde as mais polidas até as mais ásperas, possuem irregularidades, que formam picos e vales. Atrito por deformação ocorre quando picos das duas superfícies entram em contato, provocando assim deformações ou até mesmo a ruptura dessas irregularidades.

Tal deformação acontece de dois modos, o primeiro é quando uma superfície tem uma dureza maior que a da outra superfície, assim os picos da superfície de

maior dureza agirão como uma ferramenta de corte, o segundo é quando ambas apresentam durezas semelhantes, acarretando na deformação de ambos os picos (MOURA,1987). Esta parcela do atrito está fortemente ligada a temperatura no contato entre as duas superfícies, visto que a força de atrito está relacionada de maneira direta com a área real de contato e com a tensão de cisalhamento, fatores estes que dependem da temperatura. A diminuição do módulo de elasticidade acontece com o aumento da temperatura e, conseqüentemente a isso, a área de contato real cresce. Na Figura 2-8 mostra-se que na região mais branca do contato o material experimenta deformações.

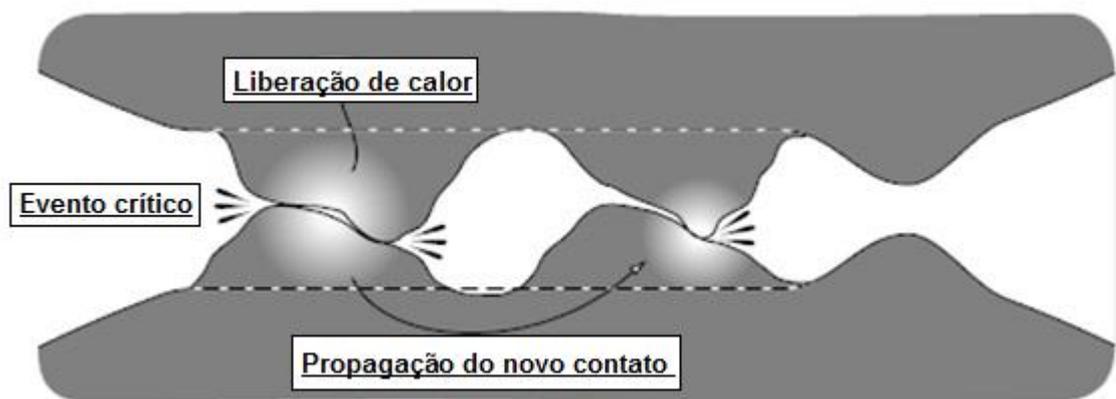


Figura 2-8 - Irregularidades de materiais sólidos, evidenciando vales e picos  
Fonte: Stachoviak; Batchelor (2001).

## 2.5 Desgaste

Desgaste é o dano de uma superfície sólida, quando ocorre perda progressiva de material devido à interação com outro corpo. Quando dois materiais estão em contato, as pontas das asperezas e a real área em contato determina a deformação do material nas áreas em que existe a aplicação dos carregamentos, área a qual é pequena. Visto o desgaste do âmbito fenomenológico, divide-se em: por adesão, abrasão, fadiga (NUNES, 2008).

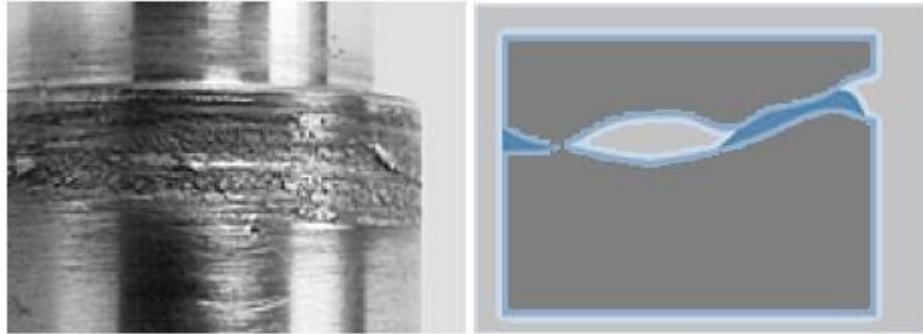
Seguindo esse estudo, Archard propôs um modelo para quantificar o desgaste sofrido no deslizamento sobre mancal, que será discutido na seção 2.5.4.

### 2.5.1 Desgaste por adesão

O desgaste adesivo consiste no processo em que é transferido material de uma superfície para outra durante o movimento relativo entre elas (NUNES, 2008). Para que isso ocorra, é necessária uma pressão normal, suficiente para fazer com que haja a aproximação das superfícies e as forças de atração atômica se manifestem, formando junções entre as superfícies (DETTOGNI, 2010). Sólidos têm a tendência de se unir, pois a adesão ocorre nos contatos das asperezas, ocasionando a deformação plástica, e assim as partículas transferem-se ou fraturam (KENNETH, 1988). Para que haja a remoção de material é necessário a falha nas junções do material polimérico. Então, o desgaste do PTFE se dá através das camadas que serão transferidas para o contra corpo que age como superfície mais dura (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001).

Dentre os fatores que aumentam o desgaste por adesão, destacam-se coeficiente de deslizamento entre os materiais, dureza e relações das áreas de contato (DETTOGNI, 2010).

O desgaste é resultado da remoção de material por causa da adesão, devido às forças de Van Der Waals do material do polímero com a superfície do contra corpo. Pelo fato da junção do material polímero com o material do contra corpo serem mais forte que a do interior do polímero, temos a falha com depósito de fragmento transferido. No decorrer do deslizamento, acontece aumento da camada transferida e assim ela desprende, fato esse conhecido como transferência normal, onde não há a degradação química do polímero que foi transferido para o contra corpo, e com isso a taxa de desgaste é regradada pela taxa de remoção do filme transferido. Além disso, os polímeros se mostram relutantes para transferências extras, pois ao aderir no metal mostra-se contrário a transferência de filme transferido adicional, fazendo com que a taxa de desgaste seja baixa (HUTCHINGS, 1992). A Figura 2-9 mostra a evidencia da adesão de material.

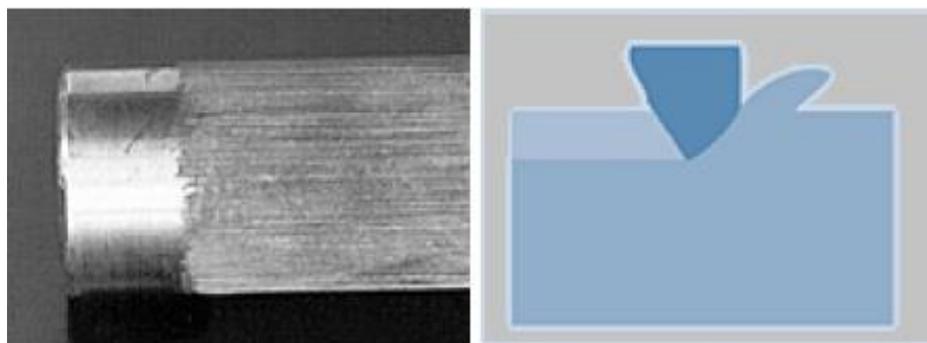


(a) (b)

**Figura 2-9 - Desgaste por adesão (a) Real (b) Esquemático**  
**Fonte: Fernandez (2006)**

### 2.5.2 Desgaste por abrasão

O desgaste abrasivo é quando partículas não metálicas deslizam sobre partículas metálicas, onde a retirada de material é através de deslocamento ou amassamento. Tal mecanismo de desgaste pode ser a dois e a três corpos, a dois corpos quando não tem partículas na interface e a três corpos quando tem partículas na interface, dando origem ao “terceiro corpo”. Então, fatores que influenciam nesse desgaste, são tamanhos das partículas, forma das partículas, dureza das partículas, acabamento do material, ângulo de incidência da partícula no material do mancal. Além disso, o tamanho do grão do metal é importante, pois quanto menor for seu tamanho, maior será o índice de desgaste (DETTOGNI, 2010). A Figura 2-10 mostra a representação desse desgaste, assim como uma foto real.



(a) (b)

**Figura 2-10 - Desgaste por abrasão (a) real (b) representativo**  
**Fonte: Fernandez (2006)**

### 2.5.3 Desgaste por fadiga de contato

O desgaste por fadiga de contato, acontece devido à concentração de tensões maiores que o material pode suportar, pelo fato de trincas associadas com a deformação elástica. Tudo está relacionado com relação aos ciclos de contato entre os materiais (HUTCHINGS, 1992).

A taxa de desgaste por esse mecanismo, também relaciona-se com a rugosidade, pois com uma pequena variação na rugosidade, tem-se uma variação grande na taxa de desgaste (HUTCHINGS, 1992). A Figura 2-11 mostra uma representação desse mecanismo de desgaste.

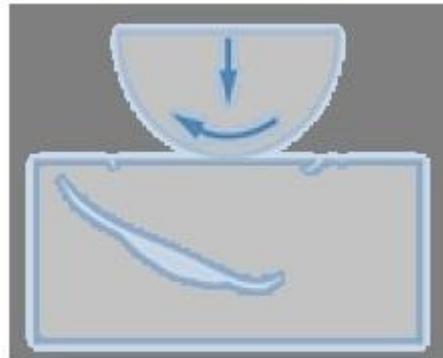


Figura 2-11 - Representação do desgaste por fadiga de contato  
Fonte: Fernandez (2006)

### 2.5.4 Modelo de Archard para quantificar o desgaste

Princípios desenvolvidos por Archard em 1953, diziam que dois corpos em contato têm interação de suas asperezas, sendo que a área de contato real é proporcional ao carregamento, e assim somam-se as infinitesimais áreas (ARCHARD,1953). Mostra-se na Figura 2-12, que ao ocorrer o contato entre duas superfícies, surge a possibilidade de haver remoção de material e desgaste.

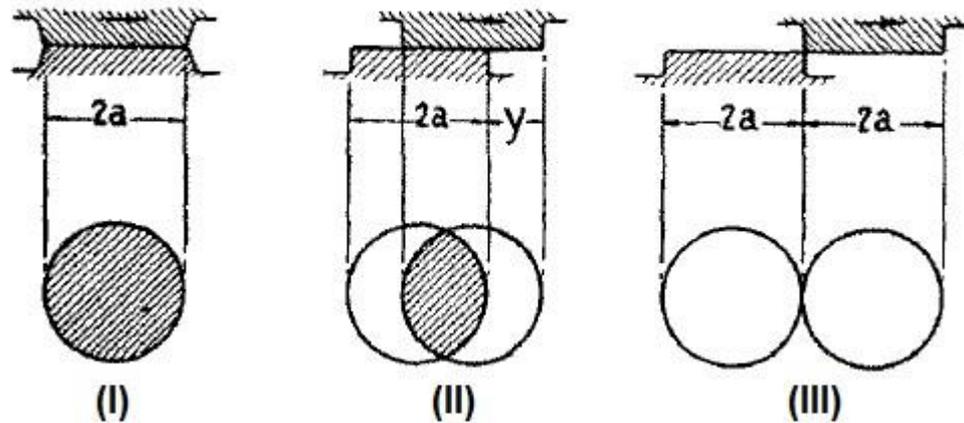


Figura 2-12 - Desenvolvimento do contato entre duas asperezas (I) Total contato (II) Contato em parte (III) Contato finalizado

Fonte: Adaptado de Archard (1953)

O equacionamento do modelo está mostrado na equação (1), e pode-se concluir que o desgaste é proporcional ao carregamento, inversamente proporcional com o valor de dureza do material mais mole e também independente da área de contato [m<sup>2</sup>] (ARCHARD,1953).

$$Q = K \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

Sendo:

Q=volume desgastado por distância em que o deslizamento ocorre[m<sup>3</sup>/m]

H=dureza da superfície mais mole [Pa]

K=coeficiente de desgaste adimensional

F<sub>N</sub>=carregamento normal [N]

Com essa equação, vê-se que quanto maior for a força normal maior será o volume desgastado, o que está de acordo com o que se espera, ou seja, mais esforço mais desgaste.

## 2.6 Condições relevantes no contato

Velocidade de deslizamento e pressão de contato são de extrema importância para que o comportamento tribológico entre superfícies seja analisado. Como consequência desses parâmetros, foi estipulado um terceiro parâmetro para medir a

severidade do processo, que é a junção de velocidade de deslizamento e pressão de contato, chamado condição PV, que será detalhado na seção 2.6.3.

### 2.6.1 Velocidade de deslizamento

A velocidade de deslizamento, se aumentada, acarretará num aumento da temperatura de contato, que tem por consequência o aumento do coeficiente de atrito, isto tudo para a mesma magnitude de força normal aplicada, causando alterações significativas nos materiais (YAMAGUCHI, 1990). Para evidenciar tal fato, tem-se a Figura 2-13 em relação ao PTFE e Poliéster.

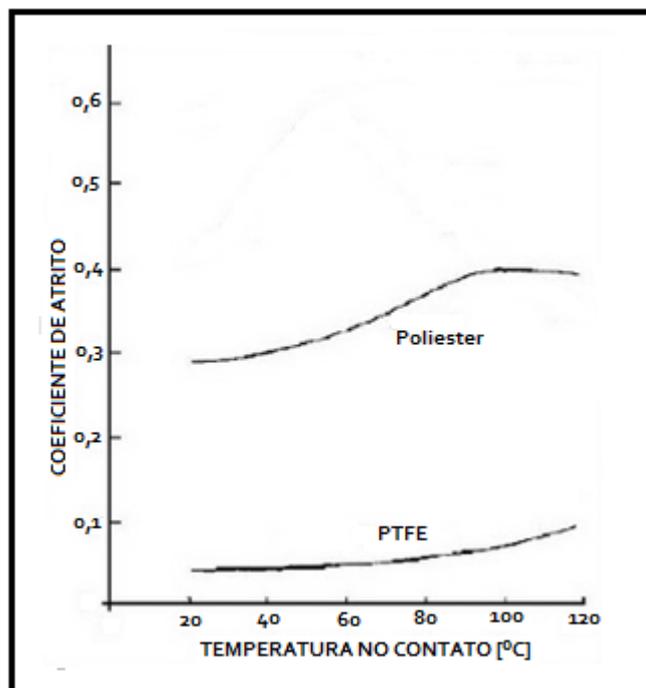


Figura 2-13 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da temperatura no contato para PTFE e Poliéster

Fonte: INES, UCS e Simecs (2009).

Fatores que determinam os valores de atrito cinético com respeito à velocidade de deslizamento vão de lubrificação, filme transferido, rugosidade até o nível de pureza dos materiais em contato (LIU; SCHAEFER, 2006).

### 2.6.2 Pressão de contato

Evidenciou-se que a força normal é determinante no desgaste do material, agindo como um requisito para a seleção correta do mesmo. De maneira geral, vemos que o valor da força normal aplicada ao polímero é de magnitude muito menor se comparada a outro material para que tenham o mesmo coeficiente de desgaste. A Figura 2-14 - Análise qualitativa de desgaste em função da pressão de contato para diferentes materiais representa análise de desgaste em função da pressão de contato para diferentes materiais.

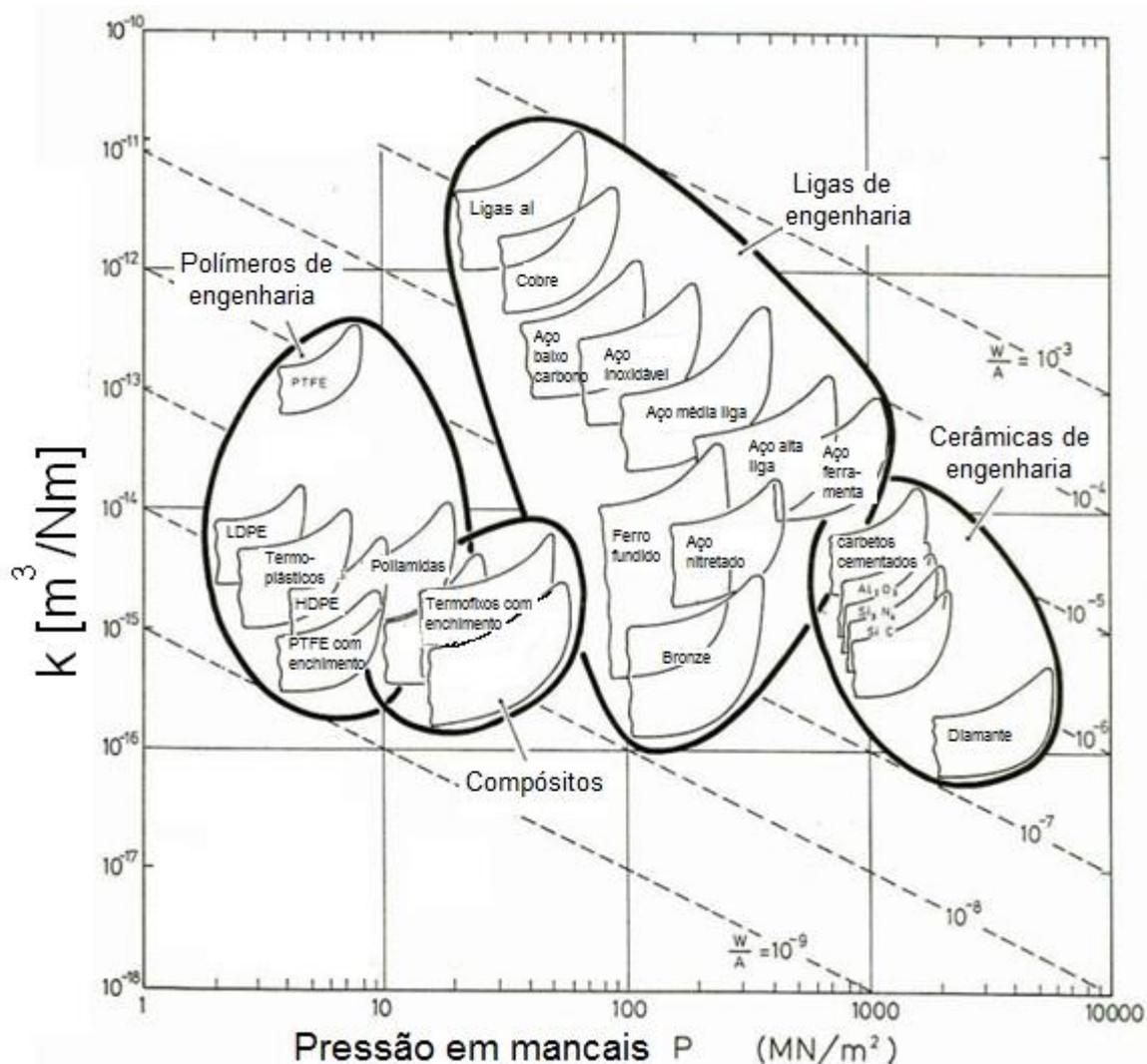


Figura 2-14 - Análise qualitativa de desgaste em função da pressão de contato para diferentes materiais

Fonte: Adaptado de ASHBY (1992)

A equação (2) mostra a relação da força de atrito com a tensão cisalhante, vê-se que a força de atrito é proporcional a tensão cisalhante nas junções, afetando assim no desgaste.

$$F_{at} = \tau_c \cdot A_r \quad (2)$$

$F_{at}$ =Força de atrito [N]

$\tau_c$ =Tensão cisalhante [MPa]

$A_r$ = Área que resiste o atrito [m<sup>2</sup>]

Diz-se que devido a deformação elástica ser elevada, o contato pode ser tratado como o de uma aspereza, sendo que o coeficiente de atrito segue a relação mostrada na Equação (3) (HUTCHINGS, 1992).

$$\mu \propto F^{-\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (3)$$

$\mu$ = Coeficiente de atrito do par tribológico [-]

$F$ = Força [N]

### 2.6.3 Condição PV

Uma relação para analisar melhor a severidade de uma aplicação tribológica é a condição PV, esta envolve o produto da pressão de contato e da velocidade de deslizamento [Mpa.m.s<sup>-1</sup>], assim este parâmetro facilita na compreensão das condições no contato.

Com esse parâmetro, determina-se um ponto limite, para que as propriedades do material não sofram danos que possam atrapalhar no desempenho do seu uso, pois os materiais poliméricos têm baixo ponto de fusão, o que acarretaria sua inutilização devido a altos valores dos itens 2.5.1 e 2.5.2 (YAMAGUCHI, 1990).

Segundo Yamaguchi (1990), o ensaio deve ser feito para cada condição PV com um tempo razoável, implicando assim em um aumento da temperatura até uma estabilização, sendo que a temperatura seja função da condição PV aplicada ao

sistema tribológico. Assim os aspectos obtidos no presente trabalho, para as curvas de temperatura, foram semelhantes ao encontrado na literatura, vide Figura 2-15.

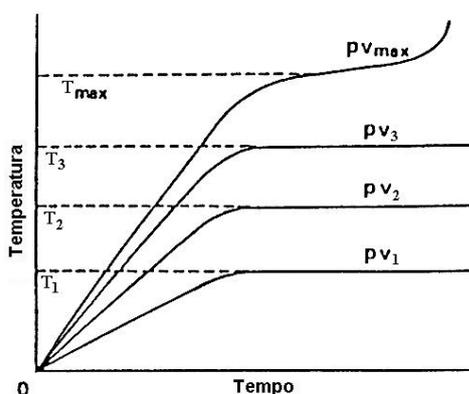


Figura 2-15 - Curvas de temperatura no contato em função do tempo, para diferentes condições PV

Fonte: Adaptado Yamaguchi (1990)

Na Figura 2-16 vê-se a relação do coeficiente de atrito com a condição PV, que são diretamente proporcionais, e assim pode-se quantificar a severidade do processo.

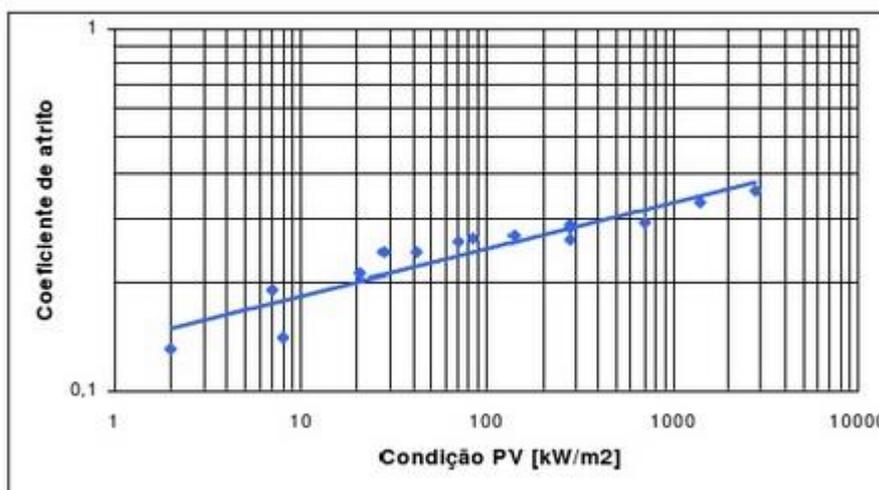


Figura 2-16 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da condição PV para PEAD - Polietileno de alta Densidade

Fonte: INES, UCS e Simecs (2009)

A condição PV está relacionada com os valores de velocidade e pressão que foram monitorados, e posteriormente analisou-se seguindo a equação (4), que está relacionada com a taxa de desgaste mássico e na equação (5), que está relacionada

com a energia dissipada em forma de calor devido ao atrito do contato (BHUSHAN, 2002).

$$\dot{m} = \alpha APV_{m\u00e9dia} \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \mu APV_{m\u00e9dia} \quad (5)$$

Onde:

P= Press\u00e3o de contato (relacionada com a for\u00e7a normal);

V= Velocidade de deslocamento [m/s];

$\alpha$ = Fator de desgaste [g/Nm];

$\dot{m}$ = Taxa de desgaste m\u00e1ssico [g/h];

$\dot{Q}$ = Energia dissipada em forma de calor [J/s];

$\mu$ = Coeficiente de atrito do par tribol\u00f3gico [-];

A= \u00c1rea [m<sup>2</sup>]

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhados os materiais utilizados no presente trabalho, sendo eles o aço inoxidável AISI 304, PTFE com enchimentos de bronze e de grafite, assim como os métodos utilizados para devido estudo e análise. Nas próximas seções foram apresentados o planejamento dos ensaios, detalhes do aparato que foi utilizado, bem como os métodos utilizados para a avaliação do desgaste, atrito cinético e temperatura no contato.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para os corpos foram o PTFE com 40% de enchimento de Bbronze e o PTFE com 20% de enchimento de grafite, já os contra corpos foram de aço inoxidável AISI 304. As matérias primas dos corpos foram adquiridas em barras de seção circular extrudadas, com Ø30mm por 300mm de comprimento. As barras de aço inoxidável foram fornecidas com tratamento térmico de solubilização pela empresa Aceinox, com dimensões de Ø25,4mm por 2m de comprimento. Os certificados de matérias-primas encontram-se no Anexo A e Anexo B.

Os corpos e contra corpos de prova foram usinados e suas dimensões são mostradas, respectivamente, na Figura 3-1 e na Figura 3-2. O ajuste proposto para o diâmetro, no qual há o acoplamento do par tribológico, é do tipo com folga diametral, a qual pode variar entre 0,1 a 0,17mm. Esse ajuste é do tipo rotativo, que é pertinente devido ao fato da bucha permanecer estacionária enquanto o eixo gira.

A concepção dos corpos de prova segue o modelo apresentado por Vale (2014), que realizou ensaios do mesmo tipo com PTFE puro contra aço inoxidável AISI 304 sem lubrificação.

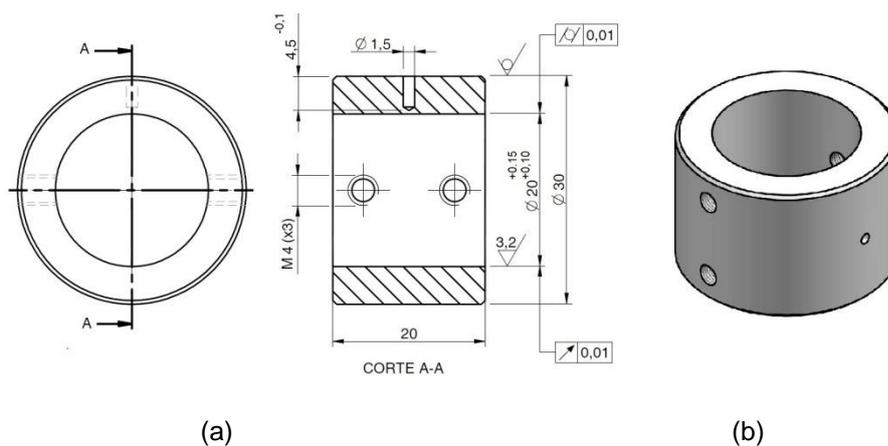


Figura 3-1 - Dimensões do corpo de PTFE com enchimento de bronze e grafite (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva

Fonte: VALE (2014)

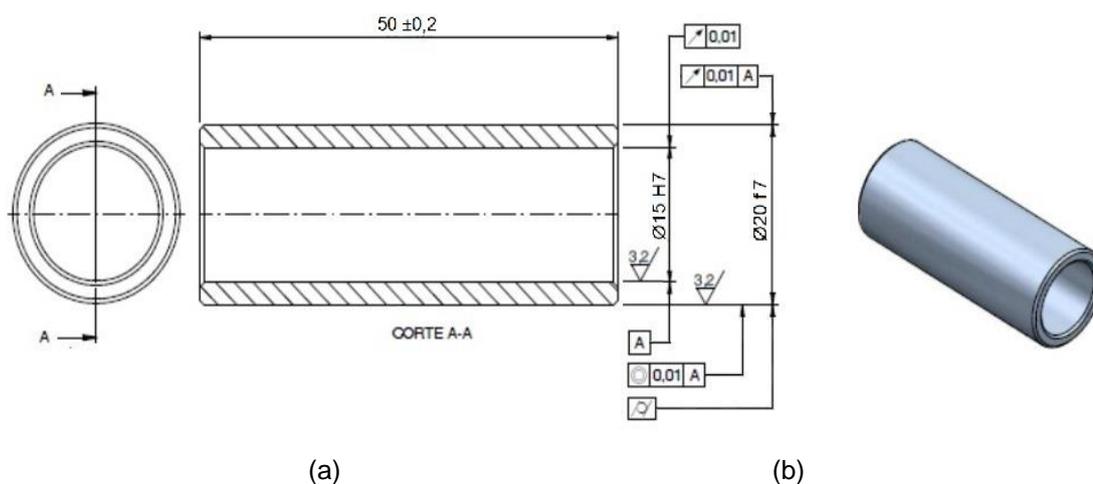


Figura 3-2 - Dimensões do contra-corpo de aço inoxidável AISI 304 (a) Detalhes de fabricação (b) Vista em perspectiva

Fonte: VALE (2014)

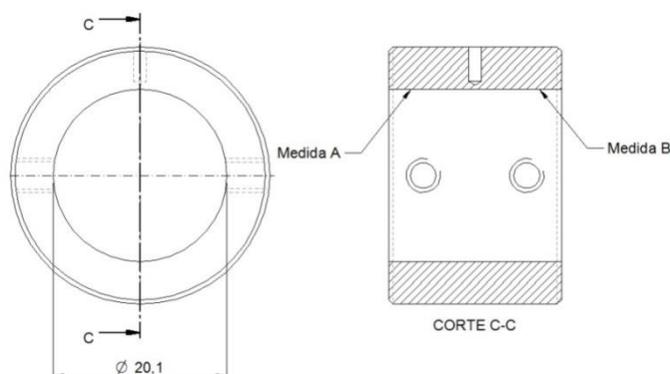
## 3.2 Análise dimensional

Os parâmetros de análise dimensional foram feitos antes dos ensaios de desgaste, nas superfícies de contato, tanto para o corpo quanto para o contra corpo.

### 3.3.1 Análises dimensionais dos corpos

As medições do corpo consistem no esquema mostrado na Figura 3-3. Para que fosse feita a medição foi utilizado um micrômetro interno de 17 a 20 mm, marca

TESA, e precisão de 0,005 mm, em atmosfera não controlada. Assim fez-se as médias e os desvios padrão (para cada nível de carregamento normal ensaiado e que contém cinco corpos), onde são apresentados na Tabela 3-1.



**Figura 3-3 - Esquema de medição do corpo para análise dimensional**

Fonte: VALE, 2014

**Tabela 3-1 - Verificação dimensional dos corpos**

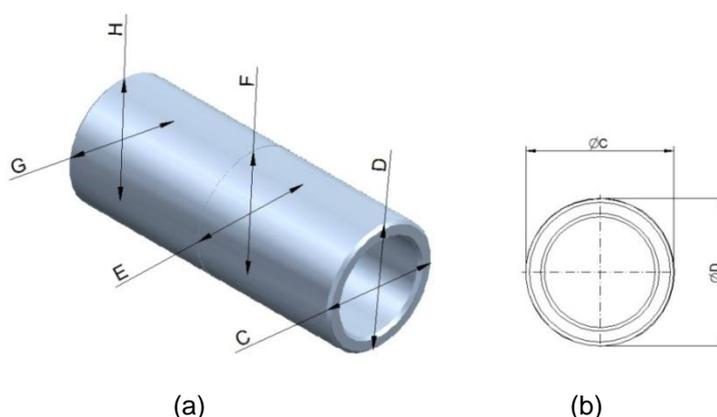
Condição	PTFE + Bronze		PTFE + Grafite	
	Medida "A" [mm]	Medida "B" [mm]	Medida "A" [mm]	Medida "B" [mm]
1	20,12±0,02	20,13±0,02	20,12±0,04	20,11±0,01
2	20,12±0,01	20,13±0,01	20,13±0,02	20,12±0,03
3	20,13±0,03	20,11±0,04	20,12±0,01	20,11±0,02
4	20,12±0,01	20,11±0,01	20,11±0,02	20,13±0,02

Dessa maneira, verifica-se que os valores médios do diâmetro mensurado, estão dentro da tolerância especificada no desenho de fabricação, apresentado na Figura 3.1, que é de  $\text{Ø}20_{+0,10}^{+0,15}$  para todos os corpos. As medidas foram feitas para cada corpo duas vezes, sendo cinco corpos por nível, totalizando quarenta medidas.

### 3.3.2 Análises dimensionais dos contra corpos

A análise das superfícies cilíndricas externas que pertencem aos contra corpos, o qual acopla-se ao eixo, com a interface que entra em contato com os corpos de PTFE com enchimentos, foram também analisados dimensionalmente antes dos ensaios.

Devido aos contra corpos rotacionarem e seu comprimento ser relativamente grande em comparação com os corpos, as medições se deram em mais pontos para uma maior conformidade. Então, para tal medição utilizou-se um micrômetro externo de 0 a 25 mm, marca Vonder, com precisão de 0,01mm e a atmosfera não foi controlada.



**Figura 3-4 - Esquema de medição do contra corpo para análise dimensional (a) vista isométrica do contra corpo (b) vista frontal**

**Fonte: VALE, 2014**

Na Tabela 3-2 mostram-se as médias e desvios padrões dos contra corpos seguindo as medições detalhadas na Figura 3-4. Os valores desenvolvidos no presente trabalho contaram com cinco corpos de cada nível, onde para cada um foram feitas seis medidas. Seguindo a especificação do diâmetro mostrado na Figura 3-2, de  $\varnothing 20f7$ , tem-se que o diâmetro deve ficar entre 19,95 e 19,99mm.

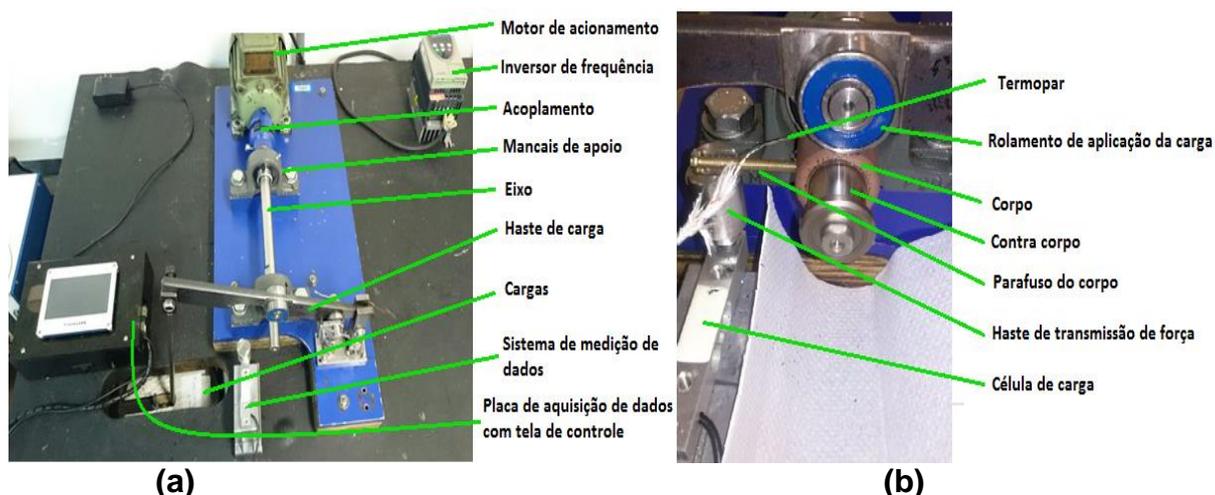
Tabela 3-2 - Principais dimensões dos contra-corpos de aço inoxidável

Condição	Materiais	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida	Medida
		"C"	"D"	"E"	"F"	"G"	"H"
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	PTFE+ Bronze	19,98 ± 0,005	19,98 ± 0,005	19,98 ± 0,001	19,98 ± 0,005	19,98 ±0,004	19,98 ± 0,004
	PTFE + Grafite	19,98 ± 0,005	19,98 ± 0,005	19,98 ± 0,004	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,004	19,99 ± 0,005
2	PTFE+ Bronze	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,000	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,004	19,98 ± 0,004	19,98 ± 0,005
	PTFE + Grafite	19,98 ± 0,004	19,99 ± 0,005	19,99 ± 0,008	19,99 ± 0,010	19,98 ± 0,004	19,98 ± 0,005
3	PTFE+ Bronze	19,99 ± 0,002	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,004	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,010	19,98 ± 0,004
	PTFE + Grafite	19,99 ± 0,006	19,99 ± 0,009	19,98 ± 0,004	19,99 ± 0,006	19,98 ± 0,008	19,99 ± 0,004
4	PTFE +Bronze	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,004	19,98 ± 0,005	19,99 ± 0,003	19,99 ± 0,005	19,98 ± 0,001
	PTFE + Grafite	19,98± 0,008	19,99 ± 0,007	19,99 ± 0,005	19,99 ± 0,007	19,98 ± 0,005	19,98 ± 0,005

Analisando-se os valores da medição, observou-se, que todos os diâmetros estão dentro do especificado, assim obteve-se a garantia que o ajuste entre o corpo e o contra corpo é com folga, a qual apresentou valor aproximado de 0,1mm. Este valor está condizente com a proposta dimensional para o par tribológico.

### 3.3 Aparato

Os ensaios de desgaste foram realizados em uma máquina de atrito cinético (MAC), tipo mancal sobre eixo, desenvolvida no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR, a qual pode ser visualizada na Figura 3-5.



**Figura 3-5 - 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**

Todo o equipamento consiste, em um eixo, apoiado em mancais, que posteriormente é acoplado ao motor elétrico, no qual o controle de rotação é feito através de um inversor de frequência em tensão de 220V. Têm-se o eixo usinado com rebaixo correto, para que nesse rebaixo seja fixado o contra corpo, e em seguida o corpo, que é forçado no contra corpo através da força aplicada ao rolamento ligado a haste de carga por meio do peso morto. Vide Figura 3-6, têm-se o detalhamento do peso morto, para aplicação da força através do tirante que liga a carga a haste.

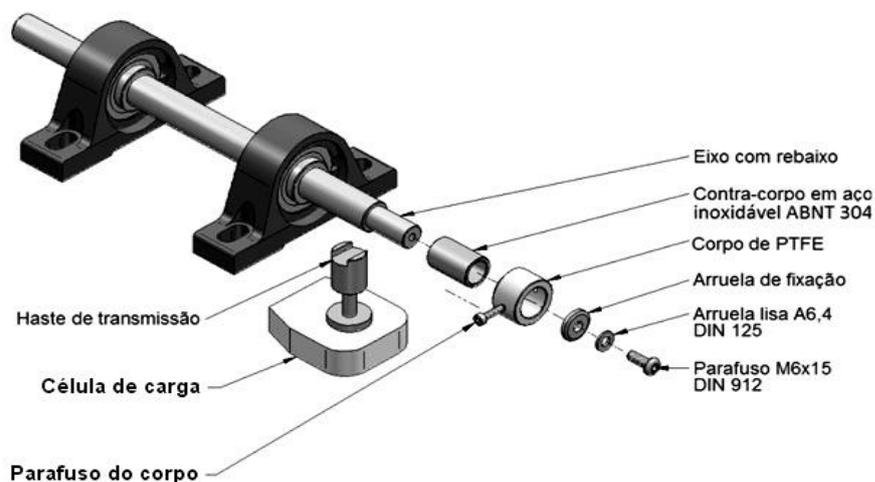


**Figura 3-6 - Detalhe do modo de aplicação de carga através de sistema de peso morto**

A maneira de transmissão da força normal obtida na interface de contato, é feita através do parafuso ligado ao corpo, para que a célula de carga meça este

parâmetro. Assim, esses valores tornam possível a determinação do coeficiente de atrito cinético do par tribológico. Esse dispositivo é capaz de simular condições muito próximas da aplicação real de mancais de deslizamento, segundo Kashani *et al.* (2011).

Dessa maneira, obteve-se a compreensão do atrito e do desgaste no par tribológico composto pelo polímero de PTFE com enchimentos e o aço inoxidável AISI 304. Na Figura 3-7, é mostrado a vista explodida da montagem do contra corpo, corpo e parafuso de fixação ao eixo da MAC.

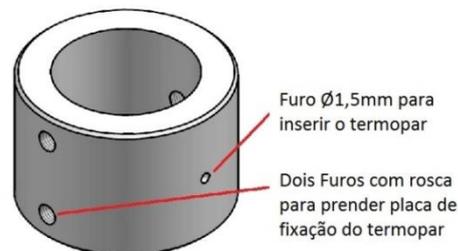


**Figura 3-7 - Vista explodida da montagem do contra corpo, corpo e parafuso de fixação na MAC**

Fonte: VALE (2014)

Durante os ensaios foram coletados, de modo automático, dados de temperatura no contato e da força transmitida à célula de carga. Para a medição da temperatura no contato foram utilizados um termopar e um multímetro conectado a um computador. O termopar usado foi da marca Minipa, modelo MTK-01, do tipo K, junção cromel-alumel. Este apresenta faixa de operação de -40 °C até 204 °C, com incerteza de medição de  $\pm 2,2$  °C (Minipa, 2013). A junta quente do termopar foi inserida, seguindo recomendações de *ASM Handbook* volume 18 (1992), que indica a distância do termopar até o contato de 0,25 a 0,75 mm. Para tanto, foi acrescido ao corpo um furo de  $\varnothing 1,5$  mm por 4,5 mm de profundidade, o qual permite que a junta a quente seja posicionada a 0,5mm do contato, onde é detalhado na Figura

3-8. Na Figura 3-9 mostra-se a montagem do termopar no corpo, com a junta quente inserida no furo. Nos ensaios, após a montagem do termopar, o furo foi preenchido com pasta térmica, para aumentar a condutibilidade térmica. A pasta térmica que foi empregada é um composto a base de prata da marca Microbon modelo TC-G10, que apresenta alto desempenho em condutibilidade de calor com condutividade térmica de 2,40W/mK e temperatura de operação de -50 °C a 220 °C (MICROBON, 2013). O multímetro a ser utilizado foi o modelo ET-2076 da Minipa, com saída RS-232, cujo programa de aquisição de dados é disponibilizado pelo fabricante. A montagem para que fosse feita a medição de temperatura, contém um pequeno erro de leitura, devido à parede de 0,5mm de PTFE com enchimento até a interface, atuando assim como isolante térmico.



**Figura 3-8 - Detalhes do corpo com adaptação do termopar para medição da temperatura no contato: vista em perspectiva com detalhes acrescidos**

Fonte: VALE (2014)



**Figura 3-9 - Detalhes do corpo com adaptação do termopar para medição da temperatura no contato: fotografia da montagem do termopar no corpo**

Fonte: VALE (2014)

O sistema de medição de carga conta com uma célula de carga com extensômetro, que dentre os vários métodos para a medição de deformação, é o mais comum e consiste em um dispositivo cuja resistência elétrica varia de forma proporcional com a medida de deformação obtida no dispositivo, com capacidade para 2 kg e resolução de 0,1g. Esta foi conectada a uma placa de aquisição de dados, a qual, segundo o fabricante Motonco (2013), é baseada na estrutura ARM,

com as seguintes especificações: ARM 6410 533MHz, 256MB de Memória RAM e 2GB *Flash memory*. Os dados foram então gravados em um *pendrive* conectado à saída USB. A taxa de aquisição de dados foi programada para um dado a cada cinco segundos. A interface, com tela *TouchScreen* de 4,3”, utiliza SO Windows CE 6.5, resolução de 480x272 *pixels* e 16 milhões de cores. A lógica de aquisição de dados consiste em coletar 100 valores, filtrar e colocar em um *buffer* de nove posições, onde se apresenta a média destes nove valores na tela. A cada atualização se descarta o valor mais antigo dentro do *buffer* e se faz uma nova leitura. O processo é chamado de média móvel e desta maneira pode-se apresentar um valor mais estável e preciso da leitura. A calibração deste sistema será realizada com massa padrão de  $(200 \pm 0,05)$  g.

A seguir, na seção 3.3.1 é apresentado o modelo do coeficiente de atrito cinético para o aparato.

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

Para obter o coeficiente de atrito cinético, é fundamental realizar uma criteriosa análise dos esforços e da geometria da MAC. A Equação (6), deduzida por Vale (2014), foi utilizada para o cálculo do coeficiente de atrito cinético entre os pares tribológicos ensaiados na MAC. As distâncias  $L_B$ ,  $L_c$ ,  $L_w$ , estão cada uma com origem diferente, em seguida as massas  $m_c$  e  $m_B$  estão medidas em gramas.

$$\mu = f(m_B, m_c) = \frac{\frac{1}{R_2} (L_B m_B)}{\frac{L_c}{L_w} m_c + c_{mh} - m_B} \quad (6)$$

Fonte: Vale (2014)

onde:

$c_{mh}$ : Força atribuída a massa do conjunto da haste de carga medido no ponto de aplicação da carga normal no corpo [g];

$L_B$ : Distância do centro do corpo até a célula de carga [m];

$L_c$ : Distância do centro de giro da haste de carga até o ponto da aplicação das cargas [mm];

$L_w$ : Distância do centro de giro da haste de carga até o ponto de aplicação da carga normal no corpo [mm];

$m_c$ : Massa das cargas acrescidas à MAC [g];

$m_B$ : Força transmitida pelo parafuso do corpo, à haste de transmissão de força e, medida na célula de carga [g].

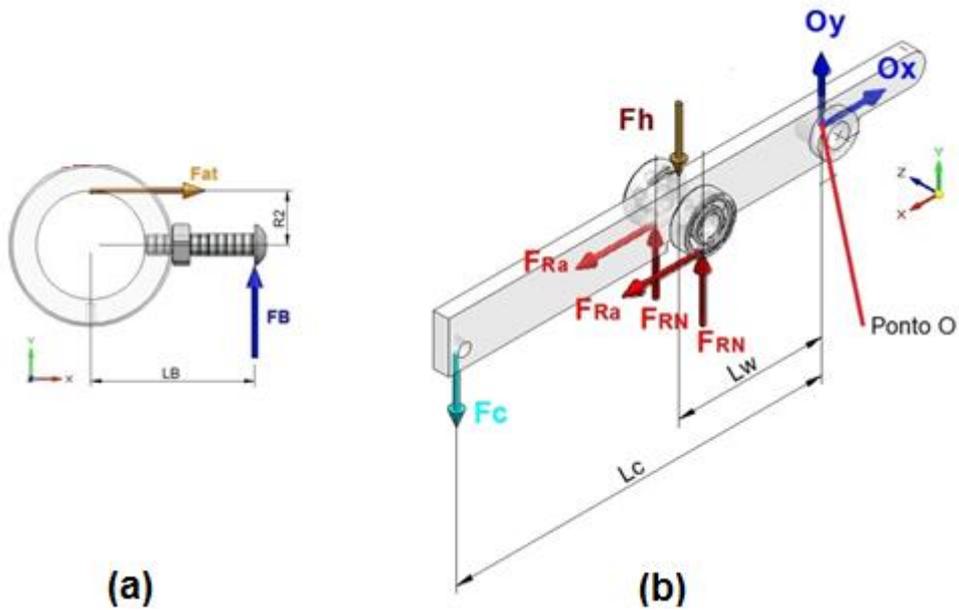


Figura 3-10 - Diagrama de corpo livre (a) corpo (b) haste de carga  
Fonte: Adaptado de Vale (2014)

Ressalta-se que o coeficiente de atrito é somente função dos valores de massa das cargas acrescentadas ao tirante,  $m_c$ , e da força medida na célula de carga,  $m_B$ . Estes valores foram então obtidos no decorrer dos ensaios feitos por Vale (2014).

### 3.4 Planejamento dos ensaios

Visando estender o estudo, o presente trabalho buscou comparar materiais de PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite adotando-se as mesmas condições propostas por Vale (2014) para ensaio com PTFE puro, facilitando a comparação do desempenho tribológico.

Foram realizados ensaios de longa duração, com 120 minutos, sem lubrificação, e em atmosfera não controlada. Os corpos de prova permaneceram 48 horas em dissecador com sílica gel antes de serem ensaiados. A umidade relativa e temperatura ambiente foram monitoradas conforme descrito na seção 3.6. Os ensaios foram realizados em quatro níveis de força normal, utilizada por Vale (2014), cujos valores são evidenciados na Tabela 3-3 e Tabela 3-4. Para cada nível foi determinado, através da Equação (7), a força normal  $F_N$  aplicada ao corpo.

$$F_N = f(m_B, m_c) = g \left[ \frac{L_c}{L_w} m_c + c_{mh} - m_B \right] \quad (7)$$

Fonte: VALE, 2014

Tabela 3-3 - Planejamento dos ensaios em quatro níveis de força normal para o PTFE com enchimento de bronze

<b>PTFE com enchimento de Bronze</b>				
<b>Variáveis</b>	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>	<b>Condição 3</b>	<b>Condição 4</b>
Tempo [min]	120			
$m_c$ [g]	701,23 ± 0,05	1804,40 ± 0,07	3091,94 ± 0,09	4044,56 ± 0,1
$F_N$ [N]	39,4	66,4	97,3	119,5
$P_{max}$ [MPa]	0,89	1,15	1,33	1,58
$P_{média}$ [MPa]	0,69	0,9	1,06	1,17
$PV_{max}$ [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]	0,74	0,74	0,71	0,71
$PV_{médio}$ [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]	0,58	0,58	0,56	0,55
$V$ [m/s]	0,84	0,64	0,53	0,47
$n$ [rpm]	800,4	614,1	508,5	451,2
$d$ [m]	6139	4705	3937	3441

Tabela 3-4 - Planejamento dos ensaios em quatro níveis de força normal para o PTFE com enchimento de grafite

<b>PTFE com enchimento de Grafite</b>				
<b>Variáveis</b>	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>	<b>Condição 3</b>	<b>Condição 4</b>
Tempo [min]	120			
$m_c$ [g]	701,23 ± 0,05	1804,40 ± 0,07	3091,94 ± 0,09	4044,56 ± 0,1
$F_N$ [N]	39,9	66,7	98,2	121,8
$P_{max}$ [MPa]	0,86	1,1	1,24	1,47
$P_{média}$ [MPa]	0,68	0,87	0,97	1,15
$PV_{max}$ [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]	0,72	0,73	0,64	0,69
$PV_{médio}$ [MPa.m.s <sup>-1</sup> ]	0,57	0,57	0,50	0,54
$V$ [m/s]	0,84	0,66	0,52	0,47
$n$ [rpm]	801,5	627,8	495,2	448,8
$d$ [m]	6083	4763	3755	3404

Estabeleceu-se o valor da pressão média no contato  $P_{média}$ , para que fosse possível estabelecer condição  $PV_{média}$ , [MPa.m.s<sup>-1</sup>], que fornece uma melhor noção do quão severo, em média, foi a condição tribológica ensaiada para toda a superfície, assim sendo definida como o produto da pressão média no contato,  $P_{média}$ , e a velocidade de deslizamento,  $V$ . A formulação é apresentada na Equação (8) e Equação (9), respectivamente.

$$P_{média} = f(F_N) = \frac{F_N}{2aL} \quad (8)$$

$$PV_{média} = P_{média} \cdot V \quad (9)$$

Ainda com o intuito de verificar a máxima condição PV imposta no ensaio, foi calculado o parâmetro pressão máxima no contato  $P_{max}$ , seguindo a equação (10), para determinar-se a condição  $PV_{max}$ , [MPa.m.s<sup>-1</sup>], conforme Equação (11). Isso é relevante, pois um valor excessivo, mesmo em uma região reduzida do contato, pode resultar em fusão localizada do material. Diante disso, teve-se o cuidado de manter as condições PV impostas dentro da faixa de utilização do PTFE, conforme apresentado na seção 2.6.3. Para os ensaios manteve-se constante a máxima condição PV, a qual foi estabelecida arbitrariamente, como 0,62 MPa.m.s<sup>-1</sup>.

$$P_{max} = f(F_N) = \sqrt{\frac{2F_N B}{\pi L(k_1 + k_2)}} \quad (10)$$

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

Teve-se a atenção de especificar o intervalo de tempo de aquisição dos dados, de modo a não ficar múltiplo dos valores determinados para a rotação do eixo da MAC, pois isso poderia dar periodicidade ao ensaio, o qual poderia sofrer influência de circularidade ou batimento do corpo e contra corpo. Para se determinar a rotação do eixo da MAC,  $n_o$  [rpm], aplicou-se a Equação (12).

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

### 3.5 Avaliação dos ensaios de desgaste

A avaliação dos ensaios de desgaste foi feita através da determinação do coeficiente de desgaste adimensional de Archard, conforme apresentado na seção 2.5.4. A taxa de desgaste mássico média, do corpo e do contra corpo, foram obtidos pela razão entre a perda de massa dos corpos de prova durante o ensaio e o tempo de duração do ensaio. A relação é apresentada na Equação (13).

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{t} \quad (13)$$

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 de massa foi obtida através de pesagem dos corpos de prova, antes e após cada ensaio, em balança eletrônica de precisão, modelo JH 2102, do fabricante Bioprecisa, cuja faixa de operação é de 0 a 2200 g e apresenta precisão de 0,01 g. O tempo foi controlado pelo sistema de aquisição de dados de temperatura que estava conectado ao computador.

### 3.6 Atmosfera do laboratório

A atmosfera do laboratório não foi controlada, mas os valores de temperatura e umidade relativa foram monitorados, utilizando os instrumentos que consistem, em um termômetro e um higrômetro analógicos, ambos da marca Fischer. A faixa de leitura do termômetro é de -35°C a 55°C, com precisão de 1°C. O higrômetro tem faixa de 0 a 100%, com precisão de 1%.

### 3.7 Análises das superfícies das amostras

Foram feitas análises das imagens da superfície das amostras obtidas, através da utilização de microscópio eletrônico de varredura, MEV, onde foram realizadas na UTFPR com equipamento marca Zeiss, modelo EVO-MA15.

Para as devidas análises, os corpos poliméricos foram cortados para permitir o acesso às superfícies do contato. Desta maneira, foram preparados quatro corpos, sendo dois de PTFE com enchimento de bronze e dois de PTFE com enchimento de

grafite nas condições um e quatro dos ensaios. Para as análises dos corpos na condição inicial, ou seja, sem ser submetido ao ensaio de desgaste, foram utilizados os mesmos corpos, porém as imagens foram obtidas em regiões que não houve contato entre o corpo e o contra corpo.

Os materiais poliméricos são maus condutores de eletricidade, com isso foi necessário fazer o recobrimento com aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  de espessura de ouro. Os corpos foram fixados utilizando fita adesiva de ouro, em dois suportes de alumínio, cada um com dois corpos. Este procedimento permite melhorar a condução dos elétrons que são projetados pelo MEV, e também, de aumentar a dissipação de calor das amostras, que tendem a aquecer durante o procedimento. O recobrimento, com tempo de deposição de 30s, foi realizado em equipamento modelo Q150R ES, marca Quorum.

Na Figura 3-11, pode-se observar os corpos sendo preparados para as análises no MEV.



**Figura 3-11 - Preparação dos corpos para análises no MEV**

### **3.8 Análises topográficas**

Foi feita análise topográfica, utilizando interferômetro de luz branca para medição 3D sem contato, modelo CCI Talysurf Lite, fabricado pela Taylor Hobson. O interferômetro utiliza, para cada área de amostragem, 1024x1024 pontos medidos e resolução óptica entre 0,4 e 0,6  $\mu\text{m}$  (TAYLOR HOBSON, 2013). O equipamento está disponível na UTFPR. As análises de topografia foram realizadas em um par tribológico de cada nível de força normal ensaiada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados obtidos pelos ensaios realizados com dois compostos de PTFE, um com enchimento de bronze e outro com enchimento de grafite, são discutidos em relação ao desempenho tribológico, com auxílio de análises por interferometria de luz branca 3D, microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura, e logo após comparados com os ensaios realizados por Vale (2014), o qual realizou ensaios com PTFE puro. Os dados foram obtidos pelas análises do tipo mancal sobre eixo, seguindo o planejamento já mostrado na seção 3.4.

### 4.1 Atmosfera do laboratório

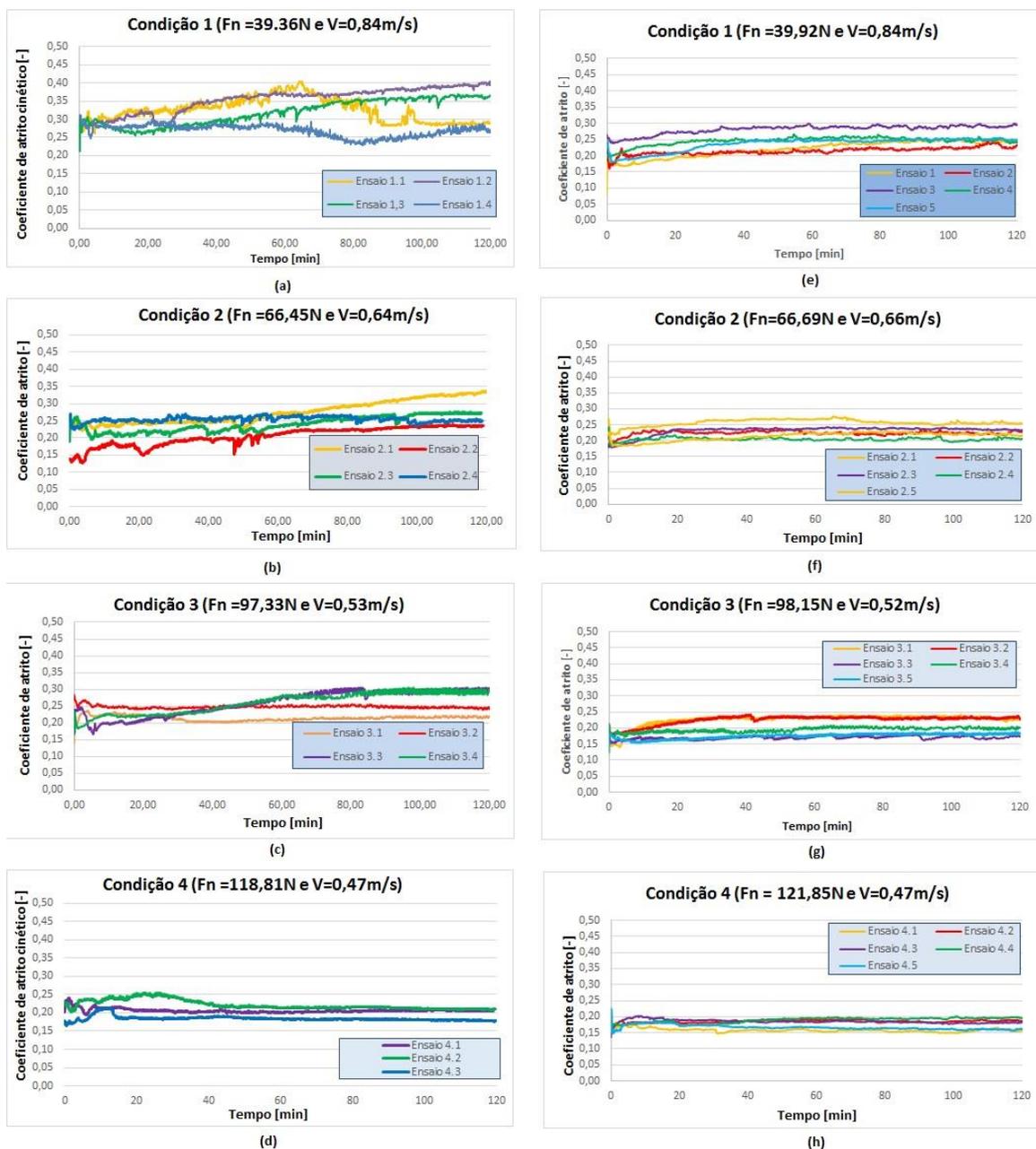
A atmosfera do laboratório foi monitorada, mas não controlada, e os valores médios das temperaturas e umidade relativa para cada condição são mostrados na Tabela 4-1. Contudo, com os valores de temperaturas e umidade relativa do ambiente, estimasse que não houve influência sobre as condições ensaiadas.

Tabela 4-1 - Valores de temperatura e umidade relativa do laboratório

Condição	Temperatura [°C]		Umidade relativa [%]	
	PTFE COM BRONZE	PTFE COM GRAFITE	PTFE COM BRONZE	PTFE COM GRAFITE
1	20,8 ± 0,4	22,0 ± 1,4	80 ± 1	69 ± 2
2	21,6 ± 0,8	21,0 ± 1,4	68 ± 11	74 ± 5
3	24,4 ± 0,5	22,4 ± 0,8	77 ± 2	58 ± 12
4	24,0 ± 0,7	23,6 ± 1,5	76 ± 1	67 ± 8

### 4.2 Coeficiente de atrito cinético

A seguir são apresentados os dados de coeficiente de atrito cinético em função do tempo, obtidos através de ensaios de desgaste, como descrito na seção 3.5, para o PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, ambos com a condição PV constante. Na Figura 4-1 pode-se observar os dados do coeficiente de atrito cinético obtidos.



**Figura 4-1 - Dados do coeficiente de atrito cinético em função do tempo  
PTFE + bronze - (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4  
PTFE + grafite - (e) Condição 1 (f) Condição 2 (g) Condição 3 (h) Condição 4**

Na verificação dos valores das médias dos coeficientes de atrito cinético, fez-se a análise nos últimos 20 minutos, onde houve tendência de estabilização dos valores do coeficiente de atrito cinético, para ambos os materiais e estão expostos nas Tabela 4-2 e Tabela 4-3.

Assim, reconhecendo que as transições dependentes do tempo podem acarretar mudanças em outras, quando coloca-se duas superfícies em contato sob uma carga normal e movimentando uma em relação a outra, pode-se alcançar um estado de equilíbrio temporariamente, desde que não haja parada ou intervenções externas ao movimento (BLAU, 2009). Esse estado de equilíbrio é atingido quando no sistema tribológico em questão o coeficiente médio de atrito cinético, a taxa de desgaste, e outros parâmetros especificados tenham atingido e mantido um nível relativamente constante, sem esquecer de parâmetros como temperatura, concentração de partículas de detritos de um lubrificante, e a rugosidade da superfície. Assim, procura-se impor um conjunto de condições no sistema tribológico para reduzir o tempo necessário para alcançar o estado de equilíbrio (BLAU, 2009). Com isso, inúmeras situações de engenharia existem e ocorrem quando alcança-se a estabilização no presente estudo, afirmado graficamente.

**Tabela 4-2 - Valores médios do coeficiente de atrito cinético, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio do PTFE com enchimento de bronze**

<b>PTFE + BRONZE</b>				
<b>Ensaio</b>	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>	<b>Condição 3</b>	<b>Condição 4</b>
<b>1</b>	0,29 ± 0,003	0,33 ± 0,004	0,22 ± 0,002	0,21 ± 0,001
<b>2</b>	0,39 ± 0,005	0,23 ± 0,001	0,25 ± 0,002	0,21 ± 0,007
<b>3</b>	0,36 ± 0,005	0,27 ± 0,002	0,30 ± 0,006	0,18 ± 0,001
<b>4</b>	0,27 ± 0,009	0,25 ± 0,001	0,29 ± 0,006	-
<b>5</b>	-	-	-	-
<b>Média</b>	0,32 ± 0,06	0,27 ± 0,04	0,26 ± 0,04	0,20 ± 0,02

Tabela 4-3 - Valores médios do coeficiente de atrito cinético, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio do PTFE com enchimento de grafite

PTFE + GRAFITE				
Ensaio	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
1	0,24 ± 0,003	0,22 ± 0,003	0,23 ± 0,004	0,16 ± 0,005
2	0,23 ± 0,006	0,22 ± 0,004	0,23 ± 0,003	0,19 ± 0,001
3	0,29 ± 0,003	0,24 ± 0,002	0,17 ± 0,004	0,18 ± 0,002
4	0,25 ± 0,004	0,20 ± 0,004	0,20 ± 0,003	0,20 ± 0,002
5	0,25 ± 0,002	0,26 ± 0,002	0,18 ± 0,003	0,16 ± 0,002
<b>Média</b>	<b>0,25 ± 0,02</b>	<b>0,23 ± 0,02</b>	<b>0,20 ± 0,03</b>	<b>0,18 ± 0,002</b>

Os desvios padrões foram pequenos, mostrando que os ensaios praticamente ocorreram nas mesmas condições de coeficiente de atrito cinético.

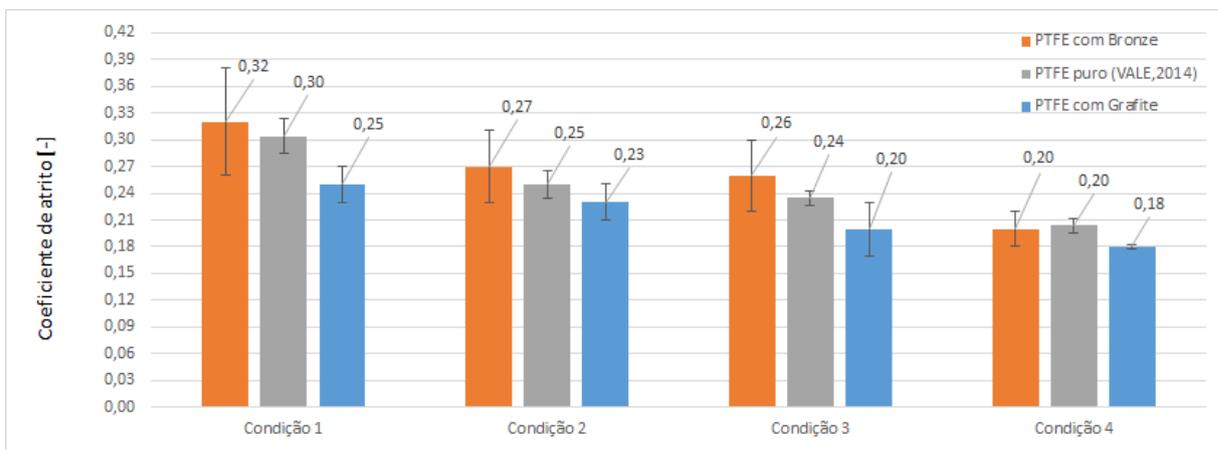


Figura 4-2 - Médias do coeficiente de atrito cinético para cada condição ensaiada

A Figura 4-2 mostra os resultados obtidos para coeficiente de atrito cinético para os materiais ensaiados e compara-se com VALE (2014). O coeficiente de atrito cinético do PTFE com enchimento de grafite apresentou, de modo típico, o menor valor, seguido do PTFE puro e pelo PTFE com enchimento de bronze. Visto na seção 2.2.1.1 que o grafite é uma boa opção de lubrificante sólido, ocorrendo assim a diminuição do coeficiente de atrito. Em se tratando do PTFE com enchimento de

bronze, o coeficiente de atrito aumentou, assim verifica-se que o bronze, independente da condição ensaiada, não trouxe benefício em relação ao coeficiente de atrito.

Pode-se observar que o PTFE com enchimento de bronze apresentou maior dispersão, seguido do PTFE puro e o PTFE com enchimento de grafite foi o que apresentou a menor dispersão do coeficiente de atrito cinético, com o aumento da carga normal.

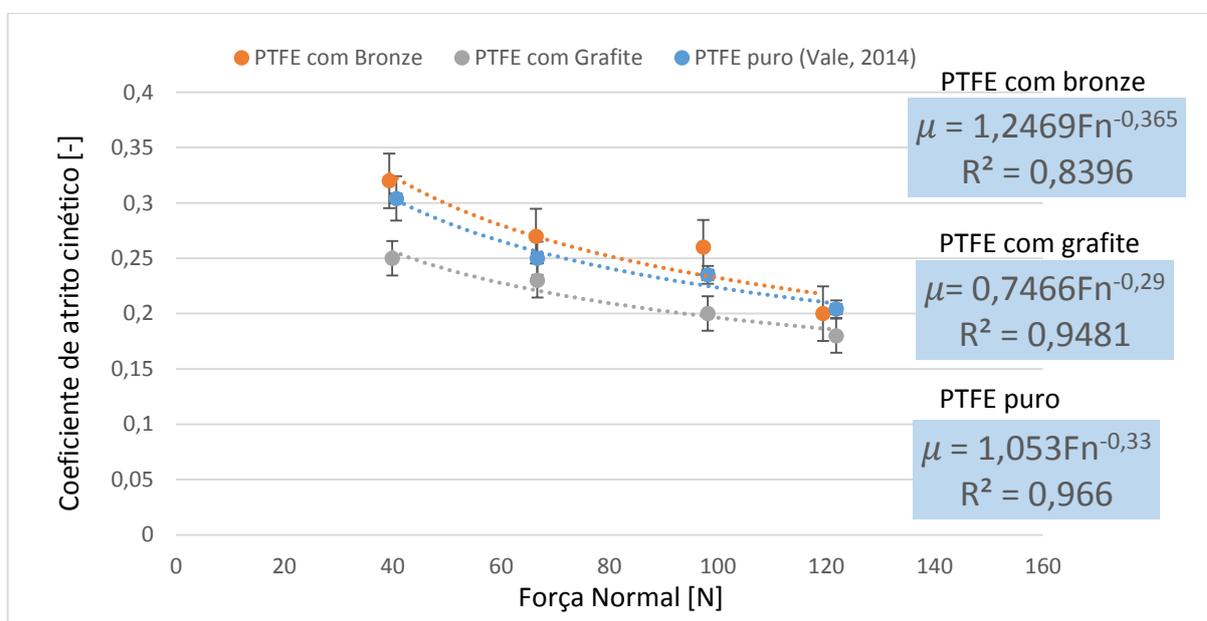
Cabe ressaltar que independente da condição ensaiada, obteve-se o mesmo comportamento típico da curva. Dessa maneira, as condições de carregamentos 1,2 e 3 mostraram-se significativas, com valores levemente mais afastados que a condição 4, onde o comportamento do sistema tribológico em relação ao coeficiente de atrito cinético foi muito próximo um do outro, mas mesmo assim manteve-se o padrão de comportamento obtido nas demais condições ensaiadas.

Desta maneira, materiais auto lubrificantes têm baixo coeficiente de atrito, fator ligado as ligações intermoleculares dos átomos, que ao serem cisalhadas acarretam a melhora no deslizamento de uma superfície sobre a outra, pois eles não possuem lubrificantes líquidos, e dessa maneira são uma ótima alternativa quando se quer boa lubrificação em meios que não podem estar contaminados por líquido. Assim, o PTFE que apresenta baixo coeficiente de atrito estático e cinético é uma boa opção para uso em mancal, onde alguns enchimentos trazem benefícios, no que diz respeito ao atrito, segundo Khoddamzadeh *et al.* (2009).

Logo, o comportamento tribológico do PTFE mostra-se um fenômeno complexo, dependente de muitos fatores, dentre os quais tem-se o teor de enchimento, a natureza do enchimento e a morfologia do enchimento (KHODDAMZADEH, 2009). Assim, no deslizamento mancal sobre eixo proposto, ocorre a deposição de enchimento no eixo, o que aumenta a lubrificação no rolamento. Após a transferência de filme por força normal, aderido ao contra corpo, o coeficiente de atrito diminui, pois material polimérico mostra-se relutante à transferência de depósitos extras, e assim aquele material já aderido acarreta a facilitação do deslizamento.

Os valores de coeficiente de atrito cinético decrescem com o aumento da força normal, assim utilizou-se o modelo de atrito de Archard (1957), que propõe que o contato poder ser tratado como o de uma aspereza, onde o coeficiente de atrito segue a relação  $\mu \propto F^{-\left(\frac{1}{3}\right)}$  (HUTCHINGS, 1992). Com isso, através do método dos mínimos quadrados ajustou-se a curva para determinação dos coeficientes  $x^1$  e  $x^2$  na Equação (14), e os valores estão na Figura 4-3.

$$\mu = x_1 F_N^{x_2} \quad (14)$$



**Figura 4-3 - Valores médios para o coeficiente de atrito cinético para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos 20 minutos de ensaio**

Aplicando-se o ajuste para o material com enchimento de bronze, obteve-se uma representatividade de 83,96%, conforme o valor do coeficiente de determinação e se tratando do parâmetro  $x_2$  da Equação (14) obteve-se valor de -0,365, o qual está muito próximo do esperado na literatura, segundo determinação de Archard (1957).

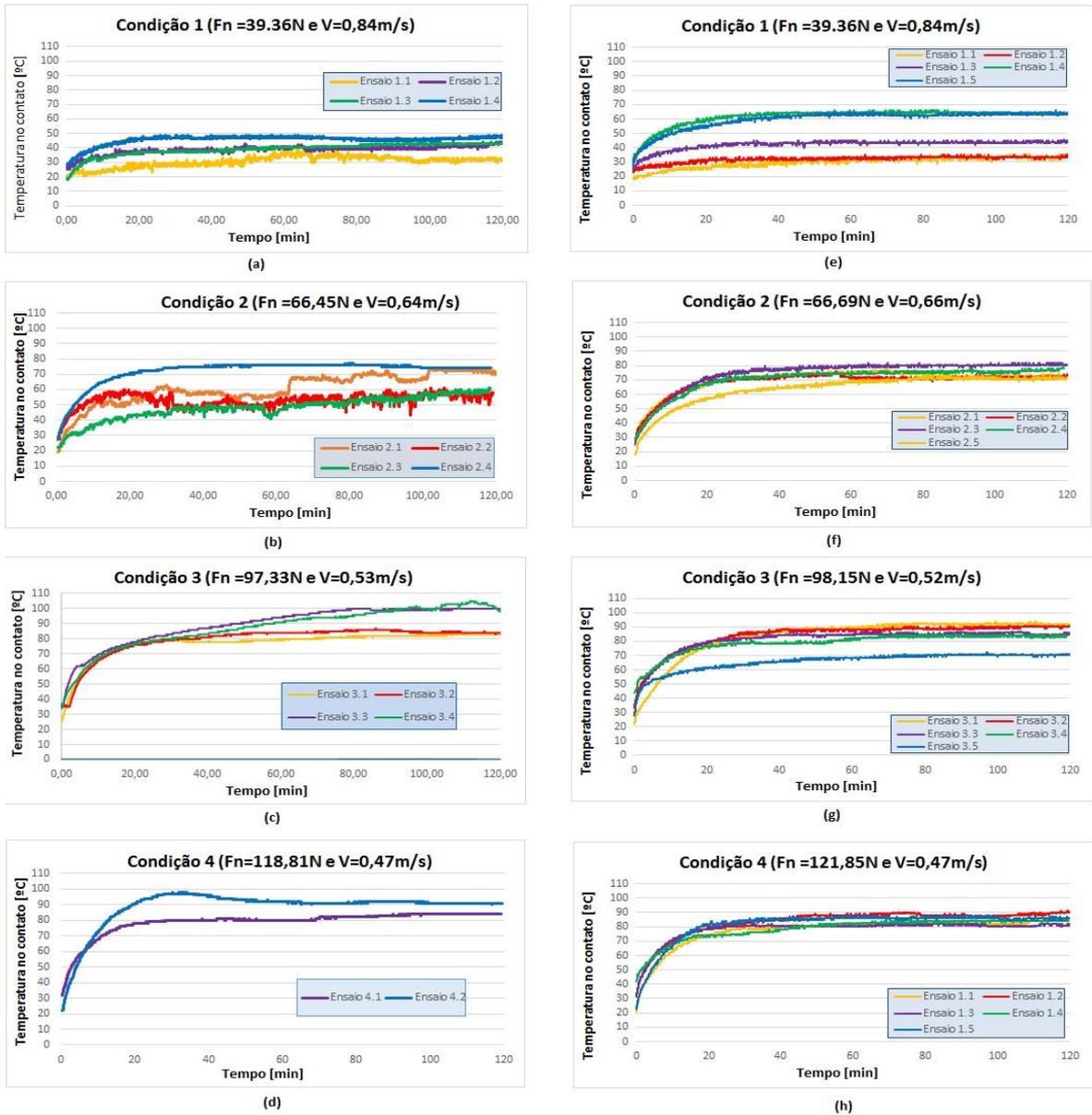
Já para o material com enchimento de grafite, aplicando-se o ajuste, obteve-se uma representatividade de 94,81%, conforme o valor do coeficiente de determinação

e por consequência o parâmetro  $x_2$  da Equação (14) obtido tem o valor de -0,29, assim ficando próximo do valor proposto por Archard (1957).

Ambos os materiais de PTFE com enchimento, se aproximaram da determinação de Archard (1957). Contudo, ressalta-se que o valor de -0,3333 obtido por Vale (2014) é para polímero puro com contato predominantemente elástico. Deste modo, a adição de enchimento fez com que o valor do coeficiente obtido nos ensaios se afastasse do proposto por Archard (1957). Com as informações do fornecedor, o material de PTFE com enchimento de bronze tem 40% de bronze, e o PTFE com enchimento de grafite tem 20% de grafite, assim essas porcentagens de enchimento implicam no pequeno afastamento do valor do coeficiente proposto por Archard (1957). Tal afastamento se deu em direções opostas em relação ao PTFE puro.

#### **4.3 Temperatura no contato**

Os valores da temperatura no contato, dos dois materiais (PTFE com enchimento de bronze; PTFE com enchimento de grafite), para as quatro condições são apresentados na Figura 4-4.



**Figura 4-4 - Dados da temperatura no contato em função do tempo**  
**PTFE + bronze - (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4**  
**PTFE + grafite - (e) Condição 1 (f) Condição 2 (g) Condição 3 (h) Condição 4**

As temperaturas alcançadas foram muito menores que a de fusão dos materiais, pois para todas as condições foram usados valores de PV abaixo dos valores de PV máximos, garantindo assim que as temperaturas de fusão não fossem alcançadas, onde tais valores foram mostrados na seção 3.4. No intuito de avaliar-se a estabilização da temperatura no contato, para cada condição de carregamento normal ensaiado, apresenta-se a Tabela 4-4 e Tabela 4-5 para os valores médios dos últimos 20 minutos de ensaio.

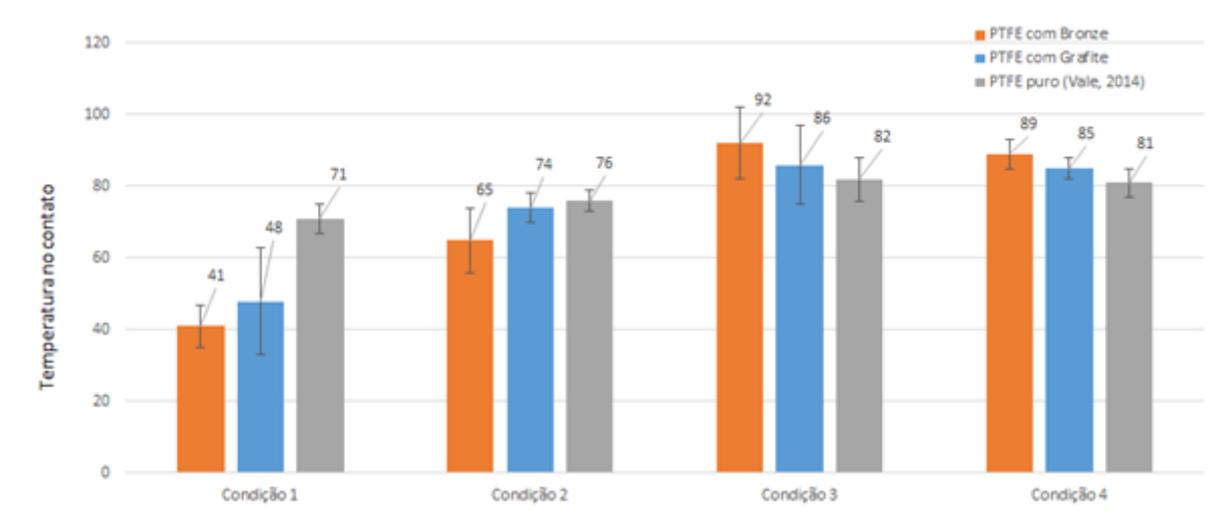
Tabela 4-4 - Valores médios para a temperatura no contato, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio para o PTFE com enchimento de bronze

<b>PTFE + BRONZE</b>				
<b>Ensaio</b>	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>	<b>Condição 3</b>	<b>Condição 4</b>
<b>1</b>	32 ± 1	72 ± 2	82 ± 1	84 ± 1
<b>2</b>	41 ± 1	56 ± 2	84 ± 1	91 ± 1
<b>3</b>	42 ± 1	57 ± 2	99 ± 1	91 ± 1
<b>4</b>	46 ± 1	74 ± 1	102 ± 2	-
<b>5</b>	-	-	-	-
<b>Média</b>	41 ± 6	65 ± 9	92 ± 10	89 ± 4

Tabela 4-5 - Valores médios para a temperatura no contato, para as quatro condições de força normal, considerando somente os últimos vinte minutos de ensaio para o PTFE com enchimento de grafite

<b>PTFE + GRAFITE</b>				
<b>Ensaio</b>	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>	<b>Condição 3</b>	<b>Condição 4</b>
<b>1</b>	33 ± 1	70 ± 1	92 ± 1	83 ± 2
<b>2</b>	33 ± 1	72 ± 0	90 ± 0	88 ± 1
<b>3</b>	44 ± 1	80 ± 0	85 ± 1	81 ± 1
<b>4</b>	64 ± 1	77 ± 1	84 ± 0	84 ± 0
<b>5</b>	64 ± 1	73 ± 1	70 ± 0	85 ± 1
<b>Média</b>	48 ± 15	74 ± 4	86 ± 11	85 ± 3

A Figura 4-5 mostra as médias das temperaturas no contato do sistema tribológico juntamente com dados obtidos por Vale (2014). Observou-se que a maior temperatura no contato foi do PTFE com grafite, seguida do puro e PTFE com bronze para a condição 1 e 2. Já para a condição 3 e 4 houve comportamento inverso. Contudo, houve tendência de aumento dos valores de temperatura no contato para todos os materiais da condição 1 para a 4, com visível redução da diferença entre os valores médios para cada condição. Ademais, para as últimas duas condições verificou-se que, com poucas exceções, os valores são estatisticamente iguais. Esperava-se que o bronze adicionado ao PTFE iria melhorar a condutibilidade térmica do composto, aumentando assim a capacidade do material de dissipar calor, e como consequência apresentar a menor temperatura no contato.



**Figura 4-5 - Médias da temperatura no contato para cada condição ensaiada**

Devido ao aumento da carga normal, da condição 1 para a condição 4, houve uma tendência dos valores de temperatura no contato atingirem valores mais próximos uns dos outros. Com isso, pode-se supor que o aumento da carga normal no contato e a redução da velocidade de deslizamento impuseram, ao tribossistema, respectivamente, uma elevação na energia gerada e uma redução na eficiência de dissipação térmica. Segundo Hutchings *et al.* (1992), o sistema tribológico tende a uma condição adiabática com o aumento da carga normal no contato, ou com a velocidade de deslizamento. Neste contexto, o sistema tendeu a apresentar uma resposta próxima para os valores de temperatura, para as condições 3 e 4, com pouca influência das propriedades térmicas de cada composto polimérico. Para o caso em estudo, verifica-se que com o aumento da carga normal e mantendo-se a condição PV constante o PTFE com enchimento de bronze apresentou maior variação da temperatura.

Para entender melhor o comportamento da temperatura no contato, Vale (2014) propôs um modelo matemático baseado na equação de Bhushan (2002), assim obteve-se a Equação (15) apresentada. Assumindo-se algumas hipóteses relevantes, dentre elas: condição PV constante para todos os níveis de ensaio; taxa de energia dissipada mantendo relação de proporção com a temperatura no contato; área real de contato como uma pequena fração, pode-se utilizar o modelo que leva em consideração a razão entre a temperatura de contato e o produto do coeficiente de atrito e da raiz quadrada da força normal que devem permanecer constante para

todos níveis de carga normal ensaiados. O modelo matemático proposto por Vale (2014) é apresentado na Equação (15).

$$\frac{T}{\mu F_N^{0,5}} \propto \text{constante} \quad (15)$$

Esse modelo mostrou que a temperatura no contato se mantém proporcional com o coeficiente de atrito cinético e a raiz quadrada da força normal, independentemente do nível do ensaio, utilizando o PTFE puro. Com o PTFE com enchimentos de bronze e PTFE com enchimento de grafite, este modelo mostrou-se com semelhança nos parâmetros avaliados para ambos os materiais utilizados, com algumas variações nos valores.

A Figura 4-6 apresenta os valores obtidos pela Equação (15), para os quatro níveis de carregamento do PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite e os dados do PTFE puro que foram obtidos por Vale (2014).

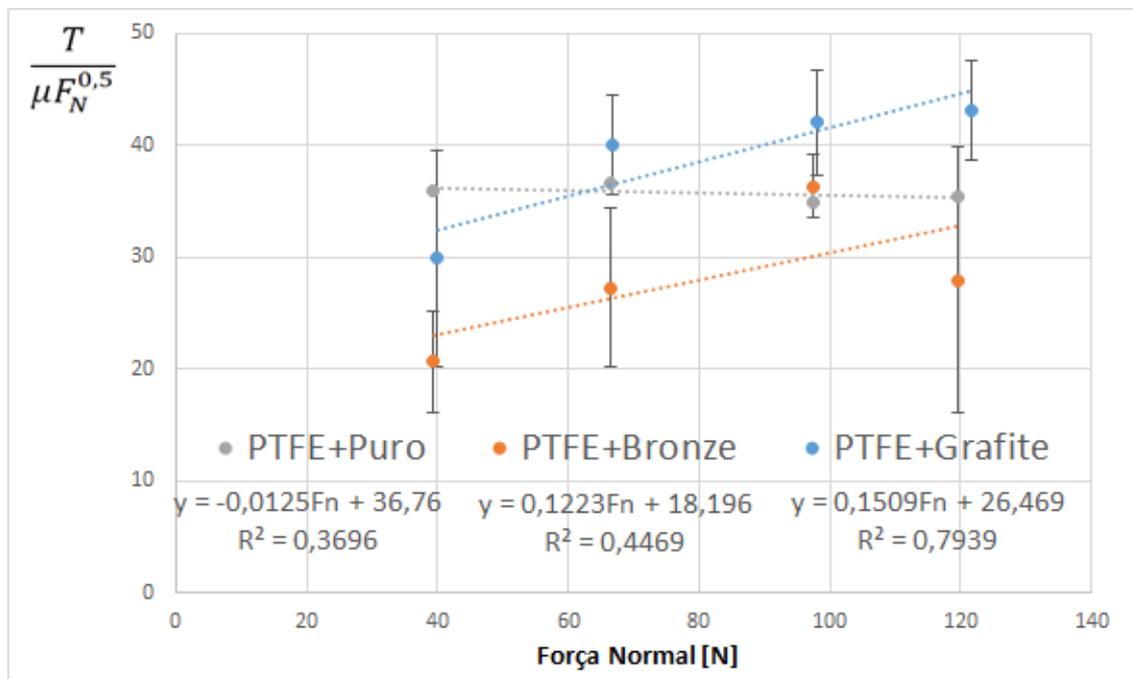


Figura 4-6 - Verificação do modelo de Bhushan (2002) com valores dos termos da Equação (13) em função do carregamento normal

Os coeficientes angulares obtidos com a determinação da linha de tendência, mostram que o coeficiente angular obtido para o PTFE com enchimento de grafite,

foi o maior, ou seja, teve uma maior variação para mesma diferença de força normal, em comparação com os outros dois materiais. Se tratando do coeficiente angular do PTFE com enchimento de bronze, ele ficou com valor intermediário dentre os três valores, mostrando uma variação para mesma diferença de força normal mediana, já o coeficiente angular do PTFE puro, é praticamente constante, pois seu valor indica uma inclinação quase nula, assim sendo o valor no eixo da ordenada praticamente constante. Ainda, os enchimentos fizeram com que houvesse um comportamento levemente diferente do parâmetro  $F_n$ , mas mesmo assim os valores foram próximos de maneira geral.

#### **4.4 Desgaste**

Nesta seção, será abordado a identificação dos mecanismos de desgaste que operam durante o deslizamento e seus efeitos sobre as topografias das superfícies de contato, assim como a quantificação do desgaste dos materiais, e por fim serão realizadas comparações entre os efeitos causados pelo ensaio de desgaste nas superfícies do aço inoxidável, do PTFE com enchimento de bronze, PTFE com enchimento de grafite e PTFE puro.

##### **4.4.1 Quantificação de desgaste do par tribológico**

A taxa de desgaste mássico média é uma das maneiras de quantificar o desgaste do par tribológico e, visto sua relevância, verifica-se a severidade do processo como dito na seção 3.5.

Contudo, para os ensaios realizados com PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, os valores de perda mássica não foram significativos para a balança utilizada, devido à incerteza de medição ser de 0,01g. Para o PTFE puro, Vale (2014) obteve valores para taxa de desgaste mássico médio na ordem de miligramas, no presente trabalho foi obtido valores na ordem de microgramas, isto se reflete diretamente na área de contato nominal.

A região de contato entre o corpo e o contra corpo, pode ser modelado do tipo côncavo de dois cilindros, segundo Norton (2003). Esta região pode ser observada na Figura 4-7 e está representada pela letra “ $a$ ”. Desta maneira, o primeiro método

utilizado para quantificar o desgaste causado pelo ensaio, se dá pela variação da área nominal.

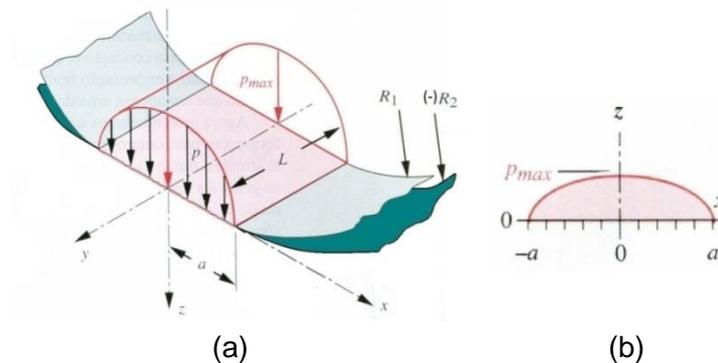


Figura 4-7 - Distribuição de pressão para contato cilíndrico (a) distribuição de pressão elipsoidal prismática no contato cilíndrico (b) distribuição de pressão na região de contato  
Fonte: Adaptado de Norton (2003)

A variação da área nominal ocorre principalmente devido à perda mássica do compósito, o que resulta em um aumento da área de contato entre o corpo e o contra corpo durante o ensaio de desgaste. A Figura 4-8, apresenta os valores da largura da região de contato ( $2a$ ), em relação as quatro condições de carga normal obtidas nos ensaios.

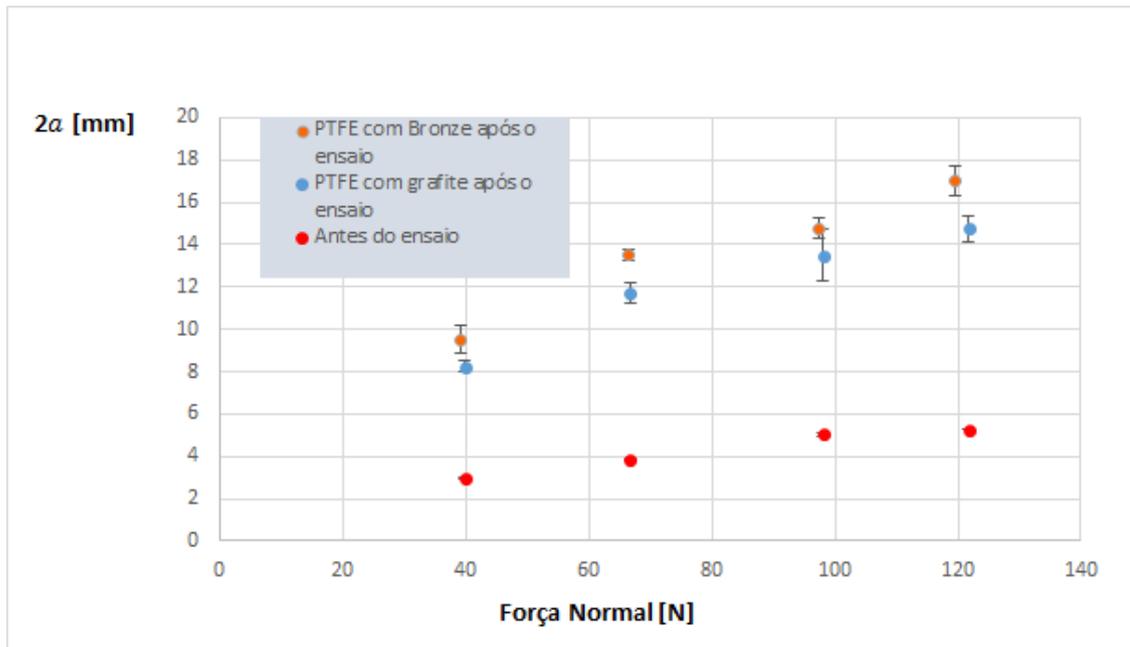


Figura 4-8 - Variação da largura da região de contato para os quatro níveis de força normal antes e após ensaios

Os valores de “ $a$ ” após os ensaios foram obtidos através de medidas nos corpos de PTFE com os enchimentos, e apresentados pelas médias e desvios-padrão. Já os valores de “ $a$ ” antes dos ensaios foram obtidos pela Equação (16), apresentada por Boreasi e Sidebottom (1985).

$$a = f(F_N) = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{k_1 + k_2}{B} \cdot \frac{F_N}{L}} \quad (16)$$

Como pode ser observado na Figura 4-8, ocorreu um aumento da largura de contato, para todas as quatro condições de carga normal, porém em nenhuma das condições, os valores chegaram próximos de 20mm, que seria a máxima área de contato nominal levando em consideração os diâmetros do corpo e do contra corpo. Nota-se que o PTFE com enchimento de bronze teve em todas as quatro condições de carga normal, uma maior área nominal que o PTFE com enchimento de grafite, porém teve significativa diminuição da área nominal levando em consideração o PTFE puro.

Para facilitar a discussão, a Figura 4-9 mostra a área nominal após os ensaios para as quatro condições analisadas com o PTFE com enchimento de bronze, PTFE com enchimento de grafite e PTFE puro.

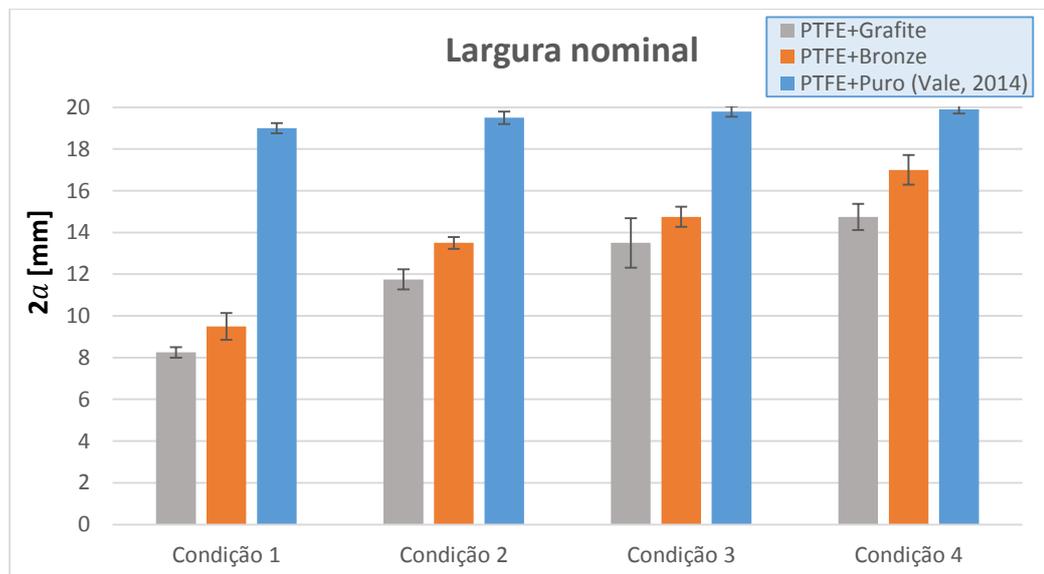


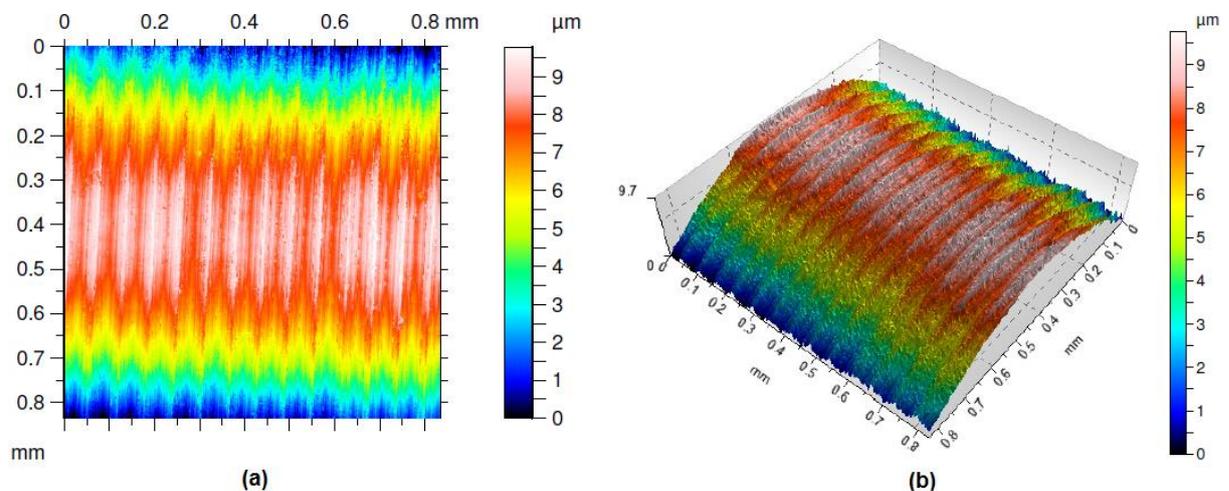
Figura 4-9 - Largura nominal após os ensaios para as quatro condições de carga normal

A adição de enchimento de bronze ou grafite no PTFE, proporciona menor variação da largura nominal que é diretamente proporcional ao desgaste, sendo assim obtêm-se melhor desempenho tribológico. Pode-se observar que o PTFE com enchimento de grafite obteve o melhor desempenho, seguido do PTFE com enchimento de bronze e por fim o PTFE puro.

Em relação ao aço inox, do mesmo modo que os dados obtidos por Vale (2014), não observou-se variação na taxa de desgaste mássico, isso pode ter ocorrido devido as diferentes estruturas moleculares dos materiais utilizados, o que confere maior resistência ao desgaste no aço inox.

#### 4.4.2 Alterações na topografia do Aço Inoxidável

Para realizar as análises de alteração na topografia do aço inox, foi utilizado interferometria de luz branca (IDLB). A Figura 4-10 apresenta a vista superior e em 3D, antes do ensaio de desgaste, nota-se a presença de um padrão de ondulações. Este padrão se repete para todos os contra corpos analisados e são provenientes do processo da usinagem descrito na seção 3.1.



**Figura 4-10 - Topografias típicas do aço inoxidável, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste (a) em vista superior (b) em 3D**

A seguir, são apresentadas as análises da topografia do aço inox após os ensaios de desgaste. Inicia-se com as imagens obtidas pela IDLB em vista 3D, das quatro condições de ensaio do PTFE com enchimento de bronze exibidas na Figura 4-11, e do PTFE com enchimento de grafite exibidas na Figura 4-12.

Realizando uma comparação com as Figura 4-10, Figura 4-11 e Figura 4-12, pode-se observar que, para o par tribológico trabalhando com o mancal de PTFE

com enchimento de bronze, ocorreu alterações na topografia em função da força normal aplicada, já o par tribológico trabalhando com mancal de PTFE com enchimento de grafite, não houve alterações, o mesmo resultado obtido por Vale (2014) para PTFE puro.

Cabe ressaltar que a condição 4 do PTFE com enchimento de bronze, apresentou valores mais elevados de rugosidade do que na condição original, o que se observa na Figura 4-11.

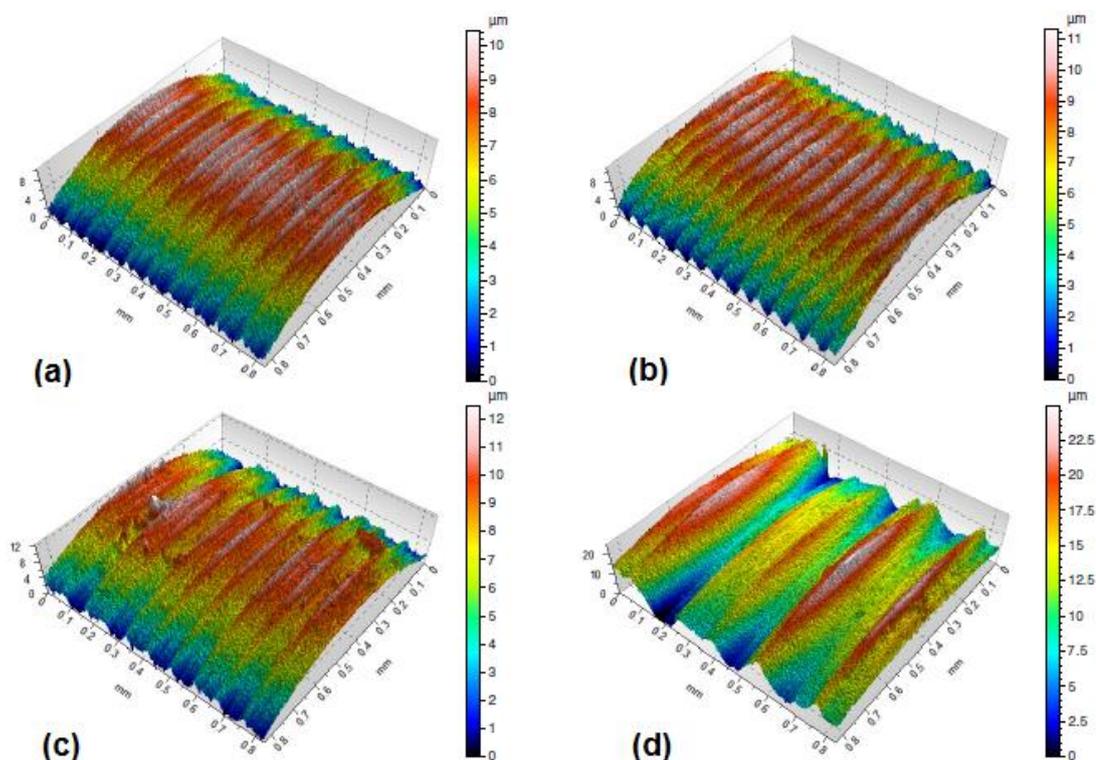
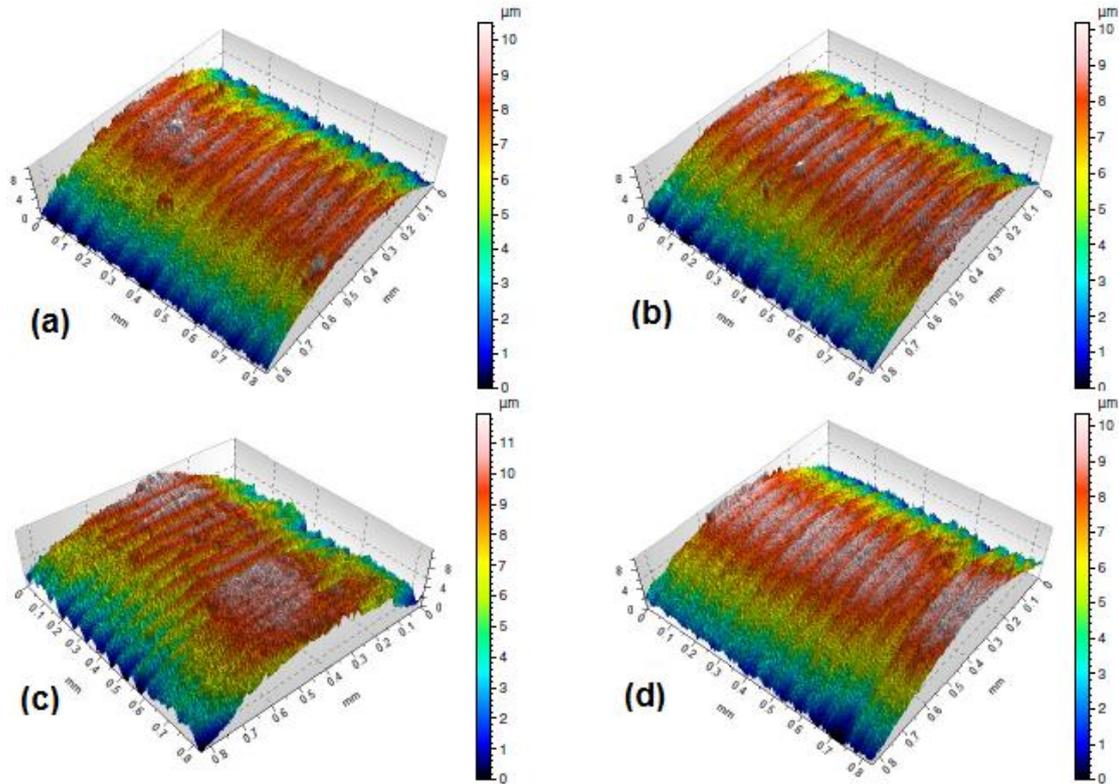


Figura 4-11 - Topografias do Aço Inoxidável trabalhando com PTFE com enchimento de bronze, obtidas por IDLB vista 3D, após o ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4



**Figura 4-12 - Topografias do Aço Inoxidável trabalhando com PTFE com enchimento de grafite, obtidas por IDLB vista 3D, após do ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4**

Para quantificar as alterações na superfície do aço inoxidável, antes dos ensaios de desgaste e após os ensaios utilizando mancais de PTFE com enchimento de bronze e de grafite, são apresentados, na Tabela 4-6 alguns parâmetros de rugosidade. Dentre os parâmetros temos  $S_a$  (média aritmética da altura),  $S_q$  (raiz quadrada da altura média),  $S_z$  (altura máxima) e  $S_p$  (altura máxima de pico).

Pode-se notar que os valores de  $S_a$  foram gradativamente aumentando para o PTFE com enchimento de bronze, isso afirma que houve material depositado no aço inoxidável, devido a esse aumento, já para o PTFE com enchimento de grafite, esse parâmetro não foi regular, onde para as condições 1 e 3 obteve-se maior deposição que nas condições 2 e 4. Para a variável  $S_q$  verificou-se o mesmo comportamento que  $S_a$ , pois a única diferença foi o que se mediu, mas os valores obtidos afirmam a deposição em cada condição.

Os parâmetros  $S_z$  e  $S_p$  para o PTFE com enchimento de bronze, afirmam que da condição 1 à 3, houve pequena diferença no aumento da altura dos picos, já na

condição 4 houve um aumento maior da altura, com isso pode-se supor que houve deposição no pico. Tal suposição foi feita, pois não avaliou-se o mesmo corpo pré e pós ensaio. . Se tratando dos mesmos parâmetros para o PTFE com enchimento de grafite, observa-se que da condição 1 à 3, foi havendo um aumento das alturas de pico e altura máxima, diferentemente na condição 4 onde houve diminuição dessas variáveis, o que é explicado devido a um possível arrancamento do material aderido ao aço, devido a força normal aplicada ter sido aumentada.

**Tabela 4-6 - Parâmetros de rugosidade para o aço inoxidável, antes e após ensaios, para quatro condições de força normal**

Parâmetro	Material	Sem ensaiair	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Média
Sa	PTFE com bronze	2,018	2,069	2,068	2,158	3,756	2,5 ± 0,8
	[µm] PTFE com grafite		2,046	2,03	2,139	2,031	2,1 ± 0,1
Sq	PTFE com bronze	2,365	2,452	2,482	2,568	4,639	3,0 ± 1,0
	[µm] PTFE com grafite		2,395	2,379	2,563	2,391	2,4 ± 0,1
Sz	PTFE com bronze	9,781	10,79	11,34	12,46	24,93	14,9 ± 6,7
	[µm] PTFE com grafite		10,51	10,19	11,97	10,36	10,8 ± 0,8
Sp	PTFE com bronze	3,701	4,322	4,539	5,465	11,78	6,5 ± 3,5
	[µm] PTFE com grafite		4,499	4,157	4,93	3,971	4,4 ± 0,4

Então, através da análise das imagens obtidas por microscopia óptica da superfície do aço inoxidável, observa-se deposição de material no corpo.

Para o PTFE com enchimento de bronze, observou-se deposição de material no contra corpo, o que ocorre devido ao movimento relativo entre as superfícies do corpo e contra corpo e, podendo ser explicado pelas estruturas moleculares dos materiais analisados. Na Figura 4-13 observa-se o contra corpo no começo da região de contato, desta maneira fica nítida a deposição de material por adesão.



Figura 4-13 - Contra corpo de aço inoxidável, limite da área de contato (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul)

A deposição se deu do PTFE com enchimento para o contra corpo de aço inoxidável, devido ao fato do corpo de PTFE ser o material de menor dureza, assim ocorre a quebra de suas ligações intermoleculares, desta maneira forma-se um filme fortemente ligado sobre a superfície do contra corpo.

Já o par tribológico que continha PTFE com enchimento de grafite, verificou-se maior deposição de material, porém o filme formado teve uma ligação fraca ao contra corpo, o que pode ser observado através de microscopia óptica.

Na Figura 4-14 é apresentada a região do contra corpo onde ocorreu a formação do filme, observa-se uma descontinuidade na formação deste filme evidenciando a fraca ligação com o contra corpo, para facilitar a visualização é apresentada a região no limite do contato entre o corpo de PTFE com enchimento de grafite e o aço inox.

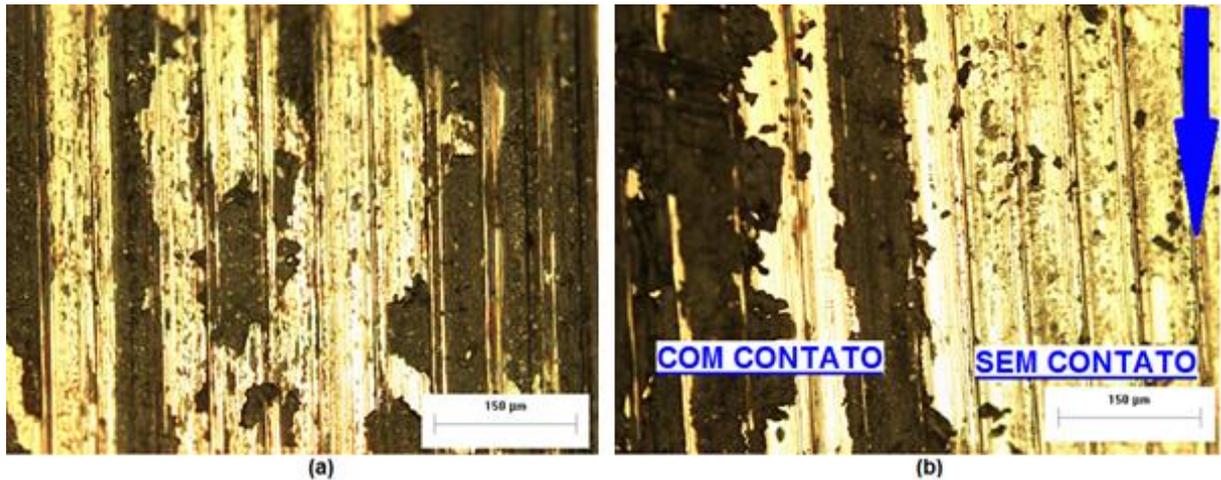
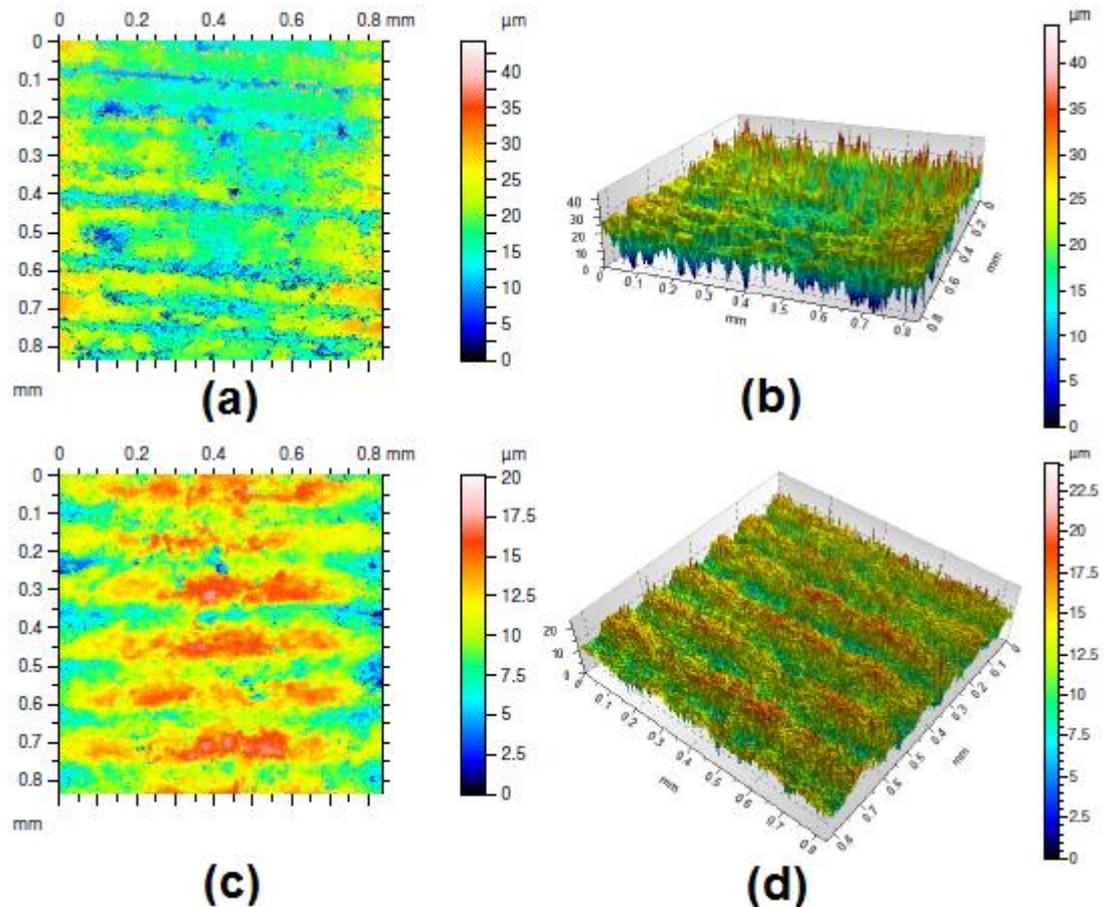


Figura 4-14 - (a) Região de contato entre os corpos onde se dá a formação do filme (b) Região do limite da área de contato (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul)

#### 4.4.3 Alteração na topografia do PTFE com enchimento

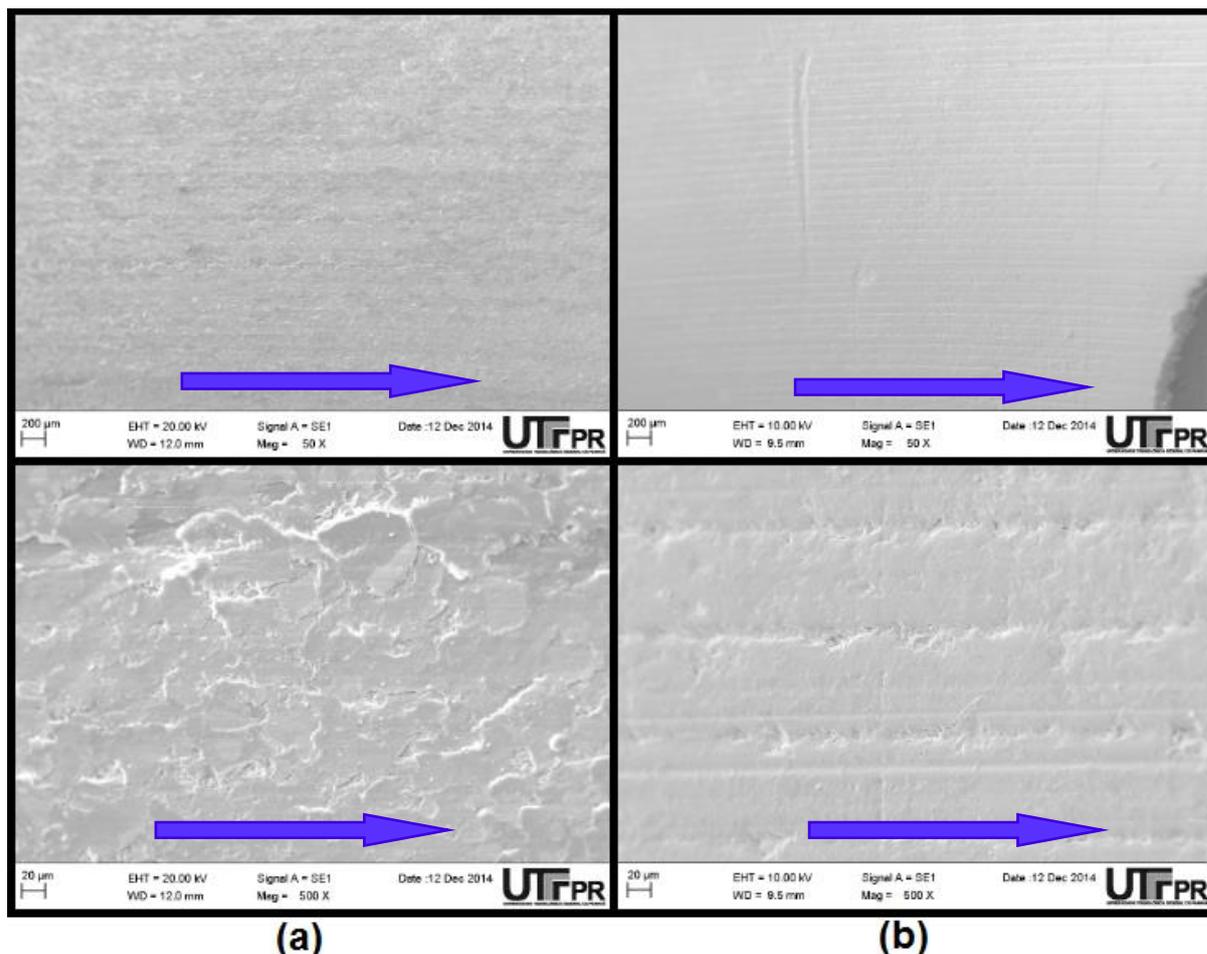
As análises sobre as alterações na topografia do PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, foram realizadas através de interferometria de luz branca (IDLB) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 4-15 apresenta a vista superior e em 3D, obtidas através de IDLB da superfície dos dois compostos de PTFE antes do ensaio. Pode-se observar que apesar de passarem pelo mesmo processo de usinagem, com os mesmos parâmetros, houve grande diferença em relação a topografia do aço inoxidável, PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite.



**Figura 4-15 - Topografias típicas do PTFE com enchimento, obtidas por IDLB, antes do ensaio de desgaste (a) em vista superior do PTFE com enchimento de bronze (b) em 3D do PTFE com enchimento bronze (c) em vista superior do PTFE com enchimento grafite (d) em 3D do PTFE com enchimento grafite**

Nota-se na Figura 4-15 a diferença na topografia do PTFE com enchimento de bronze, onde não apresenta padrão nem textura, já o PTFE com enchimento de grafite observa-se padrões que estão relacionados com a usinagem.

Materiais com menor ductilidade e maior resistência mecânica têm superfícies com melhor acabamento, segundo Stemmer (2001). A Figura 4-16 apresenta imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura das superfícies do PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, onde evidencia a diferença no acabamento. Nota-se que o PTFE com enchimento de bronze não apresenta nenhum padrão ou textura, já o PTFE com enchimento de grafite segue os mesmos padrões encontrados no contra corpo de aço inoxidável.



**Figura 4-16 - Imagens obtidas por MEV (a) topografia do PTFE com enchimento de bronze antes do ensaio (b) topografia do PTFE com enchimento de grafite antes do ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul)**

Com a realização dos ensaios de desgaste, as superfícies dos corpos de PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite sofreram alterações. A Figura 4-17 e Figura 4-18 apresenta a topografia dos corpos de prova em vista superior, obtidos por IDLB, para as quatro condições de ensaio.

Pode-se observar na Figura 4-17 que para os corpos de PTFE com enchimento de bronze a topografia, que antes do ensaio era irregular sem padrões nem textura, tende a ter padrões parecidos com os encontrados na topografia do aço inoxidável. Esses padrões ficam mais evidentes com o aumento da força normal, isso possivelmente ocorre devido à dureza dos materiais. Já o PTFE com enchimento de grafite representado na Figura 4-18, que apresentava um padrão bem definido antes do ensaio de desgaste, sofre uma tendência de alisamento da rugosidade e importação do perfil da topografia do contra corpo.

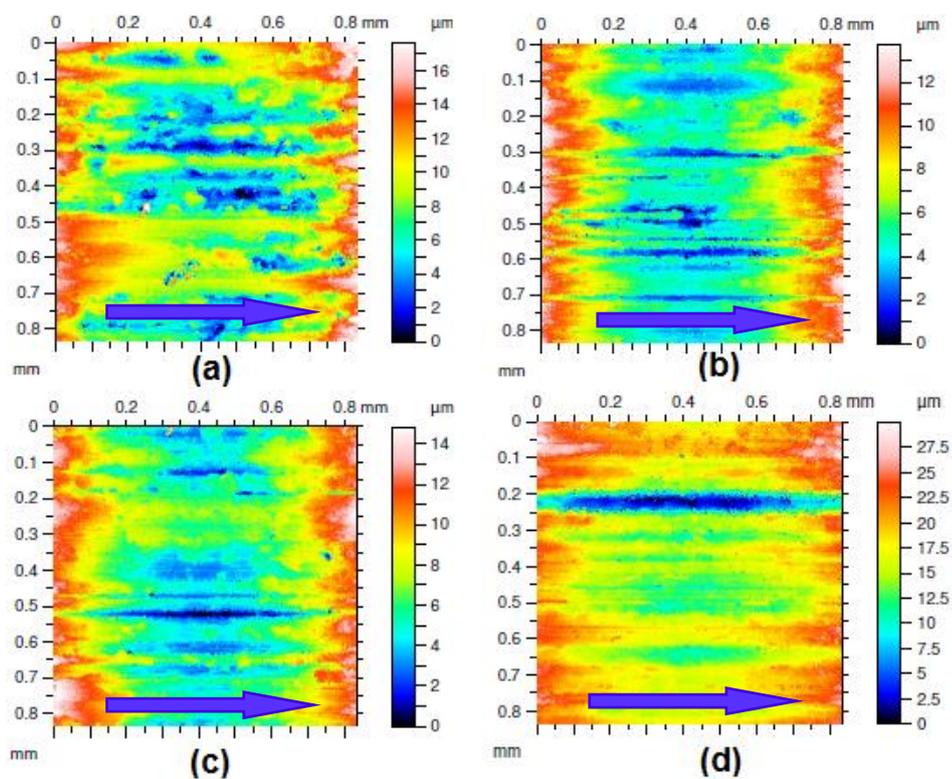
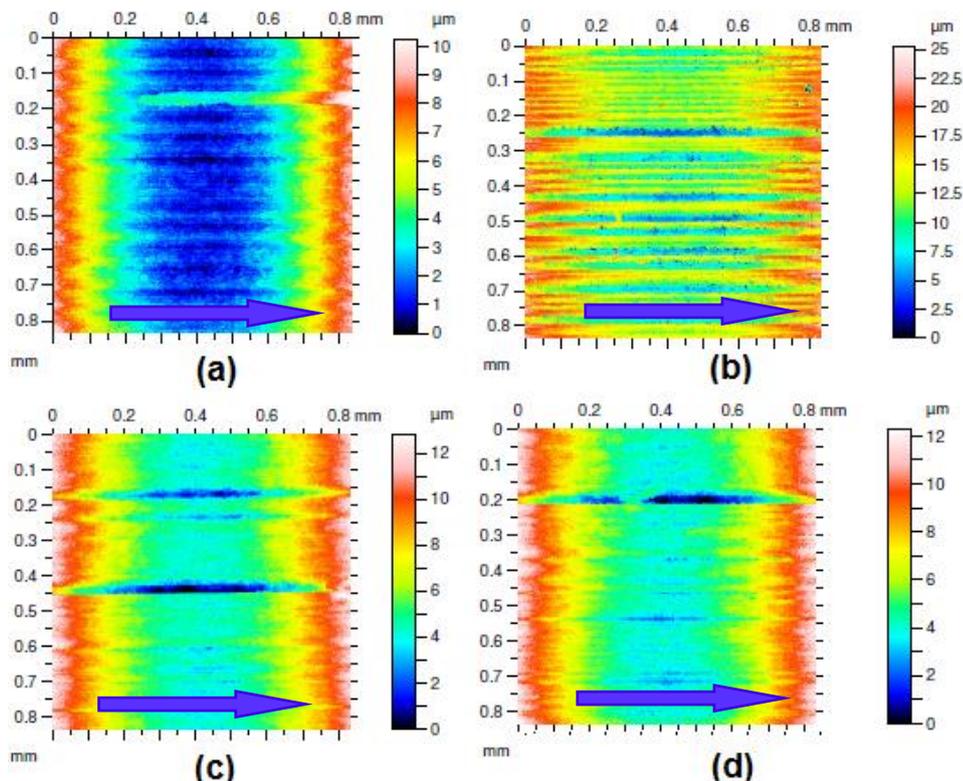


Figura 4-17 - Topografias, obtidas por IDLB, em vista superior dos corpos de PTFE com enchimento de bronze após ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul) (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4



**Figura 4-18 - Topografias, obtidas por IDLB, em vista superior dos corpos de PTFE com enchimento de grafite após ensaio (o sentido de deslizamento é indicado pela seta azul) (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4**

A topografia em 3D dos corpos de PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite está representada respectivamente na Figura 4-19 e Figura 4-20. Nota-se na Figura 4-19 que representa o PTFE com enchimento de bronze, uma tendência de desgaste menos homogêneo para mais homogêneo com o aumento da carga normal, já o PTFE com enchimento de grafite representado pela Figura 4-20, houve uma tendência de desgaste mais homogêneo na condição um para menos homogêneo na condição quatro de ensaio.

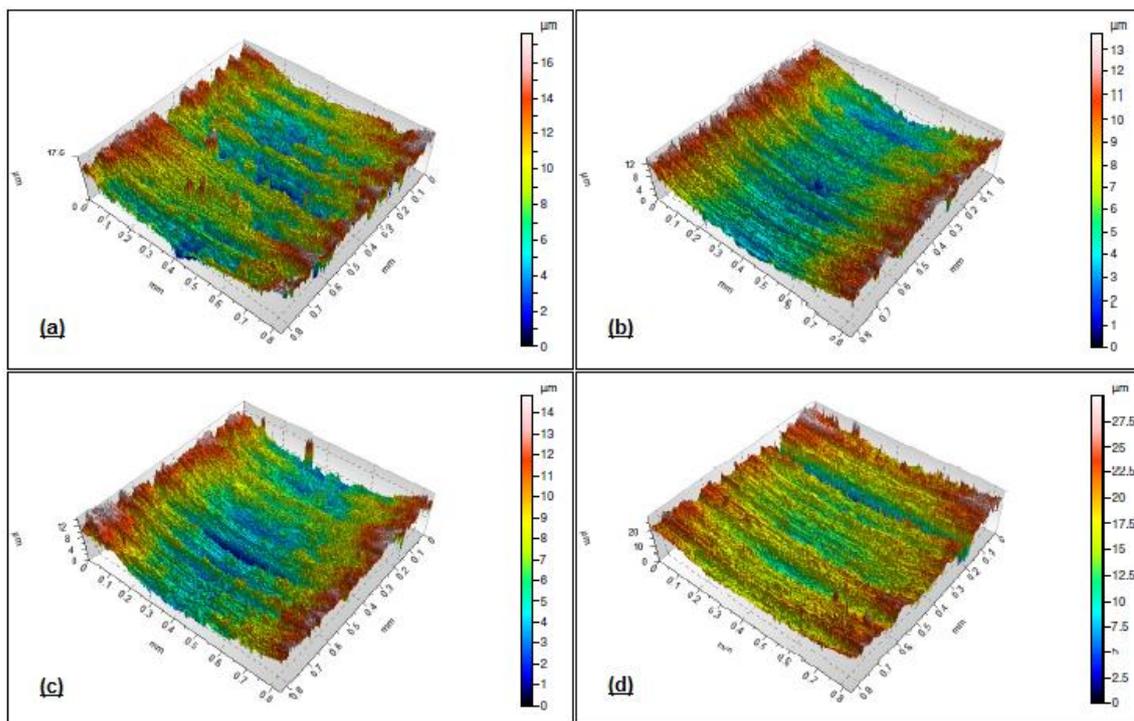


Figura 4-19 - Topografias do PTFE com enchimento de bronze, obtidas por IDLB vista 3D, após do ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4

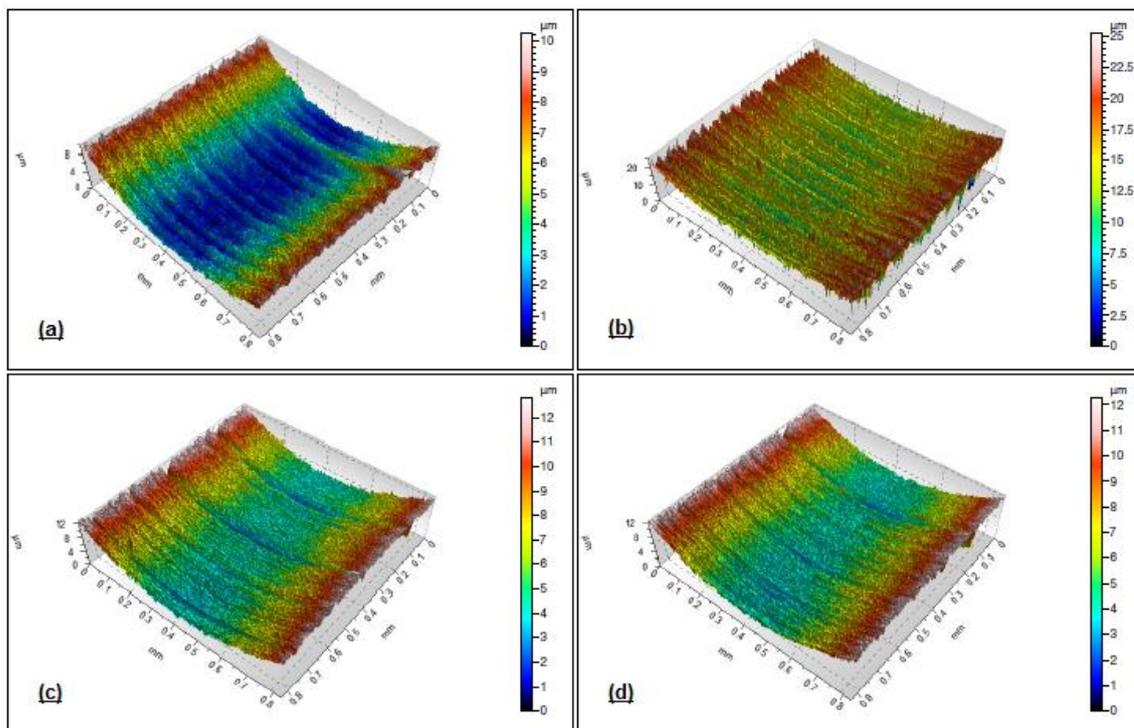


Figura 4-20 - Topografias do PTFE com enchimento de grafite, obtidas por IDLB vista 3D, após do ensaio de desgaste (a) Condição 1 (b) Condição 2 (c) Condição 3 (d) Condição 4

Na Tabela 4-7 - Valores dos parâmetros de rugosidade para o PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, antes e após ensaios,

para quatro condições de força normal são apresentados alguns parâmetros de rugosidade para quantificar alterações na superfície dos corpos de PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite. Dentre os parâmetros temos  $S_a$  (média aritmética da altura),  $S_q$  (raiz quadrada da altura média),  $S_z$  (altura máxima) e  $S_p$  (altura máxima de pico).

No geral, os parâmetros não se comportam de maneira constante para o PTFE com enchimento de bronze. Constata-se que houve redução da condição 1 para a 2 e em seguida aumentou-se todos os parâmetros até a condição 4, onde obteve-se o maior valor dos parâmetros. Assim os resultados dos valores dos parâmetros  $S_a$  e  $S_q$  tiveram pouca dispersão, devido ao baixo valor de desvio padrão, já os parâmetros  $S_z$  e  $S_p$  tiveram uma dispersão um pouco maior, vide valores um pouco maiores de desvio padrão.

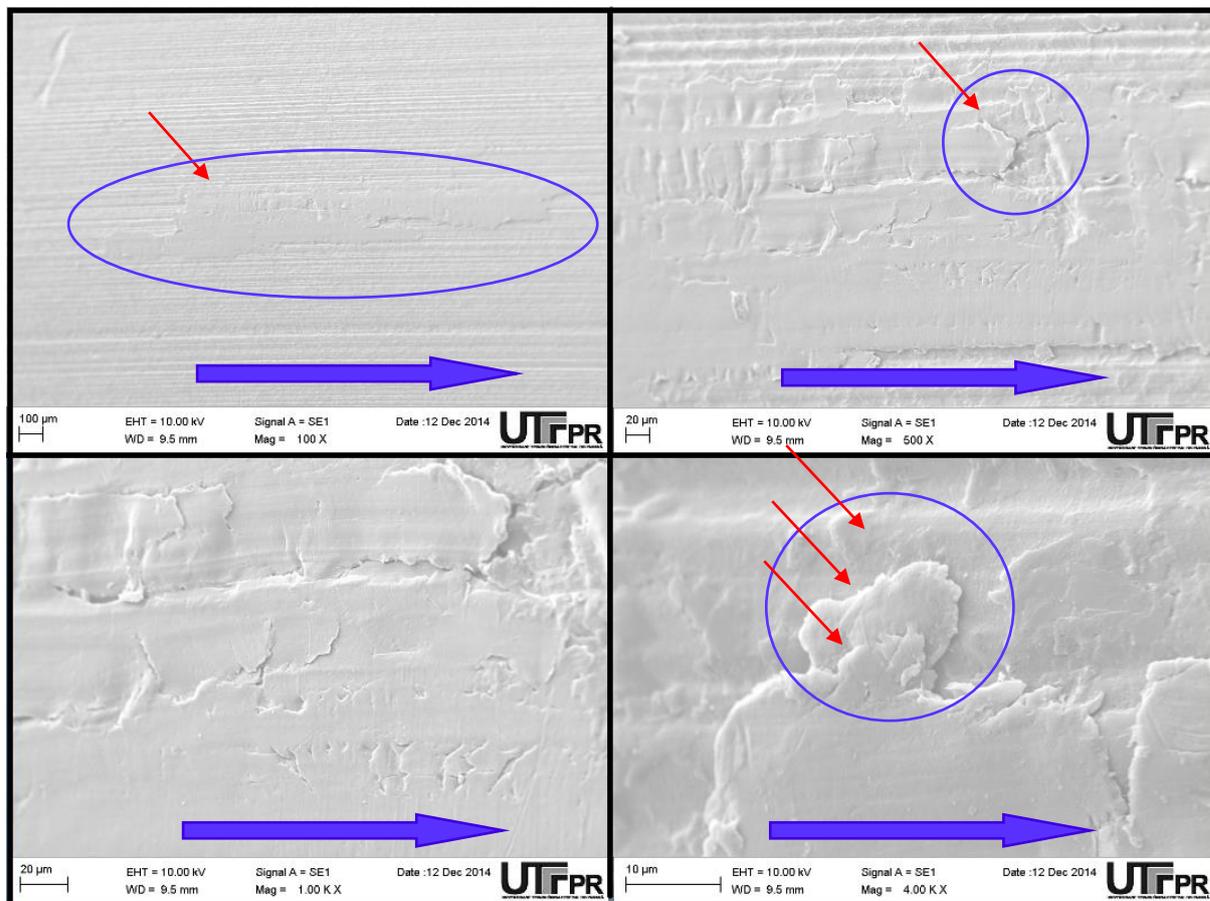
Os parâmetros para o PTFE com enchimento de grafite, comportaram-se de maneira semelhantes entre si. Verificou-se que para todos os parâmetros da condição 1 para a condição 2, houve um aumento, então da condição 2 à condição 4 houve gradativa baixa dos valores, onde a condição 4 mostrou valores dos parâmetros menores dentre todos. Da mesma maneira que para o PTFE com enchimento de bronze, o PTFE com enchimento de grafite, mostrou uma dispersão menor nas condições 1 e 2, e essa dispersão foi aumentada nas condições 3 e 4, fato esse verificado pelos desvios padrões calculados.

Então, tais parâmetros, cada um com sua particularidade de medida, mostrou o comportamento da topografia, tanto para o PTFE com enchimento de bronze, quanto para o PTFE com enchimento de grafite, e dessa maneira afirma-se que houve transferência de material, devido às alterações dos parâmetros.

**Tabela 4-7 - Valores dos parâmetros de rugosidade para o PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite, antes e após ensaios, para quatro condições de força normal**

Parâmetro	Material	Sem ensaiar	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Média
As	PTFE com bronze	4,3	2,54	2,145	2,195	3,341	2,6 ± 0,6
[µm]	PTFE com grafite	2,2	2,053	3,112	2,095	2,022	2,3 ± 0,5
Sq	PTFE com bronze	5,8	3,188	2,589	2,697	4,439	3,2 ± 0,9
[µm]	PTFE com grafite	2,8	2,405	3,916	2,496	2,399	2,8 ± 0,7
Sz	PTFE com bronze	44,2	17,61	13,7	14,84	30	19,0 ± 7,5
[µm]	PTFE com grafite	20,1	10,26	25,23	12,79	12,27	15,1 ± 6,8
Sp	PTFE com bronze	26,0	9,058	7,209	7,693	13,01	9,2 ± 2,6
[µm]	PTFE com grafite	9,3	6,42	12,05	6,302	5,974	7,7 ± 2,9

A Figura 4-21 mostra as camadas de filme aderido no corpo de PTFE com enchimento de grafite, isso ocorreu devido as ligações fracas desse material com o contra corpo de aço inoxidável, acarretando a sobreposição de camadas indicadas pelos círculos azuis, a qual se dá na direção do deslizamento entre as superfícies. Outra consequência devido aos filmes sobrepostos, foi a melhora do coeficiente de atrito discutido na seção 4.2.



**Figura 4-21 - Sobreposição de filme aderido no mancal de PTFE com enchimento de grafite após ensaio. Imagens obtidas por MEV (o sentido de deslizamento é indicado pelas setas azuis e sobreposição de filme indicado pelas setas vermelhas)**

## 5 CONCLUSÕES

Com a realização do presente trabalho, no qual avaliou-se o comportamento tribológico de PTFE com enchimento de bronze e PTFE com enchimento de grafite em deslizamento sem lubrificação contra o aço inoxidável AISI 304, através da realização de ensaios tipo mancal sobre eixo, com duração de 120 minutos e condição PV constante, concluiu-se que:

- O coeficiente de atrito estabilizou-se nos últimos 20 minutos de ensaio para os dois compostos de PTFE;
- Os compostos de PTFE com enchimento de bronze e grafite, afastaram-se da proporção de  $F_N^{-0,33}$  proposta por Archard (1957), devido à adição dos enchimentos, onde o PTFE com enchimento de bronze teve valor abaixo do PTFE puro e o PTFE com enchimento de grafite teve valor acima do PTFE puro;
- O coeficiente de atrito cinético do PTFE com enchimento de grafite apresentou o menor valor (0,25~0,18), condição atribuída à sua característica de material auto lubrificante, seguido do material de PTFE puro (0,30~0,20) e por fim pelo material de PTFE com enchimento de bronze (0,32~0,20);
- Com carga normal alta houve menor dispersão dos valores de temperatura no contato;
- Mantendo-se a condição PV constante, e aumentando a carga normal, o PTFE com enchimento de bronze teve a maior variação de temperatura;
- O modelo de Bhushan (2002) mostrou que para os compostos de PTFE, houve uma semelhança nos parâmetros avaliados, com algumas variações nos valores;
- As perdas mássicas durante os ensaios, não foram significativos para a balança utilizada, devido à incerteza de medição ser de 0,01g. Assim, os danos causados não chegaram a inutilizar os compostos de PTFE no seu uso como mancais de deslizamento;
- Nas imagens de microscópio óptico, verificou-se que a aderência do composto de PTFE com enchimento de bronze no aço inoxidável AISI

304 foi forte, diferentemente da aderência do composto de PTFE com grafite com o aço inoxidável AISI 304, que foi fraca, evidenciada pela descontinuidade de filme aderido e também pelo fato de que ocorreu sobreposição de camadas;

- Análises dos corpos de PTFE, tanto com enchimento de bronze, quanto com enchimento de grafite, feitas por IDLB e MEV, mostram que seus perfis de rugosidade adquirem o mesmo perfil que o contra corpo após os ensaios;
- Os valores dos parâmetros de rugosidade evidenciam que houve filme transferido para ambos os compostos, onde as alturas de picos foram aumentadas e diminuídas de uma condição para outra, de maneira não regular, assim afirmando a transferência de filme;
- Visando o custo, o mancal de PTFE com enchimento de bronze é aproximadamente 40% mais barato que o PTFE com enchimento de grafite.

Sabendo da complexidade do desenvolvimento de mancais de deslizamento e da importância que estes representam para indústria, torna-se cada vez mais necessário o estudo de novos compostos que sejam capazes de melhorar o desempenho tribológico, reduzir os custos de fabricação, manutenção e minimizar os impactos ambientais. Com isso, o presente trabalho mostra que os enchimentos de bronze ou grafite proporcionam um aumento significativo na vida útil em relação ao PTFE puro, tornando assim o material atrativo para aplicações em mancais de deslizamento.

## 6 REFERÊNCIAS

ANDERSON, B.S. "Company perspective in vehicle tribology – Volvo", In 17th Leeds-Lion Symposium on Tribology, Elsevier Science Pub Co, 1991.

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

ARCHARD, J. F. "Elastic deformation and the laws of friction". Proceedings of the Royal Society of London. v. 243, p.190-205, 1957.

ARCHARD, J. F.;HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions". Proceedings of the Royal Society of London. v. 236, p.397-410, 1956.

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

BHUSAN B., "Principles and Applications of Tribology", John Wiley,Canada, 1999.

BLAU, P. J. "Friction science and technology", Taylor &Francis Group, USA, 2009

BORESI, ARTHUR P.; SIDEBOTTOM, OMAR M. Advanced Mechanics of Materials. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1985.

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

CARDOSO, L. SUPREME LUBRIFICANTES. "Custos da Lubrificação." Disponível em: [http://www.supremelub.com.br/espaco\\_lubrificacao/noticias\\_detalhes.aspx?id=38](http://www.supremelub.com.br/espaco_lubrificacao/noticias_detalhes.aspx?id=38)>. Acessoem: 05 fev. 2012

CONTE, M.; GARTUA, A. "Study of PTFE composites tribological behavior." Wear. v. 296, p. 568-574, 2012.

DAVIDSON, A. "Handbook of Precision Engineering" - vol. 5. McGraw Hill, 1972.

DETTOGNI, M.A. "Principais mecanismos de desgaste e avaliação de diferentes ligas para corpos moedores". Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

ELSEVIER, pp. 1-6, citado por: Suski, C.A., 2004, "Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica à Frio", Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

EYRE, T.S. "WearCharacteristicsofMetals. TribologyInternational", p. 203-212, 1976.

FERNANDEZ, R. "Introducción a la tribología como ciencia". Departamento de Física de La Materia Condensada, 47.p 2006

FRENE J., NICOLAS D. e GODET M., "Hydrodynamic Lubrication, Bearings and Thrust Bearings", Elsevier, Netherlands, 1990.

GGB Bearing Technology. "Mastering Complex Bearing Technology." Industry&Engineering. 2010. Disponível em: < <http://www.ggbearings.com/pdf/5426-57.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

HARRIS, D.M.; HARIS, S.L. "Digital Design and Computer Architecture". San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2007.

HUTCHINGS, L. M. "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials." Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

INDUSTRY & ENGINNERING. "Mastering Complex Bearing Technology". 2010. Disponível em: < <http://www.ggbearings.com/pdf/5426-57.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

INES, UCS E SIMECS. “Desgaste por deslizamento de polímeros”, Instituto Nacional de engenharia de Superfícies. Disponível em <<http://pt.slideshare.net/Engenharia.de.Superficies/desgaste-por-deslizamento-de-polmeros?related=1>> junho, 2009.

JOST, H.P. “Lubrication (tribology) education and research, Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966.

KENNETH G. B., “Surface Engineering for Wear Resistance”, 1988, New Jersey

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

KRAGELSKY I. V., “Friction wear lubrication”, vol. 1, ed. Mir Publishers, Moscow, 1978.

KRIM J., “Rozamiento a escala atómica. Investigación y Ciencia”, Diciembre 1996.

KRICK, B. A.; EWIN, J. J.; BLACKMAN, G. S.; JUNK, C. P.; SAWYER, W. G. Environmental dependence of ultra-low wear behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) and alumina composites suggests tribochemical mechanisms. *Tribology International*. v. 51, p. 42-46, 2012.

LIU, P.; LU, R. HUANG, T.; CONG, P.; JIANG, S.; LI, T., “Tensile and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites”. *Wear*. v. 289, p. 65-72, 2006.

LIU, Y.; SCHAEFER, J. A., “The Sliding Friction of Thermoplastic Polymer Composites Tested at Low Speeds”. *Wear*. v. 261, p. 568-577, 2006.

MARX, S.; JUNGHANS, R., “Friction and Wear of Highly Stressed Thermoplastic Bearing Under Dry Sliding Conditions”. *Wear*. v. 193, p. 253-260, 1996.

MICROBON. Pasta Térmica a base de Prata TCG10. Disponível em: <[http://www.microbon.com.br/descri\\_tcg10.php](http://www.microbon.com.br/descri_tcg10.php)>, 2013.

MOURA, C. R. S.; CARRETEIRO, R. P., “Lubrificantes e lubrificação”. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1975

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. Rio de Janeiro: Bookman, 2003.

NUNES, R. A. X., “Abrasão, desgaste e atrito sob deslizamento de recobrimentos preparados por aspersão térmica a partir de PET pós-consumo”. Tese de doutorado. Rede Temática de engenharia de materiais (REDEMAT). Ouro Preto, Minas Gerais. 2008

PERSSON, B. N. J. “Sliding Friction. Surface Science Reports”. v. 33, p. 83-119, 1999.

RAE, P. J.; BROWN, E. N., “The Properties of Poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in Tension. Polymer”. v. 46, p. 8128-8140, 2005.

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

SINATORA, A. “Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte”, Prova de Erudição, São Paulo, 2005.

STACHOVIK, G. W.; BATCHELOR, A. W., “Engineering Tribology”. 3. ed. EUA: ButterworthHeinemann, 2001.

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

STOETERAU, R. I.; “Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas.” Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica, Disciplina de Projeto de Máquinas-Ferramentas – EMC 5325. 2004.

TERVOORT, T. A., VISJAGER, J. F., SMITH, P., “Melt-processable poly(tetrafluoroethylene) – compounding, fillers and dyes”. *Journal of Fluorine Chemistry*, 114, pp.133-137. 2002.

VALE, J. L., “Estudo do comportamento tribológico do politetrafluoretileno em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável”. Universidade tecnológica federal do paraná, campus de Curitiba, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica e de Materiais – ppgem. 2014.

VALE, J. L.; LEGROSKI, M.; SILVA, C. H. “Influência da Carga Normal e da Velocidade de Deslizamento no Coeficiente de Atrito Cinético e no Desgaste do Par Politetrafluoretileno (PTFE) Versus Aço Inoxidável”. I Congresso de Tecnologias, Engenharias e Ciências Exatas – I CONTECE. 2013.

VEIGA, J. C., “Juntas Industriais” 4ª edição, - Rio de Janeiro ,RJ – Abril 2003

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

ZUM-GAHR, K. H. “Microstructure and Wear of Materials” - Tribology Series, no.10 - Elsevier Science Publishers, p. 437-447, 1

## 7 ANEXO A

Anexo A para o certificado de matéria-prima do Aço Inox AISI 304, fornecido pela empresa Aceinox.



### CERTIFICADO DE QUALIDADE

CERTIFICADO Nº 2182

CLIENTE:GERMANO

DATA: 21/08/14

ITEM	CORRIDA	QUANT.	DIMENSOES	MATERIAL / LIGA	ACABAMENTO
01	13/1445	1	2000	BR REQ 304 L 1"	DEC
02					
03					

#### ANÁLISE QUÍMICA

ITEM	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Co	Cu	TI
01	0.030	1.710	0.440	0.037	0.016	16.090	8.050					
02												
03												

#### OBSERVAÇÕES

ITEM	
01	L.R. Mpa : 662.000 , L.E. Mpa : 362.000, Along : 50.000.
02	
03	

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

\_\_\_\_\_  
LOCAL E DATA

\_\_\_\_\_  
ASSINATURA

## 8 ANEXO B

Anexo B para o certificado de matéria-prima do PTFE, fornecido pela empresa FGM.



**FGM**  
Plásticos de Engenharia Ltda.

Rua: Terra Boa, 760 - Bairro Emília Perнета  
Pinhais - Paraná - Brasil  
Fone/Fax: (0xx41) 668 - 2663  
CNPJ: 79.961.116/0001-47 - Inscr. Est. 901.07.129-28  
Internet: www.fgmplasticos.com.br - e-mail: fgm@fgmplasticos.com.br

Pinhais, 29 de setembro de 2014.

### A/C Germano Wandembruck

**REF: CERTIFICADO DE QUALIDADE PTFE (TEFLON)**

Certificamos que o item a fiscal n. **9798 de 02/09/2014**, descrito como :

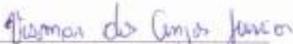
**Bastão PTFE + Bronze 032x0300mm**

Foi produzido com RESINA DE PTFE (POLITETRAFLUÓR ETILENO), com **40% de Bronze**, e esta em conformidade com os dados de nosso Catálogo Técnico, desta forma atestamos a Autenticidade e Qualidade da Matéria Prima.

PROPRIEDADES	METODO DE ENSAIO	UNIDADE	RESULTADO TESTES
SPECIFIC GRAVITY	IT 14 - 005	G/CM3	3,09
TENSILE STRENGTH/CD	IT 14 - 006	MPa	26,0
ELONGATION	IT 14 - 006	%	244
HARDNESS	IT 14 - 007	SHORE D	65
BULK DENSITY	IT 14 - 001	g/L	963
SHRINK DURING SINTERING	IT 14 - 004	%	1,7
FLOW	IT 14 - 001	g/50G	1,8

Sem mais para o momento ficamos ao seu inteiro dispor para o que se fizer necessário

Atenciosamente

  
 Vismar dos Anjos Junior

045/00-Adm./CQ - Certificado de Qualidade PTFE

**79961116/0001-47**  
 FGM - PLÁSTICOS DE  
 ENGENHARIA LTDA.  
 RUA TERTINA BOA, 760  
 GUILIANO PERNETA - CEP 83240-000  
 PINHAIS - PR



Plásticos de Engenharia Ltda

Rua: Terra Boa, 760 – Bairro Emiliano Perreto  
Pinhal – Paraná – Brasil

Fone/Fax: (0xx41) 668 – 2663

CNPJ: 79.961.116/0001-47 – Inscr. Est. 901.07.129-28

Internet: www.fgmplasticos.com.br – e-mail: fgm@fgmplasticos.com.br

Pinhal, 29 de setembro de 2014.

## A/C Germano Wandembruck

### REF: CERTIFICADO DE QUALIDADE PTFE (TEFLON)

Certificamos que o Item a fiscal n. **9798 de 02/09/2014**, descrito como :

**Bastão PTFE + Grafite 032x0300mm**

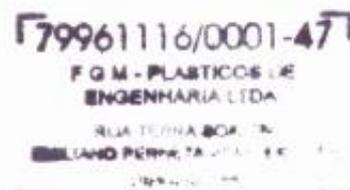
Foi produzido com RESINA DE PTFE (POLITETRAFLUÓR ETILENO), com **20% de Grafite**, e esta em conformidade com os dados de nosso Catálogo Técnico, desta forma atestamos a Autenticidade e Qualidade da Matéria Prima.

PROPRIEDADES	METODO DE ENSAIO	UNIDADE	RESULTADO TESTES
PESO ESPECÍFICO	IT 14 - 005	G/CM3	2,24
TEMPO DE REPTURA	IT 14 - 006	MPa	15,2
ELONGAÇÃO	IT 14 - 006	%	163
TRINCHA	IT 14 - 007	SHORE D	62
INCHAMENTO APÓS 24H	IT 14 - 001	g/l	644
COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE UMIDADE	IT 14 - 004	%	0,7
ELONG. POR TENSÃO	IT 14 - 001	g/100g	3,5

Sem mais para o momento ficamos ao seu inteiro dispor para o que se fizer necessário

Atenciosamente

  
Vismar dos Anjos Junior



045/00-Adm./CO - Certificado de Qualidade PTFE