

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DOS POLÍMEROS NBR, PTFE E PTFE
GRAFITADO EM CONTATO COM AÇO AISI 52100**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JANAINA SILVA DE SANTANA

**JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS
(Orientador)**

Natal, Outubro - 2009

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Santana, Janaina Silva de.

Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE gravitado em contato com aço AISI 52100 / Janaina Silva de Santana. – Natal, RN, 2009.

88 f. : il.

Orientador: João Telésforo Nóbrega de Medeiros.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Desgaste mecânico – Dissertação. 2. Tribologia – Dissertação. 3. Retentores – Dissertação. 4. Polímeros – Dissertação. I. Medeiros, João Telésforo Nóbrega de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 620.193.95(043.2)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DOS POLÍMEROS NBR, PTFE E PTFE
GRAFITADO EM CONTATO COM AÇO AISI 52100**

JANAINA SILVA DE SANTANA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

João Telésforo Nóbrega de Medeiros - Orientador

BANCA EXAMINADORA

Clodomiro Alves Júnior - Presidente

José de Anchieta Lima

Ademir Oliveira da Silva

João Bosco da Silva

À minha família, meus pais Antônio e Yolanda, e irmãos Marcos, Everton e Jaciana, meus alicerces, com os quais sempre encontrei amizade, carinho e apoio em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A todos que incentivaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. João Telésforo, pela orientação, paciência e estímulo à curiosidade científica.

Aos amigos que ensinaram e ajudaram a dar os primeiros passos no Grupo de Estudos de Tribologia (GET-UFRN), os Engenheiros Mecânicos Hugo e Marcelo Cabral e à Engenheira de Materiais Ruthilene Catarina.

Aos alunos integrantes e ex-integrantes do GET-UFRN e demais amigos, presentes em inúmeras fases desta caminhada.

À Frazão, técnico da Oficina Mecânica, pela colaboração nas etapas de confecção dos corpos-de-prova.

Aos Laboratórios de Metalografia, Metrologia e de Processamento de Materiais por Plasma da UFRN, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas indispensáveis a esta pesquisa.

Ao professor Ademir Oliveira, do Departamento de Química e integrante do GET, pela colaboração nas discussões das análises térmicas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa concedida.

Ao projeto PETROBRAS N° 0050.0013088.05.

Muito Obrigada.

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Abreviações

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivos geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Fundamentos Tribológicos	3
2.1.1 Teorias de Atrito.....	4
2.2 Topografia de Superfícies	5
2.3 Contato Mecânico.....	7
2.4 Desgaste	9
2.4.1 Adesão.....	11
2.4.2 Abrasão.....	12
2.4.3 Fadiga Superficial.....	13
2.4.4 Reação Triboquímica	14
2.5 Modelagem do Desgaste	14
2.6 Regimes de Lubrificação.....	16
2.7 Aspectos Tribológicos dos Polímeros.....	17
2.8 Principais Características dos Materiais em Estudo.....	20
2.8.1 Borracha Nitrílica (NBR)	20
2.8.2 Politetrafluoretileno (PTFE)	21
2.8.3 Politetrafluoretileno Grafitado (PTFE Grafitado)	22
2.8.4 AÇO AISI 52100	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 Materiais.....	24
3.2 Caracterização dos Materiais Poliméricos	24
3.2.1 Ensaio de Dureza.....	24

3.2.2	Análise Termogravimétrica (TG)	25
3.2.3	Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)	27
3.2.4	Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)	29
3.3	Caracterização do Material Metálico	31
3.3.1	Ensaio de Dureza	31
3.3.2	Análise Microestrutural	32
3.4	Preparação dos Corpos-de-Prova	32
3.5	Preparação dos Contracorpos	33
3.6	Pressão de Contato	34
3.7	Equipamento de Ensaio	35
3.8	Ensaio Tribológico	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	História Térmica Gerada nos Ensaio Tribológico	39
4.2	Morfologia Gerada nos Ensaio Tribológico	42
4.3	Pressão de Contato Inferior	55
4.6	Análise Comparativa da Taxa de Desgaste dos Polímeros	56
5	Conclusões	59
6	Sugestões	61
7	Referências Bibliográficas	62
	APÊNDICE A – Superfícies Poliméricas Desgastadas	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estudos de Leonardo da Vinci: (a) força de atrito entre superfícies horizontais e planos inclinados; (b) influência da área de contato aparente sob a força de atrito; (c) força de atrito em um plano horizontal por meio de roldana; (d) torque de atrito em uma seção semicircular (PERSSON, 2000)	3
Figura 2 – Diagrama esquemático ilustrando o modelo de Coulomb para o atrito <i>Apud</i> STOETERAU	4
Figura 3 – Desvios de forma superficiais, <i>apud</i> Medeiros (2002), definidos pela norma DIN 4760	6
Figura 4 – Vista esquemática da interface entre duas superfícies demonstrando a área real e a área aparente de contato	7
Figura 5 – Osculação ou geometria de interseção entre dois corpos sólidos, (a) contato conforme; (b) limiar entre contato conforme e não conforme; (c) contato não conforme (MEDEIROS, 2002)	9
Figura 6 – Classificação do desgaste através dos modos de desgaste. Baseado em ZUMGAHR (1987)	10
Figura 7 – Esquema indicando as regiões de interface e interfase formada após os mecanismos de (a) aderência e (b) adesão, respectivamente	11
Figura 8 – Esquema dos modos de desgaste abrasivo a dois-corpos (a) e a três-corpos (b), descritos por STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)	12
Figura 9 – Principais mecanismos de desgaste por abrasão: formação de proa (a), sulcamento (ploughing) (b) e fratura (c). Baseado em STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996	13
Figura 10 – Mecanismos de formação e propagação de trinca durante o processo de fadiga (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996)	14
Figura 11 – Carta de desgaste descrita por Ashby	15
Figura 12 – Regimes de lubrificação representado pela curva de Stibeck	17
Figura 13 – A origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica.	18
Figura 14 – Taxa de desgaste do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) deslizando contra aço em função da rugosidade superficial do aço..	20
Figura 15 – Esquema da cadeia polimérica (a), e estrutura cristalina e molecular (b) do PTFE (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996)	21

Figura 16 – Curva termogravimétrica do NBR	26
Figura 17 – Curva termogravimétrica do PTFE	26
Figura 18 – Curva termogravimétrica do PTFE grafitado	27
Figura 19 – Curva de calorimetria diferencial exploratória do NBR	28
Figura 20 – Curva de calorimetria diferencial exploratória do PTFE	28
Figura 21 – Curva de calorimetria diferencial exploratória do PTFE grafitado.....	29
Figura 22 – Curva de análise dinâmico-mecânica do NBR	30
Figura 23 – Curvas de análise dinâmico-mecânica para o PTFE.....	30
Figura 24 – Curvas de análise dinâmico-mecânica para o PTFE grafitado	31
Figura 25 – Microestrutura do aço AISI 52100 na condição recebida. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 400X.....	32
Figura 26 – Corpos-de-prova poliméricos de NBR, PTFE e PTFE grafitado.....	33
Figura 27 – Haste metálica subdividida em oito seções cilíndricas	33
Figura 28 – Irregularidades superficiais de um contracorpo obtidas por um rugosímetro para a verificação do acabamento especificado pela norma	34
Figura 29 – Pressão de contato superior, para uma carga de 3,15 N, em função do material dos corpos-de-prova	35
Figura 30 – Imagem do equipamento de ensaio tribológico e esquema do contato entre as superfícies.....	36
Figura 31 – Variação de temperatura <i>versus</i> distância de deslizamento em ensaios de abrasão a seco dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado (a); e detalhe do filme de NBR aderido à superfície do contracorpo metálico (b).....	40
Figura 32 – Variação de temperatura <i>versus</i> distância de deslizamento em ensaios de abrasão lubrificado (óleo SAE 15W40) e com mancais fixos dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado.	41
Figura 33 – Variação de temperatura <i>versus</i> distância de deslizamento em ensaios de abrasão a seco e com mancais livres dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado.....	41
Figura 34 – Variação de temperatura <i>versus</i> distância de deslizamento em ensaios de abrasão lubrificado (óleo SAE 15W40) e com mancais livres dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado.....	42
Figura 35 – Imagem da superfície de NBR desgastada no ensaio a seco e com mancais fixos.	43
Figura 36 – Imagem da superfície desgastada de NBR após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais fixos.	44

Figura 37 – Imagem das superfícies de NBR após ensaios de desgaste a seco e com mancais livres.....	45
Figura 38 – Imagem da superfície desgastada de NBR após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais livres.....	46
Figura 39 – Imagem da superfície de PTFE desgastada no ensaio a seco e com mancais fixos (a – c), e microanálise por EDS (d)	47
Figura 40 – Imagem das superfícies de PTFE após ensaios de desgaste a seco e com mancais livres.....	48
Figura 41 – Imagem da superfície desgastada de PTFE após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais livres.	49
Figura 42 – Imagem das superfícies de PTFE grafitado após ensaios de desgaste a seco e com mancais fixos.	50
Figura 43 – Imagem da superfície desgastada de PTFE grafitado após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais fixos....	51
Figura 44 – Imagem das superfícies de PTFE grafitado após ensaios de desgaste a seco e com mancais livres.....	52
Figura 45 – Imagem da superfície desgastada de PTFE grafitado após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais livres....	53
Figura 46 – Pressão de contato inferior, dos ensaios realizados com mancais fixos e carga de 3,15 N, em função do material dos corpos-de-prova.....	56
Figura 47 – Pressão de contato inferior, dos ensaios realizados com mancais livres e carga de 3,15 N, em função do material dos corpos-de-prova.....	56
Figura 48 – Taxa de desgaste dos polímeros após ensaios com mancais fixos sob condições de deslizamento seco e lubrificado.....	57
Figura 49 – Taxa de desgaste dos polímeros após ensaios com mancais livres sob condições de deslizamento seco e lubrificado.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do Aço AISI 52100, <i>apud</i> VERÁSTEGUI (2007)	23
Tabela 2 – Valores de dureza Shore A e Rockwell E dos polímeros utilizados	25
Tabela 3 – Valor de dureza Rockwell C do aço utilizado	32
Tabela 4 – Esquematização dos ensaios de abrasão	37
Tabela 5 – Seqüência do procedimento experimental adotado	38
Tabela 6 – Resumo das principais características morfológicas encontradas nas superfícies de NBR e PTFE.....	54
Tabela 7 – Resumo das principais características morfológicas encontradas nas superfícies de PTFE Grafitado.	55
Tabela 8 – Módulo de elasticidade dos polímeros em função da temperatura média de ensaio.	58
Tabela 9 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais fixos nas condições de ensaio a seco	67
Tabela 10 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais fixos e condições de deslizamento a seco.	68
Tabela 11 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais fixos nas condições de ensaio lubrificado	69
Tabela 12 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais fixos e condições de deslizamento lubrificado.....	70
Tabela 13 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais livres nas condições de ensaio a seco	71
Tabela 14 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais livres e condições de deslizamento a seco o	72
Tabela 15 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais livres nas condições de ensaio lubrificado.....	73
Tabela 16 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais livres e condições de deslizamento lubrificado	74

SÍMBOLOS

a	Raio do contato
E	Módulo de elasticidade
E'	Módulo de elasticidade composto
H	Dureza do material
K	Coefficiente de desgaste adimensional
k	Curvatura da ponta das asperezas
k_d	Coefficiente de desgaste dimensional
N	Carga normal utilizada na equação de Hertz
p	Pressão de contato
$p_{máx.}$	Pressão de contato máxima (superior)
$p_{min.}$	Pressão de contato mínima (inferior)
$p_s.$	Pressão de Shakedown
Q	Volume desgastado por distância de deslizamento
r	Raio das asperezas
T_a	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura próxima do contato
W	Carga normal utilizada na equação de desgaste de Archard
β^*	Distância de correlação da superfície
λ	Razão entre a espessura de filme lubrificante e a rugosidade média do material
μ	Coefficiente de atrito
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Valor RMS da rugosidade superficial
σ^*	Desvio padrão da distribuição Gaussiana da altura das asperezas
ψ	Índice de plasticidade de Greenwood e Williamson
ψ^*	Índice de plasticidade de Whitehouse e Archard
ψ_s	Índice de plasticidade de Bower e Johnson
$\Delta\theta$	Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de contato

ABREVIACOES

AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B-J	Bower e Johnson
DMA	Análise Dinâmico-Mecânica
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DIN	Deutsches Institut für Normung
G-W	Greenwood e Williamson
HRE	Dureza Rockwell E
MEV	Microscópio Eletrnico de Varredura
MO	Microscópio ptico
NBR	Borracha nitrílica
PTFE	Politetrafluoretileno
PTFE –G	Politetrafluoretileno grafitado
Ra	Rugosidade Média Aritmética
SAE	Society of Automotive Engineers
SiC	Carboneto de Silício
Sh A	Dureza Shore A
TG	Análise Termogravimétrica
UHMWPE	Polietileno de ultra-alto peso molecular
W-A	Whitehouse e Archard

RESUMO

Retentores de baixo custo são comercialmente disponíveis de NBR, copolímeros insaturados de borrachas de nitrilo-butadieno que são mais resistentes aos óleos quanto mais altos forem seus teores de nitrila, à custa de uma menor flexibilidade. Em Engenharia de Petróleo, o desgaste dos retentores de NBR causa vazamento de fluidos e danos ambientais, provocando uma crescente demanda de conhecimento acadêmico sobre materiais poliméricos candidatos a retentor submetidos a contatos de deslizamento com superfícies de metal. Este trabalho objetivou avaliar respostas tribológicas de três polímeros comercialmente disponíveis, NBR, dureza 73 ± 5 Sh A, polytetrafluoroethylene (PTFE), dureza 60 ± 4 HRE e PTFE com grafite, 68 ± 6 HRE. Os ensaios foram realizados em um tribômetro de deslizamento concebido para explorar o desempenho tribológico de corpos-de-prova poliméricos estacionários de superfície plana submetidos a um contato seco ou lubrificado (óleo SAE 15W40) de uma superfície rotativa cilíndrica de aço 52100, dureza 20 ± 1 HRC. A carga normal, a velocidade relativa e a distância de deslizamento foram, respectivamente, 3,15 N, 0,8 m/s e 3,2 km, determinadas após ensaios exploratórios iniciais. As temperaturas foram medidas por dois termopares tipo K a $3,0 \pm 0,5$ mm e 750 ± 50 mm de distância do contato para avaliar-se o aquecimento em uma mesma região devido ao atrito de deslizamento no contato. Os polímeros foram caracterizados através de Análises Termogravimétricas (TGA), Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) e Análises Dinâmico-Mecânica (DMA). Os mecanismos de desgaste das superfícies dos polímeros foram analisados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X). NBR apresentou os maiores valores de aquecimento, sugerindo maior atrito de deslizamento. PTFE e PTFE grafitado apresentaram um menor aquecimento, atribuído ao mecanismo de desgaste por delaminação.

Palavras-chave: Tribologia, Polímeros, Desgaste, Retentores, PTFE, NBR, PTFE grafitado, Aço AISI 52100.

ABSTRACT

Low cost seals are made of NBR, Nitrile Butadiene Rubber, a family of unsaturated copolymers that is higher resistant to oils the more content of nitrile have in its composition, although lower its flexibility. In Petroleum Engineering, NBR seal wear can cause fluid leakage and environmental damages, promoting an increasing demand for academic knowledge about polymeric materials candidate to seals submitted to sliding contacts to metal surfaces. This investigation aimed to evaluate tribological responses of a commercial NBR, hardness 73 ± 5 Sh A, polytetrafluoroethylene (PTFE), hardness 60 ± 4 HRE and PTFE with graphite, 68 ± 6 HRE. The testings were performed on a sliding tribometer conceived to explore the tribological performance of stationary polymer plane coupons submitted to rotational cylinder contact surface of steel AISI 52100, 20 ± 1 HRC Hardness, under dry and lubricated (oil SAE 15W40) conditions. After screening testings, the normal load, relative velocity and sliding distance were 3.15 N, 0.8 m/s and 3.2 km, respectively. The temperatures were collected over distances of 3.0 ± 0.5 mm and 750 ± 50 mm far from the contact to evaluate the heating in this referential zone due to contact sliding friction by two thermocouples K type. The polymers were characterized through Thermogravimetric Analysis (TGA), Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Dynamic Mechanical Analysis (DMA). The wear mechanisms of the polymer surfaces were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy). NBR referred to the higher values of heating, suggesting higher sliding friction. PTFE and PTFE with graphite showed lower heating, attributed to the delamination mechanism.

Keywords: Tribology, Polymers, Wear, Seals, PTFE, NBR, PTFE-graphite, AISI 52100 Steel

1. Introdução

Os avanços e difusão da tecnologia no mundo trazem diversas vantagens para o setor produtivo industrial como, por exemplo, nas áreas de controle de processos e manutenção. Entretanto, inúmeros problemas relacionados às falhas e/ou paradas de máquinas são provenientes da interação das peças em movimento, ou seja, da interação entre as superfícies.

Deve-se perceber que praticamente todos os mecanismos desenvolvidos pelo homem funcionam quase sempre como o resultado do movimento relativo entre as superfícies e que os problemas provenientes destes sistemas são geralmente tribológicos. A tribologia é um campo da ciência que aplica uma análise operacional para problemas de grande significância econômica tal como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos que abrangem desde aparelhos domésticos às naves espaciais.

O atrito promove desgaste e dissipação de energia e, é considerado como fonte principal de desperdício de materiais e perda de desempenho mecânico. Logo, o controle do atrito pode resultar em economias consideráveis nos mais diversos setores industriais. A lubrificação é um meio efetivo de controlar o desgaste e reduzir o atrito.

As atividades de extração de petróleo exigem um controle elevado das variadas etapas deste processo. Uma delas consiste em manter o sistema de vedação, permitindo a manutenção da integridade do meio ambiente. Alguns destes sistemas apresentam vazamentos decorrentes do desgaste do selo de vedação (gaxeta), o qual está posicionado entre uma haste metálica e um porta gaxeta (stuffing box).

A Borracha Nitrílica (NBR) é tradicionalmente utilizada como selo de vedação, entretanto, este material vem disputando espaço diante do vasto número de polímeros com propriedades mecânicas apropriadas para tal aplicação. Cada vez mais, pesquisadores vêm estudando a adição de cargas aos materiais poliméricos com a finalidade de melhorar a qualidade dos produtos.

No presente trabalho é analisado o comportamento tribológico de polímeros aplicados em selos de vedação em unidades de bombeio de petróleo, bem como dos possíveis materiais poliméricos que poderão atuar como alternativas para determinadas condições de uso e especificação de poços.

A hipótese deste trabalho é de que *“A transição de um contato rotativo seco ou lubrificado não-conforme para conforme de polímeros-metal associa pressões de contato de*

Hertz, mecanismos e taxas de desgaste, rigidez do contato e taxas de aquecimento diferenciados aos diferentes pares tribológicos”.

Além desta introdução, o presente trabalho está subdividido em sete Capítulos, um apêndice e dois anexos. O Capítulo 2 apresenta uma **Revisão Bibliográfica** dos conceitos tribológicos e sua atuação em sistemas poliméricos. No Capítulo 3 são apresentados os **Materiais e Métodos** utilizados no desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 são apresentados os **Resultados e Discussão** dos ensaios tribológicos realizados. Nos Capítulos 5 e 6 são apresentados, respectivamente, as **Conclusões** e as **Sugestões** de trabalhos futuros. O capítulo 7 compreende a **Bibliografia** citada ao longo do trabalho. O **Apêndice A** é composto pelas imagens das superfícies poliméricas desgastadas.

1.1 Objetivos:

1.1.1 Objetivo geral:

Avaliar comparativamente o desgaste, durante uma vida pré-definida, de superfícies planas de diferentes polímeros, nas condições seca e lubrificada, submetidas ao contato com um eixo-árvore rotativo cilíndrico de aço apoiado em dois mancais, fixos ou livres.

1.1.2 Objetivos específicos:

1. Realizar ensaios de abrasão de três pares tribológicos na configuração superfície plana estacionária de polímero/cilindro rotativo de aço apoiado em dois mancais, nas condições fixas ou livres;
2. Antes dos ensaios, caracterizar analítica e dinamicamente algumas propriedades dos polímeros ensaiados, além da sua dureza;
3. Durante os ensaios, quantificar o aquecimento a $3\pm 0,3$ mm da zona de contato e analisar comparativamente as semelhanças e diferenças nas respostas térmicas;
4. Após os ensaios, identificar por microscopia, variação de massa e geometria, os mecanismos de desgaste dos polímeros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos Tribológicos

A tribologia é definida como a ciência e tecnologia que trata do estudo da interação das superfícies em movimento relativo. Esta interação proporciona a atuação do atrito (do grego – *tribus*) que com o passar do tempo promove o desgaste das superfícies em contato. Em alguns casos, a utilização de lubrificantes reduz o atrito e conseqüentemente proporcionam uma maior durabilidade das superfícies devido à redução do desgaste (HUTCHINGS, 1992).

O estudo científico da tribologia data um longo histórico e tem Leonardo da Vinci como um dos precursores da investigação de um dos seus princípios fundamentais – o atrito.

A figura 1 ilustra os estudos de Leonardo da Vinci sobre a força de atrito entre superfícies horizontais e inclinadas, bem como o seu interesse pelos estudos da influência da área de contato aparente na resistência ao atrito (PERSSON, 2000).

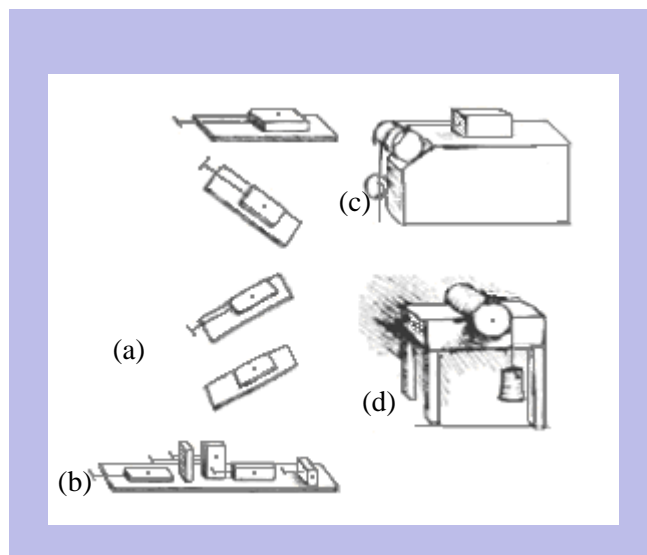


Figura 1 – Estudos de Leonardo da Vinci: (a) força de atrito entre superfícies horizontais e planos inclinados; (b) influência da área de contato aparente sob a força de atrito; (c) força de atrito em um plano horizontal por meio de roldana; (d) torque de atrito em uma seção semicircular (PERSSON, 2000).

Embora Leonardo da Vinci tenha sido o primeiro a descrever o atrito, apenas 200 anos depois, em 1699, Amontons redescobriu e publicou as Leis de Atrito de Deslizamento, as quais afirmavam que:

- A força de atrito é proporcional à carga normal;
- A força de atrito é independente da área de contato aparente.

Em 1785 Coulomb propôs a terceira Lei afirmando que a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento (HUTCHINGS, 1992; ROTTLE e ROBBINS, 2005).

Estudos recentes mostram que o atrito cinético geralmente varia logarithmicamente com a velocidade em vez de ser estritamente constante (ROTTLE e ROBBINS, 2005).

2.1.1 Teorias de Atrito

Segundo Amontons e Coulomb a maior contribuição da força de atrito surge das interações mecânicas entre as deformações rígidas ou elásticas das asperezas. A figura 2 representa o modelo de atrito geralmente denominado de *modelo de Coulomb*. Neste modelo, a ação das asperezas em forma de dentes de serra promove a separação das superfícies quando elas deslizam da posição A para a posição B, nesta fase do movimento o trabalho feito pela força de atrito contra a carga normal é μ , ou seja, $\tan \theta$. Na próxima fase do movimento, da posição B para a posição C, percebe-se que o modelo falha, uma vez que a carga normal realiza trabalho no sistema e toda energia potencial armazenada na primeira fase é recuperada. Portanto, não ocorre dissipação de energia no ciclo completo (HUTCHINGS, 1992).

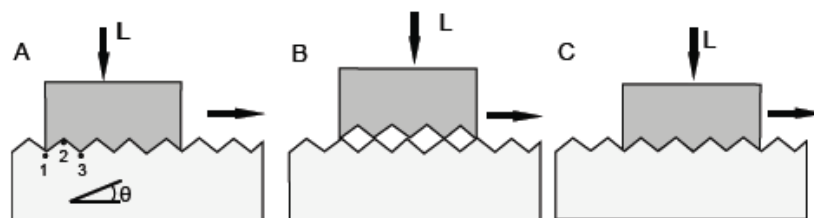


Figura 2 – Diagrama esquemático ilustrando o modelo de Coulomb para o atrito *apud* STOETERAU.

No modelo de atrito de deslizamento desenvolvido por Bowden e Tabor assume-se que a força de atrito é composta por duas componentes: uma *força de adesão* e uma *força de*

deformação necessária para promover o sulcamento das asperezas de uma superfície dura em uma superfície macia (HUTCHINGS, 1992).

Em escala microscópica todas as superfícies são rugosas, logo a proximidade das asperezas de duas superfícies promove interações físicas ou químicas resultando em contato adesivo (junção das asperezas). Quando estas duas superfícies apresentam movimento relativo, a formação e a ruptura das junções são governadas por uma força lateral denominada de *força de atrito de adesão* (BHUSHAN, 2000; MYSHKIN *et al.*, 2005).

2.2 Topografia de Superfícies

As superfícies dos sólidos apresentam uma variedade de defeitos e distorções as quais se estendem desde o volume da superfície às irregularidades microscópicas local exercendo forte influência no atrito e no desgaste (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

Segundo BHUSHAN (2000), independentes do método de produção, as superfícies contêm irregularidades de várias ordens de grandeza e estas vão desde desvios de forma às irregularidades da ordem de distância interatômica.

ZUM-GAHR (1987) descreve que a textura característica de uma superfície é descrita pelo arranjo, forma e tamanho dos elementos individuais, tais como as asperezas (picos e vales em uma escala microscópica).

De maneira geral, as superfícies de engenharia são compostas por picos e vales com amplitude típica de um micrometro, formando assim o que é chamado de *rugosidade superficial* (HUTCHINGS, 1992).

Segundo BET (1999), a norma DIN 4760 apresenta os desvios de primeira a sexta ordem e suas principais fontes geradoras. Estes desvios, embora com características distintas, não se encontram nitidamente separados, de fato, eles se sobrepõem formando o perfil completo.

O atrito de deslizamento para corpos macroscópicos é aproximadamente independente da natureza da rugosidade da superfície, a menos que estas sejam muito rugosas ou muito macias. Para rugosidades elevadas, as asperezas da superfície podem provocar um aumento do atrito. Para superfícies muito limpas e macias a aderência pode levar a um aumento da área de contato e conseqüentemente a um aumento do atrito (PERSSON, 2000).






DESVIOS DE FORMA (representados por uma seção do perfil)		EXEMPLOS DE TIPOS DE DESVIOS	EXEMPLOS DE CAUSAS GERADORAS DOS DESVIOS DE FORMA
 1ª Ordem	FORMA	Planicidade Cilindricidade Retilidade	Defeitos nas guias da máquina ferramenta, deformação por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça, deformações devido ao tratamento térmico, desgaste nas guias da peça
 2ª Ordem	ONDULAÇÃO	Ondas	Fixação excentrica ou defeito de forma de uma fresa, fixação excentrica da peça, vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça, deflexão da peça ou da máquina durante a usinagem, tratamento térmico, tensões residuais de fundição ou forjamento
 3ª Ordem	RUGOSIDADE	Ranhuras ou raios	Forma da ferramenta (gumes e raio de quina), avanço ou profundidade de corte
 4ª Ordem		Estrias Escamas Protuberâncias	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço), deformação do material com jato de areia, formação de crateras e de protuberâncias após tratamento galvânico
5ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica		Microestrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ataque químico (ex. decapagem), corrosão
6ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica		Reticulado cristalino do material	Processos físicos e químicos da estrutura da matéria, tensões de cisalhamento na estrutura reticular do material
		Superposição dos desvios de primeira à quarta ordem	

Figura 3 – Desvios de forma superficiais, *apud* Medeiros (2002), definidos pela norma DIN 4760.

2.3 Contato Mecânico

Quando duas superfícies nominalmente planas e paralelas são colocadas suavemente juntas, o contato ocorre macroscopicamente em toda a superfície, entretanto, o mesmo é geralmente discreto devido à rugosidade ocorrendo inicialmente em apenas poucos pontos. Estas regiões de contato pontual são referidas como *junções*, e a soma de todas as junções é denominada de área real de contato. Com o aumento da carga normal ocorre uma aproximação maior das superfícies e um grande número das asperezas entra em contato (HUTCHINGS, 1992; PERSON, 2000; ZUM-GAHR, 1987).

A figura 4 ilustra os contatos pontuais (ou junções) referentes à área real de contato e demonstra que a mesma é, em geral, muito menor que a área de contato aparente (BHUSHAN, 2000; TOMANIK, 2000).

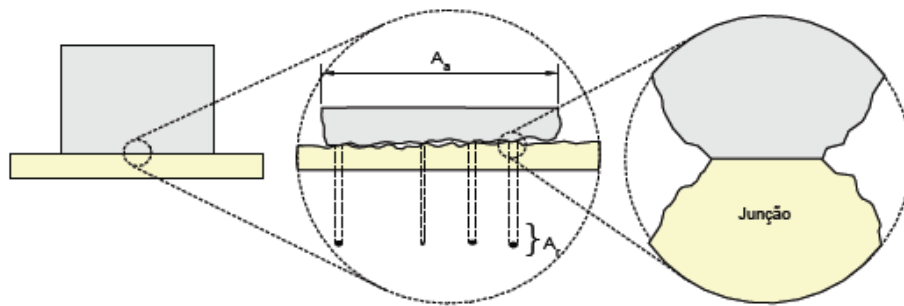


Figura 4 – Vista esquemática da interface entre duas superfícies demonstrando a área real e a área aparente de contato.

Segundo ZUM-GAHR (1987), o atrito e o desgaste de duas superfícies sólidas em contato não lubrificadas dependem do tipo de deformação das asperezas envolvidas. De acordo com HUTCHINGS (1992) e BRISCOE *et al.* (1998), a teoria de Greenwood e Williamson, descrita para contatos elásticos, propõe um índice de plasticidade ψ (modelo G-W), que descreve as transições da deformação elástica para plástica das asperezas de uma superfície quando esta experimenta tensões e deformações externas.

$$\psi = \frac{E^i}{H} \left(\frac{\sigma^*}{r} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Com

$$E^i = \frac{E_1 E_2}{E_2(1 - \nu_1^2) + E_1(1 - \nu_2^2)} \quad (2.2)$$

Onde H é a dureza do material mais mole, E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade, ν_1 e ν_2 a razão de Poisson de dois corpos em contato, r é o raio do cume das asperezas (assumindo como sendo o mesmo para todas as asperezas) e σ^* é o desvio padrão da distribuição Gaussiana da altura das asperezas (HUTCHINGS, 1992; ZUM-GAHR, 1987).

Whitehouse e Archard introduziram um índice de plasticidade mais geral ψ^* (modelo W-A), que admite a distribuição de curvatura dos picos das asperezas.

$$\psi^* = \frac{E^i}{H} \left(\frac{\sigma}{\beta^*} \right) \quad (2.3)$$

Onde E^i pode ser calculado a partir da equação (2.2); σ é o valor RMS da rugosidade superficial e β^* está relacionado à distância de correlação da superfície (ZUM-GAHR, 1987).

O índice de plasticidade ψ_s para um deslizamento repetido, desenvolvido por Bower e Johnson (modelo B-J), é similar ao índice de plasticidade ψ para o contato estático, a única diferença está na dureza da indentação H que é substituída pela pressão de shakedown.

$$\psi_s = \frac{E^i}{p_s} (\sigma k)^{0,5} \quad (2.4)$$

Onde E^i é o módulo de elasticidade composto, p_s é a pressão de Shakedown da superfície macia; σ é o valor RMS da rugosidade superficial e k é a curvatura da ponta das asperezas da superfície dura.

Se ψ e $\psi^* < 0.6$ o contato é predominantemente elástico, entretanto, se ψ e $\psi^* > 1$ a deformação plástica domina. No modelo B-J para valores de $\psi_s < 1$ a taxa de desgaste é insignificante, e com o aumento de ψ_s de 1.0 para 3.5 o coeficiente de desgaste aumenta em várias ordens de magnitude (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

As superfícies metálicas, produzidas por métodos de engenharia convencionais, apresentam valores de ψ entre 0.1 e 100. Para cerâmicas e polímeros, entretanto, o contato é provavelmente elástico e o fator E/H é geralmente um décimo do apresentado pelos metais, levando a uma redução proporcional no valor de ψ . (HUTCHINGS, 1992; ZUM-GAHR, 1987).

Na visão de Da Vinci, o contato mecânico é definido em função da osculação (fig. 5) ou geometria da interseção entre dois corpos sólidos (MEDEIROS, 2000).

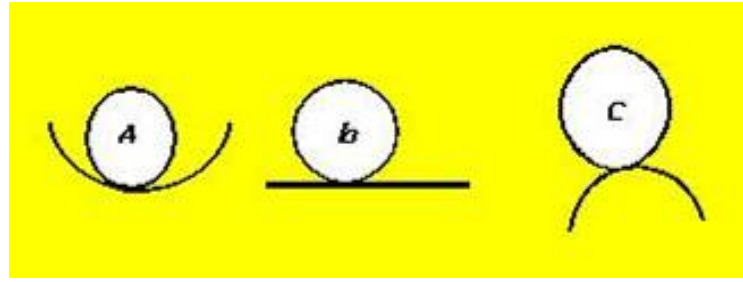


Figura 5 – Osculação ou geometria de interseção entre dois corpos sólidos, (a) contato conforme; (b) limiar entre contato conforme e não conforme; (c) contato não conforme (MEDEIROS, 2002).

A modelagem do contato entre duas superfícies estáticas não-conformes comprimidas e sem atrito, desenvolvida por Hertz (1882), demonstrou matematicamente que a pressão de contato p assume a forma de um potencial de campo elástico com fronteira bem definida. Dentro desse campo, as tensões associam-se às deformações elásticas (MEDEIROS, 2002).

MEDEIROS (2002) *apud* LIMA DA SILVA (2006), afirma que a pressão máxima de Hertz para o contato entre duas esferas pode ser calculada a partir da equação 2.5.

$$N = \frac{2}{3} \pi \cdot a^2 \cdot p_{m\acute{a}x} \quad (2.5)$$

Onde: N é a carga normal aplicada;

$\pi \cdot a^2$ é a área de contato.

2.4 Desgaste

Segundo ZUM-GAHR (1987), a norma DIN 50320 define desgaste como sendo a perda progressiva do material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, o contato e o movimento relativo contra um contracorpo sólido, líquido ou gasoso.

A redução da eficiência de operação e mudanças dimensionais de componentes ou danos superficiais devido ao desgaste pode causar problemas secundários como vibração e desalinhamento (ZUM-GAHR, 1987).

O desgaste pode ser classificado como *moderado* ou *severo*. O primeiro é caracterizado por uma superfície macia e resulta em *debris*, da ordem de alguns nanômetros. De outra forma, no desgaste severo as superfícies são seriamente deformadas e os *debris* consistem de partículas da ordem de cem micrometros (RAMALHO e MIRANDA, 2006).

A classificação mais tradicional do desgaste é baseada no tipo de movimento relativo ou no tipo dos mecanismos de desgaste (RAMALHO e MIRANDA, 2006).

A figura 6 apresenta esquematicamente os diferentes tipos de ação na superfície de um corpo sólido, descritos por ZUM-GAHR (1987) e menciona a existência de cinco tipos de *movimento relativo*, são eles: *deslizamento*, *rolamento*, *oscilação*, *impacto* e *fluxo*. HUTCHINGS (1992) afirma que o deslizamento e o rolamento são os mais importantes e enfatiza que em um rolamento aparentemente puro quase sempre envolve algum deslizamento, ou seja, essas duas classes de movimento não ocorrem de forma isolada.

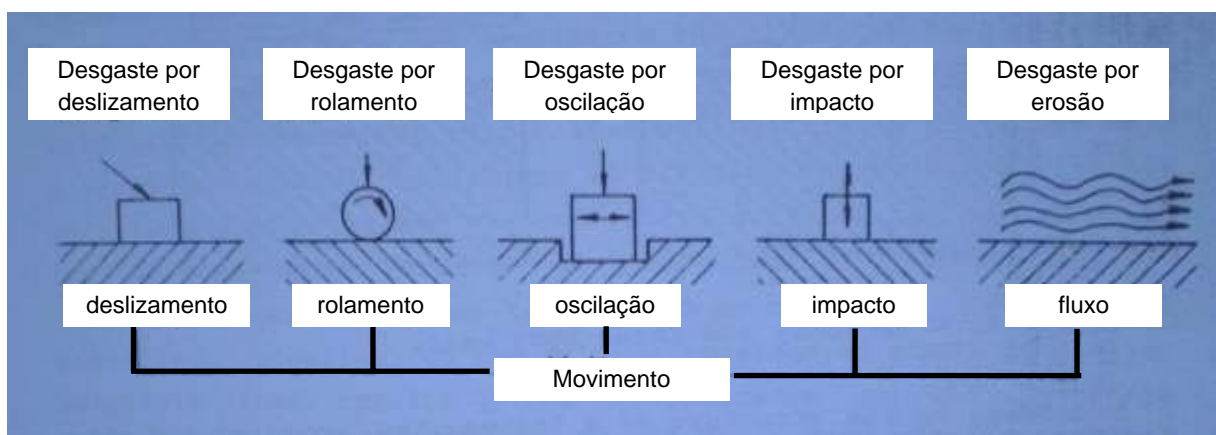


Figura 6 – Classificação do desgaste através dos modos de desgaste. Baseado em ZUM-GAHR (1987).

De acordo com a norma DIN 50320 *apud* ZUM-GAHR (1987), os *mecanismos de desgaste* são agrupados em quatro tipos principais:

1. *Adesão* – que promove ligação e quebra de ligação adesiva interfacial;
2. *Abrasão* – promove remoção de material devido ao riscamento ou scratching;
3. *Fadiga superficial* – fadiga e formação de trinca na região superficial devido a tensões cíclicas tribológicas que resultam na separação de material;
4. *Reação triboquímica* – formação de produtos de reação química como um resultado de interações químicas entre os elementos de um tribosistema iniciados pela ação tribológica.

2.4.1 Adesão

Segundo MYSKIN *et al*, (2005), quando duas superfícies estão em contato as forças superficiais de atração e repulsão atuam entre átomos e moléculas das duas superfícies.

A adesão interfacial pode ocorrer devido às ligações iônica, covalente, metálica, hidrogênio e/ou van der Waals. A adesão é favorecida pela deformação plástica e pela limpeza, este é o processo pelo qual as asperezas das superfícies em contato formam as junções adesivas. Estas junções aumentam em tamanho pela deformação plástica com o movimento contínuo. A ruptura das junções geralmente leva a transferência de material de uma superfície para outra (ZUM-GAHR, 1987).

De acordo com DARQUE-CERETTI (1997) *apud* MEDEIROS (2002), o termo *adhesion* é muitas vezes empregado sem que se faça distinção entre *adesão* e *aderência*.

Segundo este autor, a adesão é um fenômeno de atração entre dois corpos limitado às interações eletromagnéticas e que pode ser explicado pela físico-química; enquanto a aderência corresponde a dificuldade de separação entre dois corpos.

A ruptura entre dois corpos A e B, produzida por ensaios de aderência, depende da escala observada e pode ser *coesiva* ou *interfacial*. A ruptura coesiva ocorre na *interfase*, ou seja, na região onde as propriedades físico-químicas e mecânicas são diferentes de A e B (região C). Na ruptura interfacial (ou adesiva) este fenômeno ocorre na *interface*, e desta forma, após a ruptura não há resíduos de A sobre B, nem de B sobre A (MEDEIROS, 2002). A figura 7 esquematiza as regiões formadas entre duas superfícies após os mecanismos de aderência e adesão.

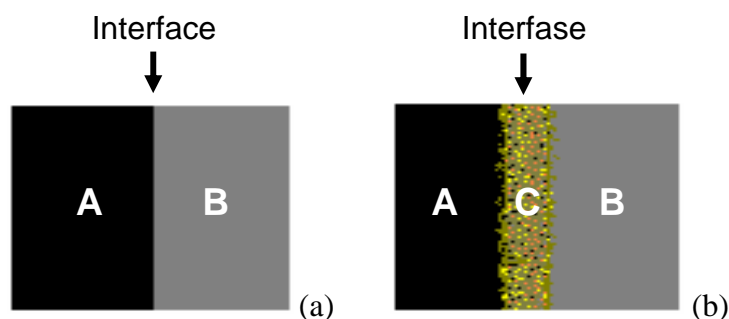


Figura 7 – Esquema indicando as regiões de interface e interfase formada após os mecanismos de (a) aderência e (b) adesão, respectivamente.

2.4.2 Abrasão

O desgaste abrasivo é definido por HUTCHINGS (1992) como sendo o deslocamento ou remoção de material de uma superfície através de partículas duras ou através de protuberâncias duras de um contracorpo deslizando ao longo de uma superfície.

A abrasão é geralmente causada por partículas que estão juntas e embutidas em alguma superfície oposta, ou por partículas que estão deslizando ou rolando entre duas superfícies (NEALE, 1995).

A maneira com que os grãos passam sobre a superfície desgastada determina a natureza do desgaste abrasivo podendo ser denominado de desgaste abrasivo a dois ou três corpos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

Através da figura 8, STACHOWIAK e BATCHELOR (1996) exemplificam a abrasão a dois corpos através da passagem de uma lixa sobre uma superfície, onde as asperezas duras ou grãos, que estão rigidamente presos, passam sobre a superfície como uma ferramenta de corte. Na abrasão a três corpos o grão está livre para rolar e deslizar sobre a superfície.

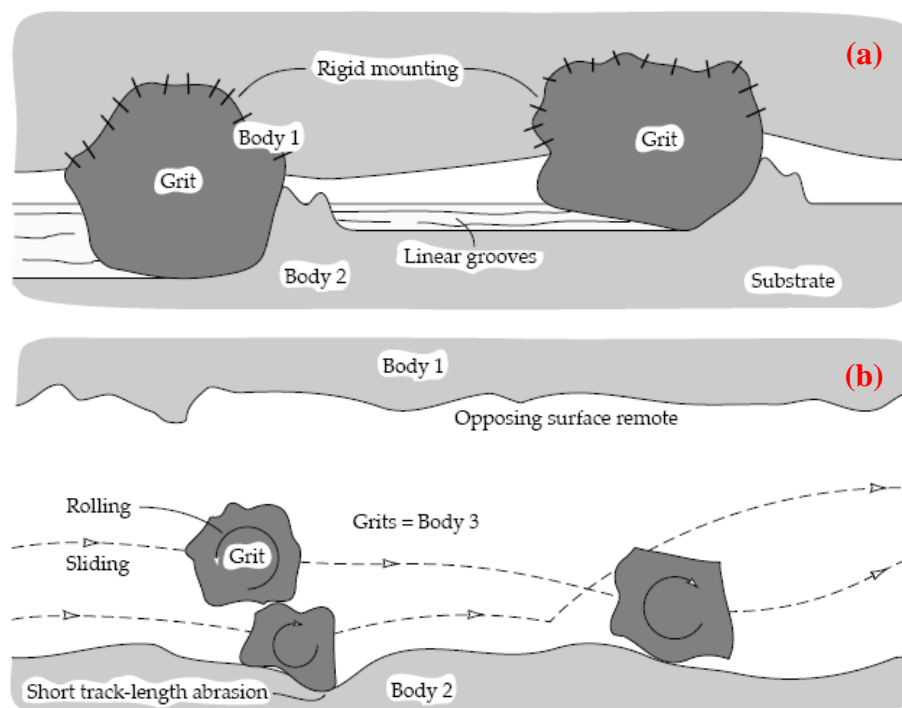


Figura 8 – Esquema dos modos de desgaste abrasivo a dois-corpos (a) e a três-corpos (b), descritos por STACHOWIAK e BATCHELOR (1996).

As taxas de desgaste devido à abrasão a três corpos são geralmente menores que a dois corpos (HUTCHINGS, 1992).

A figura 9 ilustra que o mecanismo de desgaste por abrasão pode envolver a deformação ou fluxo plástico (através da formação de proa e do sulcamento), bem como a fratura frágil (HUTCHINGS, 1992).

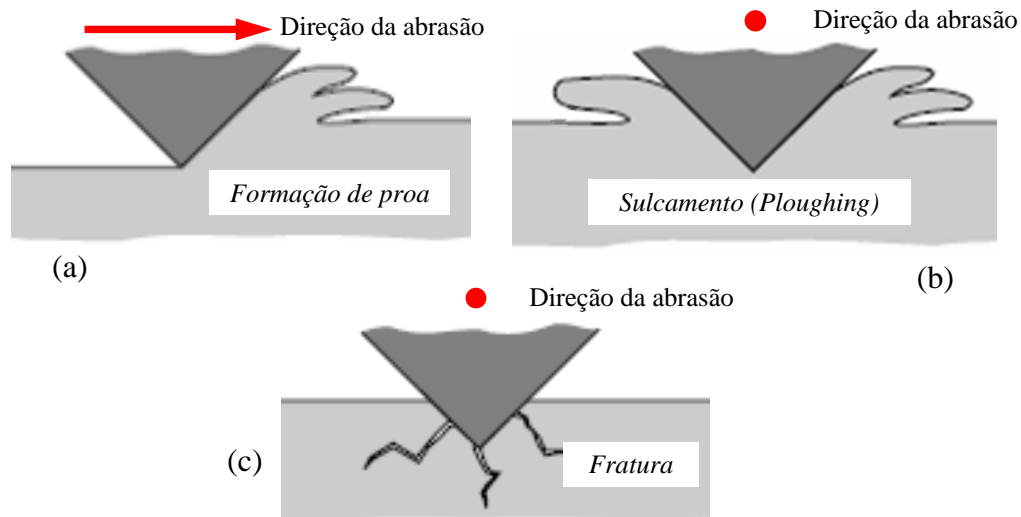


Figura 9 – Principais mecanismos de desgaste por abrasão: formação de proa (a), sulcamento (ploughing) (b) e fratura (c). Baseado em (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

2.4.3 Fadiga Superficial

O desgaste devido à fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e destacamento de material causado pelo carregamento cíclico da superfície sólida. A fadiga localizada pode ocorrer em escala microscópica devido ao contato de deslizamento repetido das asperezas de uma superfície sólida em movimento relativo (ZUM-GAHR, 1987).

A fadiga superficial pode ser importante em contatos de deslizamento entre dois sólidos. Em relação aos mecanismos de adesão ou abrasão, o deslizamento repetido de uma aspereza dura através de uma superfície sólida pode causar a formação e a propagação de trincas na subsuperfície. As partículas de desgaste são geradas quando uma trinca subsuperficial quebra através da superfície (ZUM-GAHR, 1987).

As trincas por fadiga são nucleadas nos pontos onde a máxima tensão tangencial ou tensão de deformação estão localizadas. Estudos teóricos e experimentais mostram que sob o carregamento do contato a posição da máxima tensão tangencial é dependente do coeficiente de atrito. Com baixo coeficiente de atrito, o ponto onde a tensão de cisalhamento é máxima

está localizada abaixo da superfície ($\mu < 0,3$), de outra forma, quando o coeficiente de atrito aumenta ($\mu > 0,3$), este ponto aparece na superfície. Portanto, as trincas podem ser nucleadas na superfície e/ ou abaixo delas (MYSHKIN *et al.*, 2005).

Na figura 10, uma trinca primária é formada em algum ponto fraco da superfície (a) e se propaga (b). Uma trinca secundária pode ser desenvolvida a partir da trinca primária ou se conectar com uma trinca na subsuperfície. Quando a trinca desenvolvida encontra a superfície novamente, uma partícula de desgaste é liberada (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

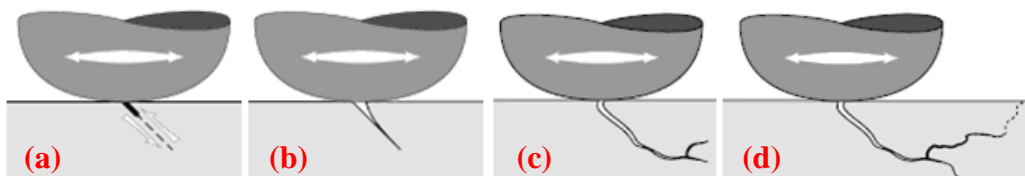


Figura 10 – Mecanismos de formação e propagação de trinca durante o processo de fadiga (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

2.4.4 Reação Triboquímica

O desgaste por reação triboquímica é caracterizado quando duas superfícies sólidas em contato reagem com o ambiente. O desgaste triboquímico pode ser dividido em quatro categorias:

(a) o contato metálico entre as asperezas da superfície que promove a remoção de metal devido à aderência. Pequenos debris de desgaste produzidos podem estar oxidados;

(b) reação química de metais com o ambiente resulta em camadas de proteção superficial que reduz o contato metálico;

(c) trincamento da camada de proteção superficial devido a altas pressões localizadas ou microfadiga resultando em debris de desgaste não metálicos;

(d) debris de desgaste metálicos e não metálicos podem atuar como abrasivos nas superfícies em contato. A formação de uma nova camada de proteção pode levar ao amaciamento das superfícies novamente (ZUM-GAHR, 1987).

2.5 Modelagem do Desgaste

Em um mapeamento realizado por ASHBY (1999), um conjunto de propriedades dos materiais foi plotado contra outro dando origem as *cartas de seleção de materiais* ou *cartas*

de Ashby. Na figura 11, temos a carta de número 16 que relaciona a taxa de desgaste dimensional com a dureza dos materiais.

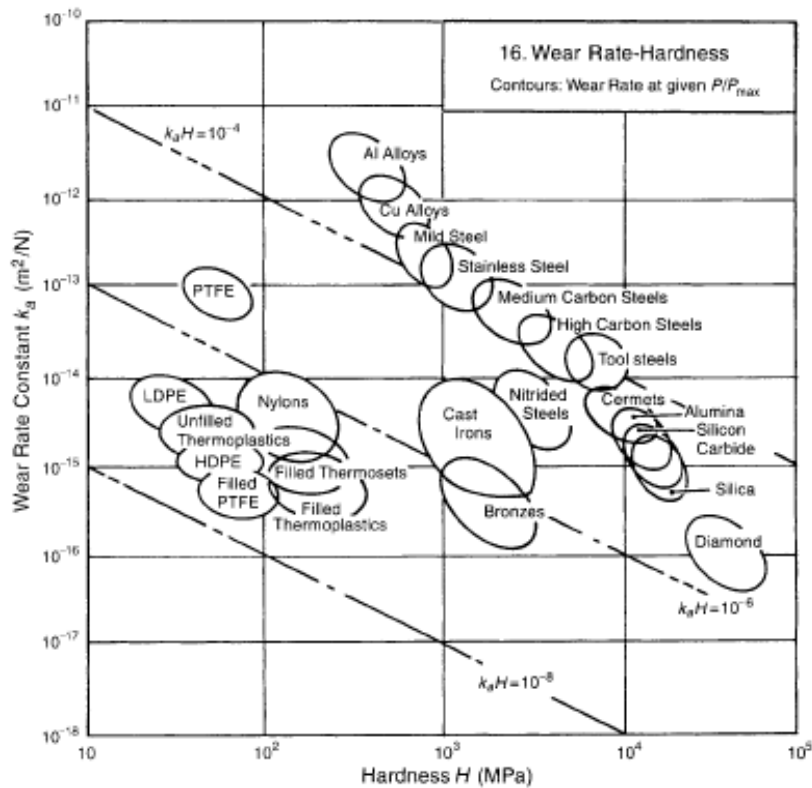


Figura 11 – Carta de desgaste descrita por Ashby.

De acordo com HUTCHINGS (1992), o desgaste de materiais pode ser quantificado através de um modelo simplificado desenvolvido por *Archard*, o qual relaciona o volume desgastado por unidade de distância de deslizamento, Q (m^2), com a carga normal, W (N), e a dureza, H , do material mais mole de acordo com a equação 2.6.

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (2.6)$$

A constante K é denominada de coeficiente de desgaste adimensional, e é de fundamental importância para se comparar a severidade dos processos de desgaste em diferentes sistemas. Entretanto, o valor K/H é muito mais utilizado em aplicações de engenharia e é representado por k_d denominado de coeficiente de desgaste dimensional, e representa o volume de material removido pelo desgaste (m^3) por unidade de distância de deslizamento (m), por unidade de carga normal (N) (HUTCHINGS, 1992). Logo, a Eq. (2.6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$k_d = \frac{Q}{W} \quad (2.7)$$

De acordo com YANG (2005), o volume desgastado é obtido através da divisão dos valores de perda mássica pela densidade do material estudado.

2.6 Regimes de Lubrificação

A lubrificação utilizada nos mais variados tipos de componentes mecânicos é uma das formas de se reduzir o atrito e o desgaste das superfícies em contato.

Os lubrificantes têm a função de introduzir entre as superfícies de deslizamento uma camada de material com resistência ao cisalhamento menor que a das superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante pode não prevenir completamente o contato entre as asperezas, entretanto, também pode reduzir a resistência da formação de junções. Em outros casos, o lubrificante separa as superfícies completamente e nenhuma junção é formada (HUTCHINGS, 1992).

Portanto, os possíveis tipos de lubrificação são definidos de acordo com a espessura do filme lubrificante, e também em função da possibilidade ou não de haver contato entre os elementos do par, por rompimento localizado e momentâneo do filme lubrificante.

Na lubrificação limítrofe as superfícies são separadas por um filme molecular adsorvido. Boa parte do carregamento é suportada pelas forças de repulsão entre os filmes adsorvidos em cada face do material. Embora possa ainda ocorrer algum desgaste, ele será bem menor do que se as superfícies estivessem totalmente desprotegidas. Para cargas muito elevadas ou para velocidade de deslizamento muito baixa, a película de lubrificante se rompe e os materiais do par entram em contato, aumentando o atrito e a taxa de desgaste.

Na lubrificação elastohidrodinâmica, o filme lubrificante é mais espesso que na lubrificação limítrofe. As pressões de contato, neste caso, são da ordem de GPa. Nestas condições a dependência da viscosidade do lubrificante com a pressão tem um papel importante. O contato lubrificado de corpos elásticos macios, tal como borrachas, também envolvem este tipo de lubrificação, entretanto, as pressões que são bem menores não tem efeito na viscosidade do lubrificante; sendo consideradas apenas as deformações elásticas das superfícies em contato (HUTCHINGS, 1992).

Sob as condições de lubrificação hidrodinâmica as superfícies são separadas por um filme relativamente espesso de fluido lubrificante, e a carga normal é suportada pelas pressões hidrodinâmicas (HUTCHINGS, 1992).

A figura 12 apresenta os regimes de lubrificação através da Curva de Stribeck, a qual relaciona o coeficiente de atrito em função do parâmetro λ (razão entre a espessura de filme lubrificante e a rugosidade média do material).

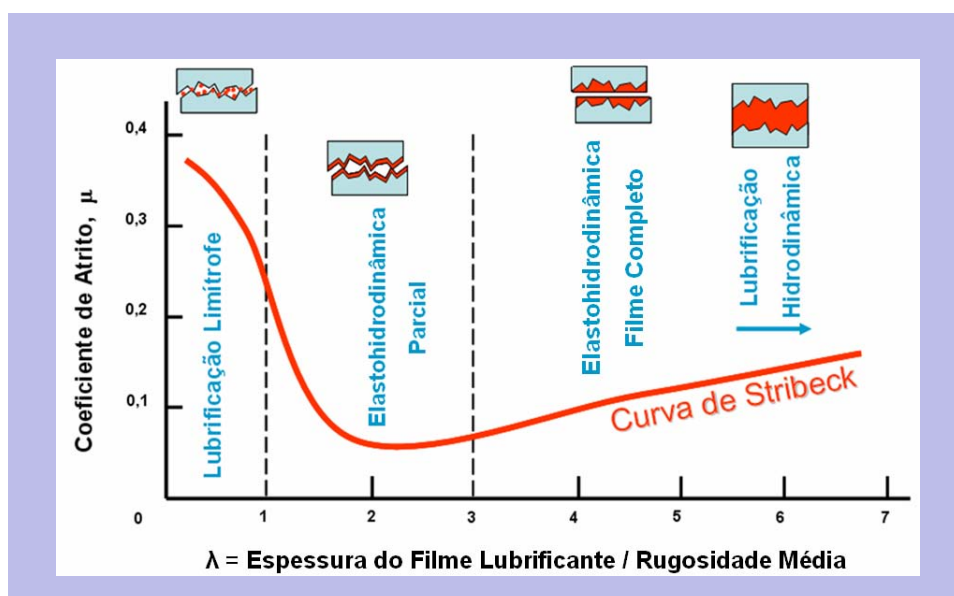


Figura 12 – Regimes de lubrificação representada pela curva de Stribeck.

2.7 Aspectos Tribológicos dos Polímeros

Embora o atrito e o desgaste de sólidos não metálicos apresentem algumas similaridades fundamentais com os metais, existem também diferenças significativas nos mecanismos de desgaste envolvidos bem como no nível de atrito ou desgaste que ocorre (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

A relação entre o módulo de elasticidade (E) e a dureza do material (H) determina a extensão ou o índice de plasticidade (ψ) na região de contato. Os metais apresentam índice de plasticidade (ψ) da ordem de 100 ou mais, enquanto a maioria dos polímeros é da ordem de 10. Isto indica que o contato é predominantemente elástico, com exceção da existência de rugosidade muito elevada, quando pelo menos uma das superfícies de contato é um polímero (HUTCHINGS, 1992).

Nos polímeros o atrito e o desgaste são extremamente complexos e dependem da natureza da aplicação e das propriedades dos materiais. Mesmo os polímeros reforçados têm

valores de módulo de elasticidade muito menor que os metais. O atrito de metal – polímero é caracterizado pelos mecanismos de *adesão* e *deformação* resultantes da força de atrito que não são proporcionais à carga, pois o aumento desta provoca a diminuição do atrito; mas é proporcional à velocidade (CRAWFORD, 1998; ROSATO, 2003).

Segundo HUTCHINGS (1992), o mecanismo de *deformação* envolve a dissipação de energia em grande volume em torno da área de contato local; e o mecanismo de *aderência* é originado a partir da interface entre o material deslizante e o contracorpo. As regiões onde ocorrem os mecanismos de *deformação* (zona coesiva) e de *aderência* (zona interfacial) são esquematizadas na figura 13 para o deslizamento de uma aspereza dura contra uma superfície polimérica.

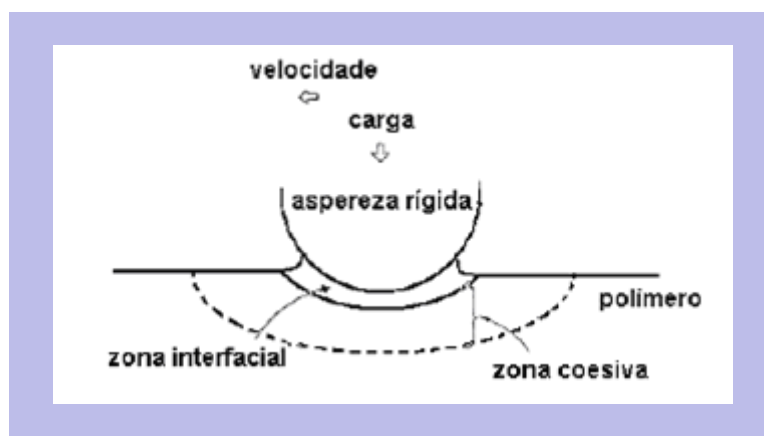


Figura 13 – A origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica.

O mecanismo de *deformação* possui forte dependência com a rugosidade do contracorpo e geralmente provoca sulcamento (SILVA, 2003).

Segundo BRISCOE *apud* SILVA (2003), a zona interfacial não ultrapassa espessuras de 10 nm da superfície do polímero. As forças de ligação fracas, tais como Van der Waals e eletrostática, presentes nas superfícies dos polímeros, são responsáveis pela *aderência* entre os corpos. Desta forma, a componente de *aderência* relaciona-se com a força necessária para provocar o cisalhamento das junções formadas no contato devido à atuação destas forças, ou movimentar as cadeias poliméricas em regiões subsuperficiais.

Experimentos conduzidos com PTFE no vácuo indicam a ocorrência de uma forte aderência entre o PTFE e uma superfície metálica. Acredita-se que a causa da aderência é uma reação química interfacial entre o flúor e o carbono do PTFE com a superfície metálica oposta (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

De acordo com BOWDEN e TABOR (1954) *apud* KREVELEN (1997), a forma extrema do cisalhamento de uma junção entre as superfícies que estão em contato íntimo é o sulcamento ou *ploughing* do material mais duro no macio.

No contato de superfícies metálicas ou cerâmicas deslizando contra polímeros quase toda a deformação ocorre no polímero, e o acabamento da superfície do contracorpo duro tem uma forte influência no *mecanismo de desgaste* resultante (HUTCHINGS, 1992).

As superfícies aparentemente macias são rugosas em escala nanométrica, logo, o contato entre as superfícies ocorre relativamente em poucos pontos. O deslizamento de uma superfície sobre outra produz grandes forças nos pontos de contato. Em muitos casos pode ocorrer deformação plástica; soldagem das junções, então o cisalhamento pode ocorrer na região subsuperficial do material macio. O deslizamento pode provocar a ruptura periódica das junções formadas temporariamente (KREVELEN, 1997).

Segundo HUTCHINGS (1992), a existência de um contracorpo macio (liso) pode resultar em *desgaste por aderência*, envolvendo apenas as deformações em camadas superficiais dos polímeros. ROSATO (2003) afirma que este mecanismo é caracterizado pela remoção de partículas finas da superfície polimérica.

De outra forma, se o contracorpo é rugoso, então as asperezas podem causar deformação nos polímeros a uma profundidade significativa; resultando então em *desgaste por abrasão* associada com deformação plástica do polímero, ou do crescimento de trinca por fadiga na região deformada. Estas duas classes de mecanismos de desgaste envolvem respectivamente deformações na superfície e na subsuperfície sendo denominado de processos de *desgaste interfacial* e *coesivo* (HUTCHINGS, 1992).

O nível da rugosidade do contracorpo para qual a transição do mecanismo de desgaste interfacial para o coesivo ocorre depende da natureza do polímero, mas corresponde tipicamente a valores de Ra entre 0.01 e 1 μm . Para o polietileno de ultra alto peso molecular a transição entre os dois mecanismos promove um coeficiente de desgaste mínimo, como ilustrado na figura 14 (HUTCHINGS, 1992).

A rugosidade na qual a transição ocorre também pode ser influenciada por fatores ambientais e especialmente pela presença de espécies que reduzem a aderência na interface (HUTCHINGS, 1992).

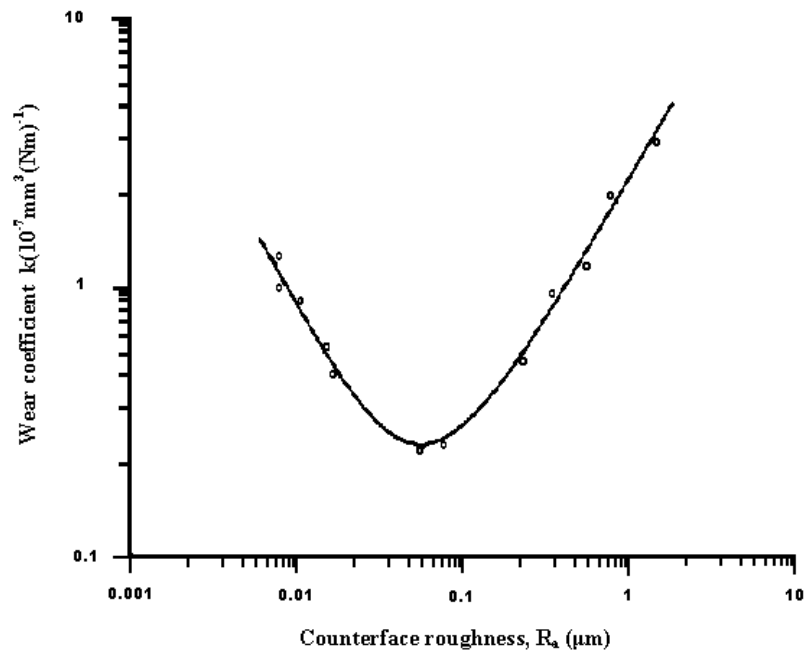


Figura 14 – Taxa de desgaste do Polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) deslizando contra aço em função da rugosidade superficial do aço.

2.8 Principais Características dos Materiais em Estudo

2.8.1 Borracha Nitrílica (NBR)

As borrachas acrilonitrila-butadieno, ou borracha nitrílica, foram preparadas inicialmente em torno de 1930 e sua produção industrial começou na Alemanha por volta de 1937, com o produto sendo conhecido como Buna N (BRYDSON, 1999).

A presença do grupo acrilonitrila, fortemente polar, confere ao elastômero resistência a compostos apolares, já o polibutadieno proporciona ao polímero características elásticas (MEYER *et al.*, 2006).

O teor de acrilonitrila contida na borracha comercial está na faixa de 25 a 50%, com 34% sendo um valor típico comum. Este monômero fornece boa resistência a óleos hidrocarbonetos e ao petróleo. Como regra geral, o aumento do teor de acrilonitrila também aumenta levemente a resistência à tração, dureza e resistência à abrasão, como também facilita o processamento (BRYDSON, 1999).

Dois fatores que limitam o uso deste material são a tendência ao endurecimento na presença de óleos que contêm enxofre, particularmente em elevadas temperaturas (presumidamente devido à forma de vulcanização), e a grande limitação da resistência térmica (BRYDSON, 1999).

2.8.2 Politetrafluoretileno (PTFE)

O politetrafluoretileno é um polímero linear sem ramificações, que foi inicialmente preparado em 1933 (BRYDSON, 1999).

A compacta interposição dos átomos de flúor promove grande elasticidade à molécula e esta característica conduz ao aumento da temperatura de fusão cristalina e a estabilidade térmica do polímero. A atração intermolecular entre as moléculas de PTFE é muito pequena. O interior do polímero não apresenta alta rigidez e resistência à tração que é geralmente associado com polímeros com alto ponto de amolecimento. O PTFE tem alta estabilidade térmica mesmo quando aquecido acima da temperatura de fusão cristalina de 327 °C. Devido a sua alta cristalinidade e incapacidade de interação específica, não existe solvente que reaja com o PTFE a temperatura ambiente (BRYDSON, 1999).

A estrutura molecular e cristalina do PTFE é mostrada na figura 15.

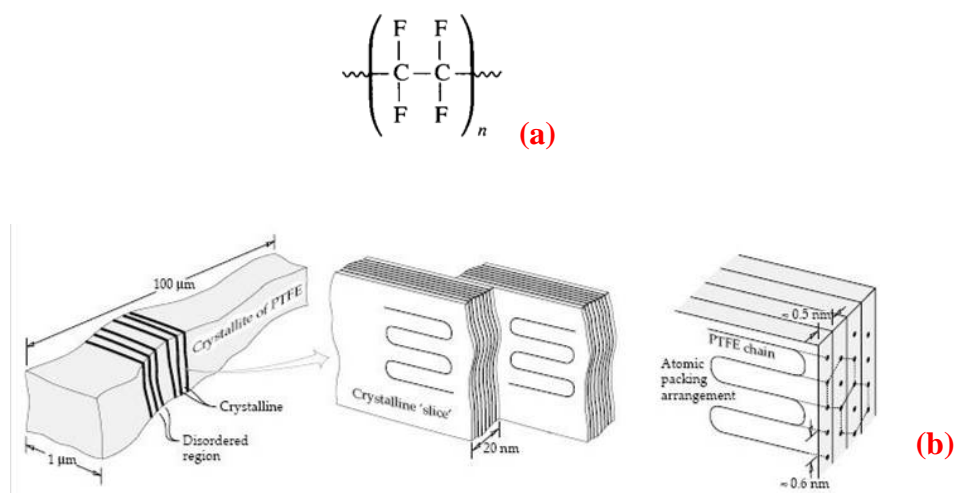


Figura 15 – Esquema da cadeia polimérica (a), e estrutura cristalina e molecular (b) do PTFE (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

Uma das maiores vantagens deste material são a excelente resistência química e seu coeficiente de atrito extremamente baixo (CRAWFORD, 1998).

Devido a sua inércia química sob uma grande escala de temperatura o PTFE é utilizado em áreas que apresentam efeito térmico e corrosivo, como por exemplo, em campos onde são necessários a aplicação de selos, gaxetas, embalagens, válvulas, rolamentos radiais, isolamento elétrico, revestimentos antiaderente (BRYDSON, 1999 e FEYZULLAHOGLU e SAFFAK, 2007).

O PTFE é um polímero que apresenta uma camada de transferência ao deslizar contra um contracorpo duro, e pode fornecer um coeficiente de atrito tão baixo quanto 0,05 na ausência completa de lubrificantes (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

Entretanto, na maioria das aplicações sua taxa de desgaste é elevada e para melhorar seu desempenho é necessário combinar com outros materiais.

2.8.3 Politetrafluoretileno Grafitado (PTFE Grafitado)

O politetrafluoretileno é um excelente lubrificante sólido, entretanto, exibe elevado coeficiente de desgaste ao deslizar sob uma superfície dura (SHI, *et al.*, 2008).

Vários esforços vêm sendo realizado com a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste do PTFE através da adição de compostos inorgânicos ou orgânicos (ou carga) na matriz (VANSWIJGENHOVEN, *et al.*, 2007; SHI, *et al.*, 2008).

As propriedades do volume de um polímero podem ser alteradas consideravelmente pela incorporação de aditivos (BRYDSON, 1999).

Devido à alta temperatura de processamento existem poucos pigmentos adequados para o uso com PTFE. Um número de pigmentos inorgânicos pode ser usado. A melhoria da estabilidade dimensional sem perda do baixo coeficiente de atrito pode ser obtida através da adição de grafite ou do dissulfeto de Molibdênio (BRYDSON, 1999).

Segundo FEYZULLAHOGLU e SAFFAK (2007), a adição de fibra de vidro no PTFE melhora a resistência mecânica, enquanto a adição de pós de bronze e grafite melhora a ação de deslizamento.

2.8.4 Aço AISI 52100

Os materiais ferrosos que exibem propriedades mecânicas superiores aos aços carbono comuns e resulta da adição de elementos de liga tais como níquel, cromo e molibdênio são denominados de aços liga. A principal função dos elementos de liga é de aperfeiçoar as propriedades mecânicas do aço, proporcionando uma melhoria do seu desempenho em condições de serviço específicas (ASM HANDBOOK, v.5).

Os aços utilizados na fabricação rolamentos esféricos e de rolos estão incluídos nesta classe de materiais e podem apresentar baixo ou alto teor carbono (0,10 a 0,20%C ou ~1,0%C, respectivamente) (ASM HANDBOOK, v.5).

O aço AISI 52100 é um aço liga que apresenta alto teor de carbono, aproximadamente 1% e teor de cromo entre 1,30 e 1,60% (CHIAVERINI, 1986). Os elementos de liga promovem a formação de carbonetos e, como consequência, há um aumento da dureza, da resistência ao desgaste e à abrasão, porém, dentre todos os aços carbono a sua ductilidade é menor (MEDEIROS, 2002; VERÁSTEGUI, 2007). É classificado como aço para mancais sendo amplamente utilizado na indústria para a fabricação de pistas internas, externas e corpos rolantes. Devem apresentar tenacidade e estabilidade microestrutural às temperaturas extremas, por estarem sujeitos a ações de vibrações, choques, desalinhamentos, detritos e manuseio. A tabela 1 apresenta o percentual de alguns dos principais elementos químicos que compõem o aço AISI 52100.

Tabela 1 – Composição Química do Aço AISI 52100, *apud* VERÁSTEGUI (2007).

AISI e (SAE)	% Carbono	% Manganês	% Silício	% Cromo
52100	0,98 – 1,10	0,25 – 0,45	0,15 – 0,35	1,3 – 1,6

3. Materiais e Métodos

3.1 Materiais

De acordo com o escopo do trabalho, foram selecionados e adquiridos comercialmente materiais poliméricos e metálicos.

Polímeros:

- I. Borracha nitrílica (NBR), adquirida comercialmente na forma de barra cilíndrica com diâmetro de 64 milímetros;
- II. Politetrafluoretileno (PTFE), adquirido comercialmente na forma de barra cilíndrica com diâmetro de 14 milímetros;
- III. Politetrafluoretileno Grafitado (PTFE Graf.), adquirido comercialmente em forma de barra cilíndrica com diâmetro de 45 milímetros.

Metal:

- I. Aço AISI 52100, recozido adquirido comercialmente em forma de barra cilíndrica com diâmetro de 30 mm.

3.2 Caracterização dos Materiais Poliméricos

Os polímeros foram caracterizados através de medidas de Dureza Shore A e Rockwell E, bem como através de Análises Térmicas como Análise Termogravimétrica (TG), Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) e Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).

3.2.1 Ensaios de Dureza

Nos ensaios de dureza foi utilizado um durômetro portátil fabricado pela Kori Seiki Mfg.Co.Ltd Hardness Tester com certificação Mitutoyo para realizar as medidas de dureza Shore A do elastômero NBR.

O durômetro Shore A é utilizado na medição de dureza de borrachas e elastômeros “moles”, logo, em polímeros e plásticos “duros”, tais como PTFE puro e PTFE grafitado, a sua escala de medição é limitada. Portanto, para estes polímeros, a técnica de medição

utilizando o durômetro Shore A foi substituída pela medição através de um durômetro Rockwell E (ASTM – D 785). Neste caso, utilizou-se um durômetro de marca Panambra, com um indentador esférico de diâmetro de $\varnothing 1/8''$, pré-carga de 10 Kgf. e carga de 100 Kgf. Adquiridos a partir de sete medições, os valores médios e o desvio padrão dos ensaios de dureza Shore A para o NBR, bem como da dureza Rockwell E para o PTFE e o PTFE grafitado, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de dureza Shore A e Rockwell E dos polímeros utilizados.

Materiais	Dureza
Borracha Nitrílica (NBR)	73 ± 5 Sh A
Politetrafluoretileno (PTFE)	60 ± 4 HRE
Politetrafluoretileno (PTFE) Grafitado	68 ± 6 HRE

3.2.2 Análise Termogravimétrica (TG)

As análises termogravimétricas foram realizadas em equipamento da Shimadzu, modelo TGA-50H. Utilizou-se um cadinho de platina, sob atmosfera dinâmica de ar, com vazão de 50 mL.m^{-1} , razão de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C.min}^{-1}$. A análise iniciou em aproximadamente $30 \text{ }^\circ\text{C}$ e finalizou em $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

A curva da análise termogravimétrica (TG), em percentual de perda mássica do polímero, e sua derivada no tempo (DTG), em mg/min. , apresentada na figura 16, fornece a informação de que a primeira etapa de degradação do NBR ocorre entre $30,85 \text{ }^\circ\text{C}$ e $200,45 \text{ }^\circ\text{C}$; a segunda entre $203,99 \text{ }^\circ\text{C}$ e $483,96 \text{ }^\circ\text{C}$ e a terceira etapa ocorre entre $482,95 \text{ }^\circ\text{C}$ e $579,14 \text{ }^\circ\text{C}$. Pode-se observar a existência de resíduos acima de $700 \text{ }^\circ\text{C}$, proveniente, possivelmente, de carga mineral adicionada ao polímero.

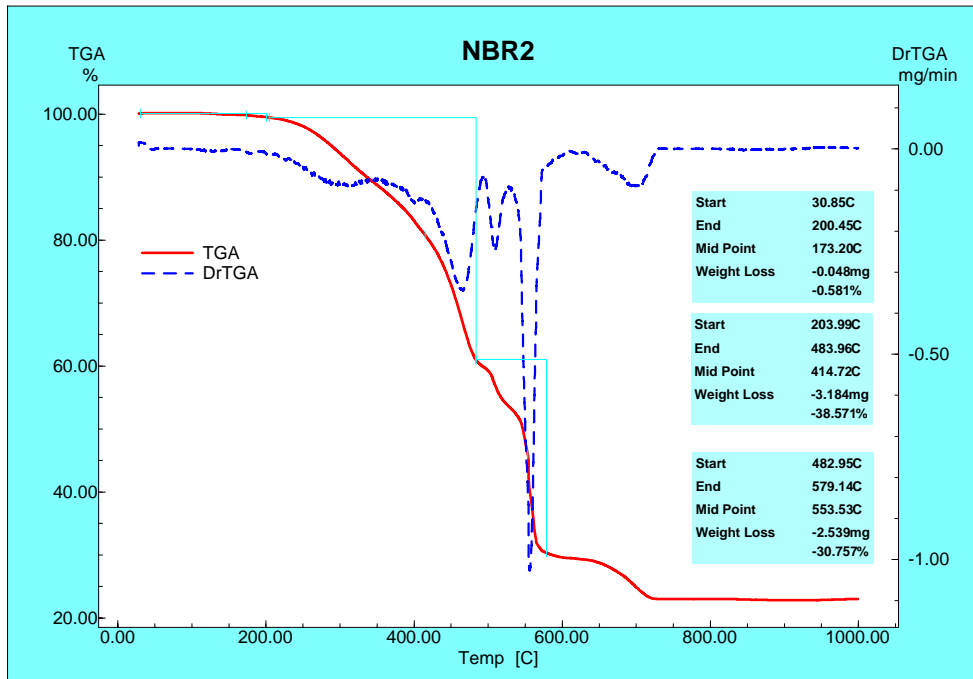


Figura 16 – Curva termogravimétrica do NBR.

Na curva referente à análise termogravimétrica (TG) do PTFE, figura 17, é possível observar que o mesmo apresenta maior estabilidade térmica comparado ao NBR. Verifica-se também que a degradação do PTFE ocorre na faixa de temperatura entre 555,46 °C a 605,12 °C. A decomposição total deste material é observada na temperatura acima de 610 °C.

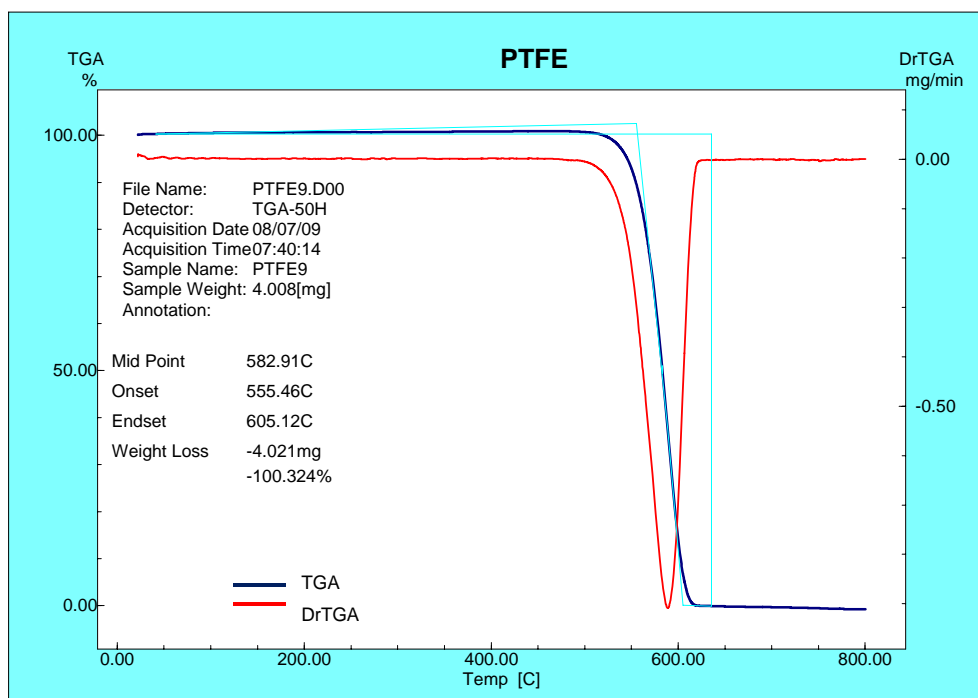


Figura 17 – Curva termogravimétrica do PTFE.

A partir da análise termogravimétrica apresentada na figura 18, verifica-se que o início da degradação para o PTFE grafitado ocorre 60 °C abaixo do início da degradação do PTFE puro e finaliza aproximadamente na mesma temperatura, ou seja, entre 492,99 °C e 604,22 °C. A presença do grafite na matriz de PTFE é confirmada pela decomposição de cinzas e material carbonáceo residual entre 606,75 °C e 803,81 °C.

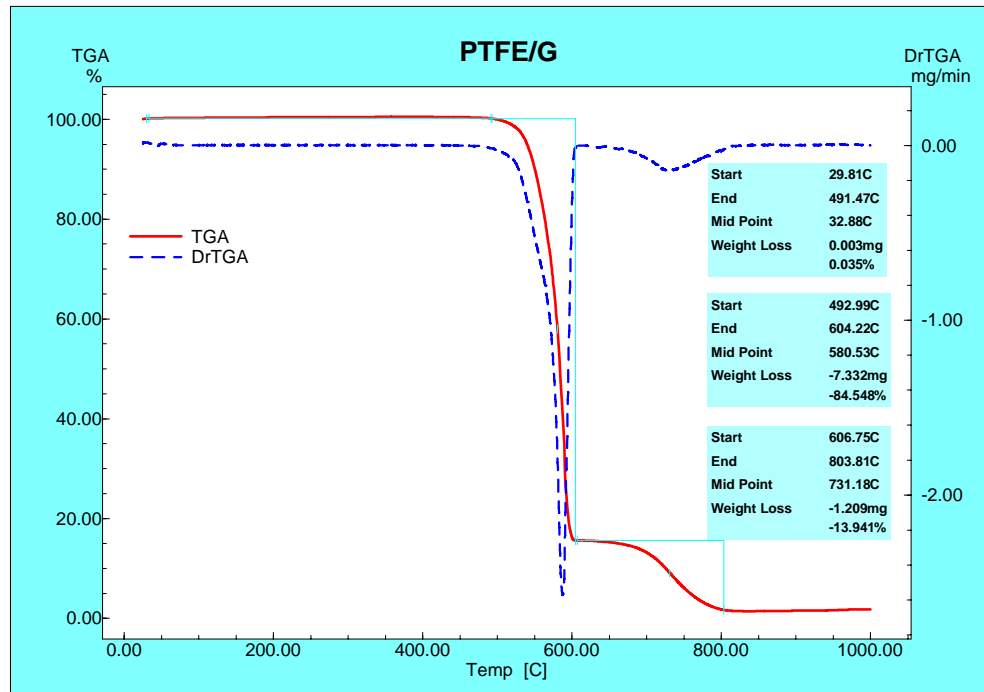


Figura 18 – Curva termogravimétrica do PTFE grafitado.

3.2.3 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

Utilizou-se um equipamento da Shimadzu modelo DSC – 50, o qual aqueceu cada amostra a uma temperatura de até 550 °C. Os polímeros foram analisados sob atmosfera de Nitrogênio com vazão de 50 mL.min⁻¹, a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹ e na faixa de temperatura de 30 a 500 °C. Utilizou-se um cadinho de alumínio e massa de 2,0 mg.

Na figura 19, referente a curva de calorimetria diferencial exploratória (DSC) para o polímero NBR, é observada um pico exotérmico em aproximadamente 360 °C e um pico endotérmico em 470°C.

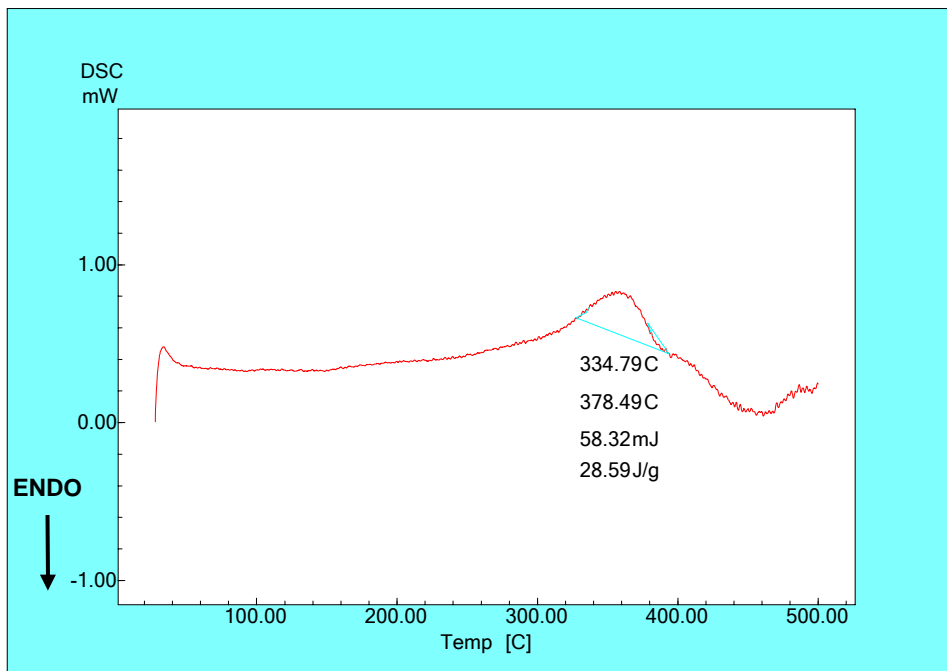


Figura 19 – Curva de calorimetria diferencial exploratória do NBR.

Um pico exotérmico em 280 °C seguido por um pico endotérmico em 325 °C é observado na análise de calorimetria diferencial exploratória referente ao PTFE, indicando o aumento da mobilidade das cadeias poliméricas (figura 20). De acordo com YAMAGUCHI (1990) o PTFE funde em 327 °C, logo, o pico endotérmico da curva DSC refere-se à fusão da parte cristalina deste material.

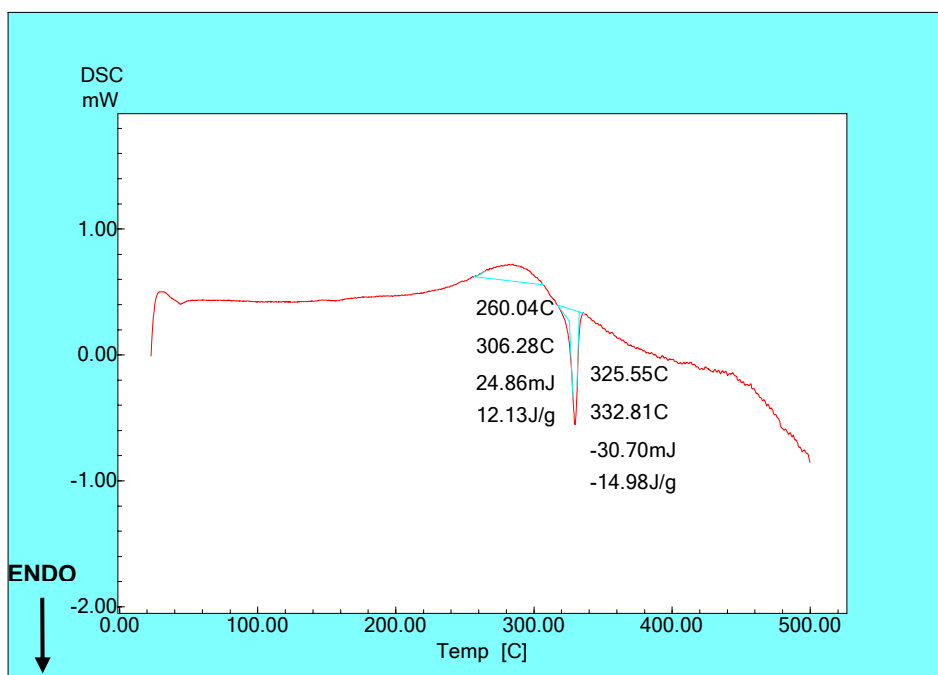


Figura 20 – Curva de calorimetria diferencial exploratória do PTFE.

Na figura 21, a análise de calorimetria diferencial exploratória referente ao PTFE grafitado, identifica-se um único pico endotérmico ocorrendo na mesma temperatura do PTFE puro, em 325 °C, porém de menor intensidade e absorção de energia (23 mJ).

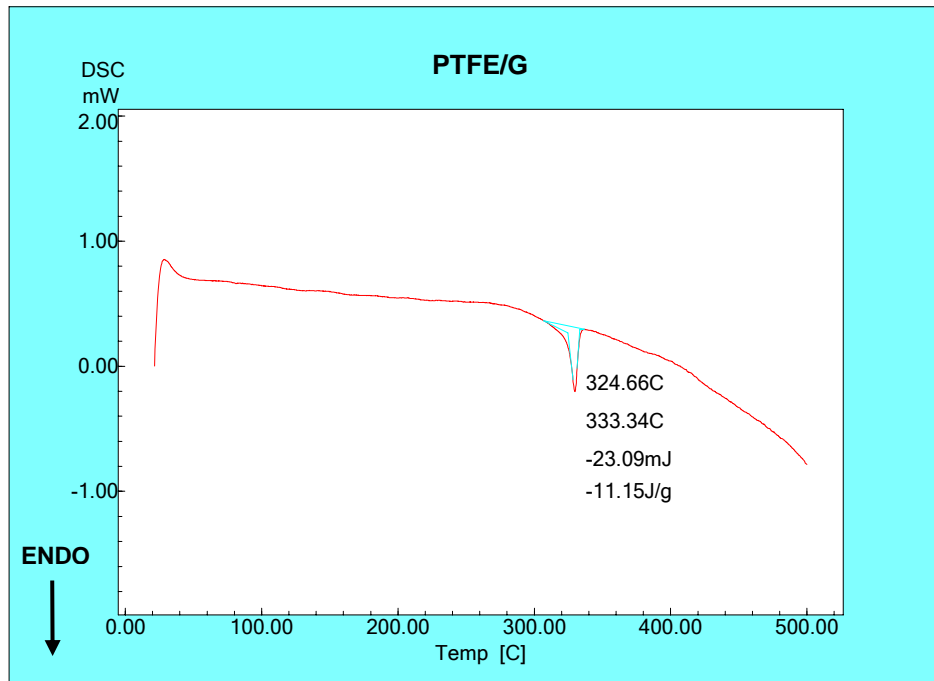


Figura 21 – Curva de calorimetria diferencial exploratória do PTFE grafitado.

3.2.4 Análise Dinâmico-Mecânica

As análises dinâmico-mecânica foram realizadas com a finalidade de se obter o módulo de elasticidade dos polímeros através da curva do módulo de armazenamento. Para isto, utilizou-se um equipamento da TA Instruments, onde os polímeros foram submetidos a ensaios no modo de tração com carga constante de 10 mN, taxa de aquecimento de 2 °C.min⁻¹ e uma frequência de 1 Hz. A faixa de temperatura utilizada para as amostras de NBR e PTFE grafitado foi de 20 °C a 100 °C, enquanto que para o PTFE foi de 20 °C a 200 °C.

Na figura 22, observa-se que o módulo de elasticidade (módulo de armazenamento) do NBR na temperatura ambiente, representado pela curva verde, é de aproximadamente 0,025 GPa. À temperatura ambiente a energia dissipada ou coeficiente de perda, que corresponde a capacidade do material em converter energia mecânica, apresentou valores de aproximadamente 0,005 GPa (curva azul).

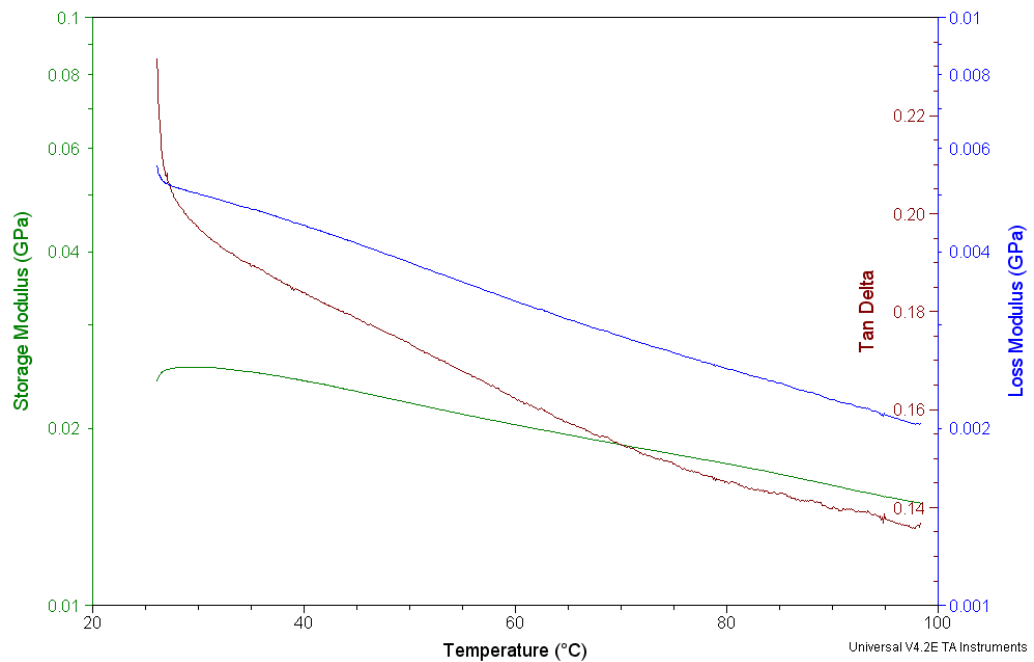


Figura 22 – Curva de análise dinâmico-mecânica do NBR.

A análise dinâmico-mecânica referente ao PTFE, figura 23, fornece o módulo de elasticidade e coeficiente de perda, na temperatura ambiente, nos valores de 0,8 GPa e 0,09 GPa, respectivamente.

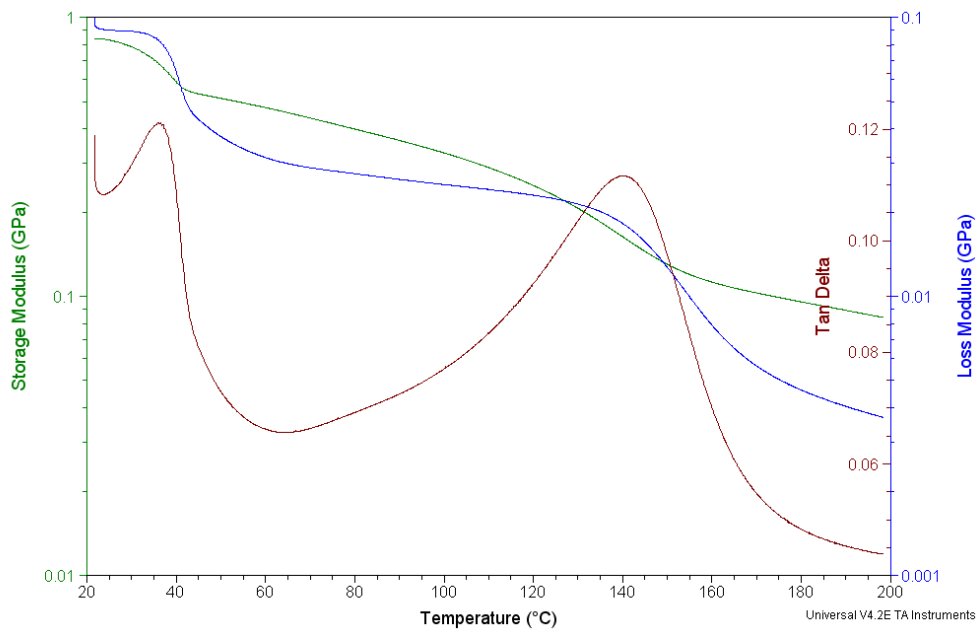


Figura 23 – Curvas de análise dinâmico-mecânica para o PTFE.

Na figura 24, o gráfico da análise dinâmico-mecânica para o PTFE grafitado fornece o módulo de elasticidade e módulo de perda obtidos na temperatura ambiente nos valores de aproximadamente 1,02 GPa e 0,150 GPa, respectivamente.

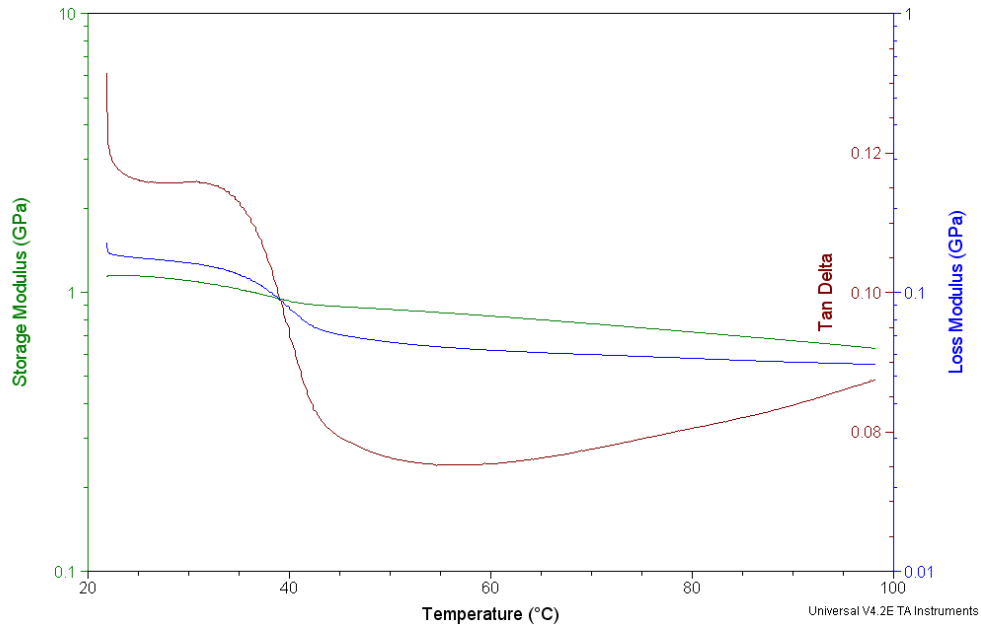


Figura 24 – Curvas de análise dinâmico-mecânica para o PTFE grafitado.

Através das análises das curvas DSC e módulo de perda para o PTFE puro e grafitado pode-se afirmar que a presença do grafite na matriz de PTFE promove maior dissipação de energia em relação ao polímero puro.

3.3 Caracterização do Material Metálico

A caracterização do aço AISI 52100 foi realizada utilizando-se de medidas de dureza Rockwell C, e por análise metalográfica da microestrutura.

3.3.1 Ensaio de Dureza

As medidas de dureza Rockwell C foram realizadas após a etapa de confecção dos contracorpos metálicos utilizando um durômetro de marca PANTEC RASN RS. O valor médio e o desvio padrão, obtidos a partir de sete medições, para os contracorpos de aço AISI 52100 estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valor de dureza Rockwell C do aço utilizado.

Material	Dureza Rockwell C
Aço AISI 52100	20 ± 1

3.3.2 Análise Microestrutural

Uma amostra do material metálico como recebido foi analisada por microscopia óptica após o procedimento metalográfico de corte, lixamento, polimento e ataque químico com uma solução alcoólica de ácido nítrico a 2%.

Na Figura 25 é apresentada uma imagem obtida por Microscopia Óptica do aço AISI 52100 na condição recebida. A microestrutura revelou as fases perlita e ferrita.

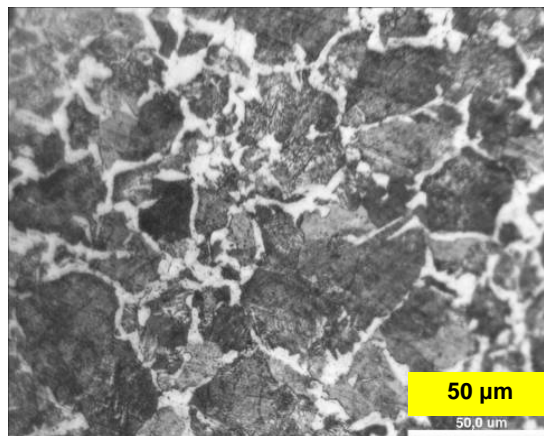


Figura 25 – Microestrutura do aço AISI 52100 na condição recebida. Ataque: Ácido Nítrico 2%. Ampliação: 400X.

3.4 Preparação dos Corpos-de-Prova

Nos ensaios de abrasão foram utilizados corpos de prova poliméricos em forma de pino cilíndrico (figura 26). Esta geometria foi obtida através de usinagem, para isto utilizou-se um vazador acoplado a uma placa universal de um torno mecânico, no qual os materiais poliméricos foram pressionados, obtendo-se assim corpos de prova com diâmetro e altura de 13 mm. Um pequeno furo na lateral do cilindro e a 3 mm de uma de suas faces planas foi realizado para possibilitar a fixação do termopar. O lixamento das superfícies utilizando lixas de granulometria #100, #180, #280, #360, #400, #600, permitiu a padronização das superfícies.

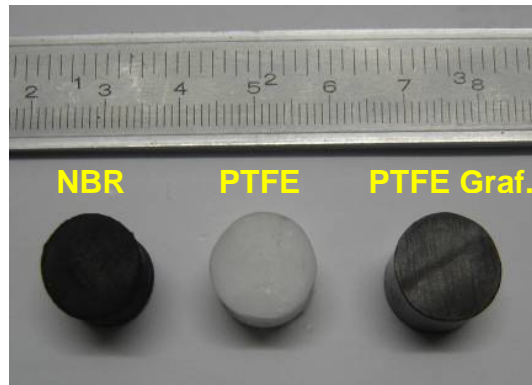


Figura 26 – Corpos-de-prova poliméricos de NBR, PTFE e PTFE grafitado.

Após a etapa de confecção, um banho por ultra-som com água destilada foi utilizado para a eliminação de poeiras, graxas, sais e outras impurezas que, por ventura, estivessem presentes nos corpos-de-prova. Um secador e uma balança analítica com resolução de 0,1 mg foram utilizados na etapa subsequente de secagem e pesagem.

3.5 Preparação dos Contracorpos

As hastes de aço AISI 52100 utilizadas como contracorpos, foram usinadas em oito seções cilíndricas (S1,... S8) com diâmetros de 12 mm, como ilustrado na figura 27.



Figura 27 – Haste metálica subdividida em oito seções cilíndricas.

A norma API 11B (American Petroleum Institute), que trata das especificações adotadas para hastes metálicas utilizadas em unidades de bombeamento de petróleo, recomenda que estas apresentem acabamentos superficiais com valores de rugosidade R_a na faixa de 8 a 32 μinch (micro polegadas), que corresponde a uma faixa de 0,2 a 0,8 μm .

Após as etapas de usinagem, o acabamento dos contracorpos foi realizado com lixas de SiC de granulometrias #100, #180, #280 e #320, de forma que as superfícies apresentassem

a faixa de rugosidade dentro dos limites especificados pela norma descrita acima. Em seguida as superfícies foram limpas e avaliadas através de um rugosímetro do tipo Taylor Hobson Surtronic 25. A rugosidade média superficial foi obtida através de sete varreduras em cada uma das oito seções cilíndricas dos contracorpos.

A figura 28 ilustra a imagem gráfica das irregularidades superficiais obtidas por esta técnica para um contracorpo com acabamento na faixa de rugosidade especificada pela norma. O comprimento de amostragem, ou cut off (λ_c), foi de 0,1 μinch (0,8 μm) com trecho de medição unitário (l_n), de 4 mm.

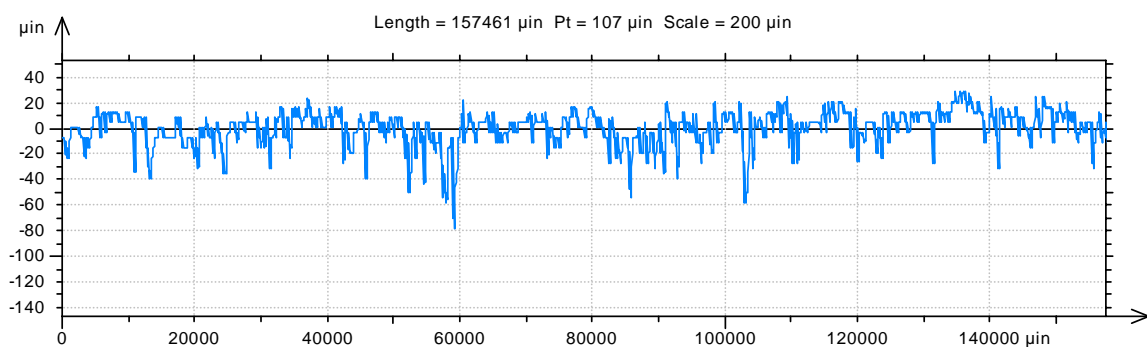


Figura 28 – Irregularidades superficiais de um contracorpo obtidas por um rugosímetro para a verificação do acabamento especificado pela norma.

3.6 Pressão de Contato

A pressão de contato atuante em um par tribológico sob a ação de deslizamento varia ao longo do tempo. Logo, o cálculo das *pressões de contato superior* (no início do ensaio) e *inferior* (após o ensaio) foi realizado através dos equacionamentos de Hertz utilizando a equação 2.5, apresentada no capítulo anterior. Para a pressão de contato superior, a área de contato foi obtida por impressão (*footprint*) dos corpos-de-prova poliméricos nas superfícies das hastes metálicas, sob carga de 3,15 N. Para isto, utilizou-se tinta de almofada de carimbo nos corpos-de-prova e papel adesivo nas hastes. A pressão de contato inferior foi calculada utilizando as medidas das dimensões das crateras de desgaste. A medição das impressões e das crateras foi realizada com o auxílio de uma lupa e um micrômetro.

As impressões de contato (*footprint*) dos pares tribológicos cilindro contra plano resultaram em calotas elípticas, como em LIMA DA SILVA (2006), e retangulares. Logo, a área de contato obtida, resultou das medições dos lados do retângulo ou das diagonais da elipse formada após o footprint e após os ensaios de desgaste.

As pressões de contato superior, exercidas nos pares tribológicos em função do material polimérico utilizado são apresentadas na figura 29.

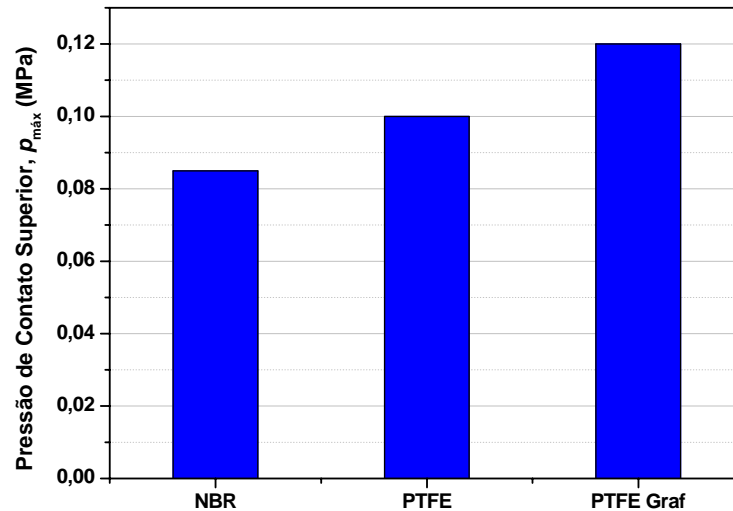


Figura 29 – Pressão de contato superior, para uma carga de 3,15 N, em função do material dos corpos-de-prova.

A pressão de contato superior calculada a partir da carga normal de 3,15 N, para os contatos polímeros-metal, obedece à ordem crescente do módulo de elasticidade dos polímeros: NBR < PTFE < PTFE grafitado. Logo, a pressão de contato dos pares tribológicos aumenta com o aumento do módulo de elasticidade dos polímeros utilizados.

3.7 Equipamento de Ensaio

Os ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados em um tribômetro desenvolvido no Grupo de Estudos de Tribologia – UFRN, adaptado de uma máquina balanceadora; este equipamento permite que o contato das superfícies de ensaio seja configurado na forma de cilindro contra plano. O equipamento e o detalhe do contato estão representados na figura 30.

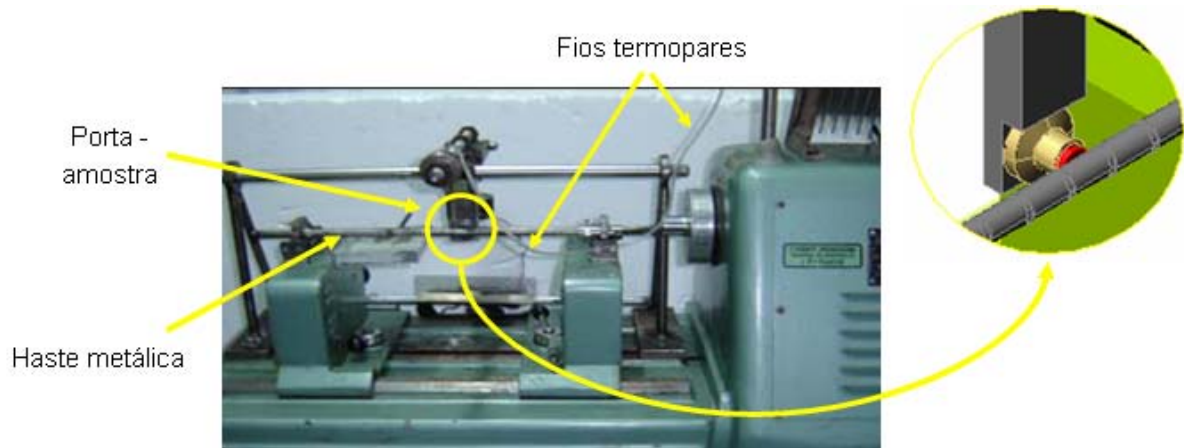


Figura 30 – Imagem do equipamento de ensaio tribológico e esquema do contato entre as superfícies.

A rotação proveniente de um motor elétrico é transmitida para um dos mancais, os quais têm a função de fixar e apoiar a haste metálica ou contracorpo cilíndrico. Os mancais podem ainda assumir a configuração fixa ou livre, ou seja, na condição livre eles permitem que o eixo metálico sofra um deslocamento horizontal na direção normal ao corpo de prova. A carga normal é aplicada através de um peso morto posicionado em um braço de alavanca, onde se encontra o corpo-de-prova plano. A velocidade do ensaio é regulada através do inversor de frequência e verificada através de um tacômetro digital modelo TC5030 de marca ICEL. As medidas de temperatura são obtidas através de um instrumento digital portátil marca INSTRUTERM (modelo TH – 60) com dois termopares do tipo K. Um sistema de aquisição de dados acoplado ao computador permitiu o armazenamento dos dados de temperatura.

3.8 Ensaio Tribológicos

Os ensaios de desgaste foram configurados com a finalidade de reproduzir de forma acelerada os danos relacionados ao contato metal-polímero em uma unidade de bombeio de petróleo. Utilizaram-se corpos-de-prova de borracha nitrílica (NBR), politetrafluoretileno (PTFE) e PTFE grafitado deslizando contra o aço AISI 52100. A carga, a velocidade e a distância de deslizamento foram mantidas constantes em 3.15 N, 0.8 m/s (1300 RPM) e 3.2 km respectivamente. Devido ao processo de remoção de material das superfícies e conseqüente mudança na área de contato, houve uma variação da pressão de contato durante a realização dos ensaios. Nas condições de deslizamento adotadas estão incluídas os ensaios

com mancais fixos e livres, bem como ensaios a seco e lubrificado. A lubrificação com uma gota de óleo multiviscoso (SAE 15W40) foi aplicada uma única vez após aproximadamente 1600 metros de deslizamento. Foi realizada uma repetição para cada conjunto de configurações de ensaios adotados. Na Tabela 4 estão esquematizadas as condições dos mancais e de lubrificação dos pares tribológicos em estudo.

Tabela 4 – Esquemática dos ensaios de abrasão.

CARGA (N)	VELOCIDADE (RPM)	CONDIÇÃO		AÇO AISI 52100	
3.15	1300 (0.8 m/s)	Mancais Fixos	Sem lubrificação	NBR	NBR
				PTFE	PTFE
				PTFE-G	PTFE-G
			Lubrificado Óleo (SAE 15W40)	NBR	NBR
				PTFE	PTFE
				PTFE-G	PTFE-G
		Mancais Livres	Sem lubrificação	NBR	NBR
				PTFE	PTFE
				PTFE-G	PTFE-G
			Lubrificado Óleo (SAE 15W40)	NBR	NBR
				PTFE	PTFE
				PTFE-G	PTFE-G

As temperaturas atingidas no decorrer dos ensaios foram obtidas a uma taxa de aquisição de dados de 20 segundos. Um dos termopares, posicionado em um pequeno orifício do corpo-de-prova polimérico, permaneceu a uma distância de aproximadamente três milímetros do contato, enquanto o outro coletava a temperatura ambiente a uma distância de 0,5 metros do sistema.

O volume desgastado, utilizado no cálculo da taxa de desgaste (eq. 2.7), foi obtido através da relação entre a variação de massa devido o desgaste e a densidade dos corpos-de-prova poliméricos.

As superfícies desgastadas dos corpos-de-prova foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), possibilitando a identificação dos principais mecanismos de desgaste atuantes em sistemas poliméricos.

A tabela 5 descreve a seqüência de todo o procedimento adotado na realização deste trabalho.

Tabela 5 – Seqüência do procedimento experimental adotado.

Procedimento Experimental		
	Polímeros	Metais
1	Ensaio de dureza Shore A e Rockwell E dos polímeros como adquirido;	Remoção de amostra de aço AISI 52100 para realização de análise microestrutural;
2	Usinagem dos corpos-de-prova poliméricos utilizando-se um vazador acoplado ao torno mecânico;	Obtenção dos contracorpos metálicos através de torneamento;
3	Lixamento dos corpos-de-prova Lixas de granulometria #100, #180, #280, #360, #400, #600;	Lixamento dos contracorpos com lixas de granulometria #100, #180, #280, #320. (Obedecendo a norma API 11B);
4	Limpeza dos corpos-de-prova de NBR, PTFE e PTFE grafitado por ultra-som;	Limpeza dos contracorpos em banho por ultra-som;
5	Secagem dos contracorpos em ar quente;	Ensaio de dureza Rockwell C dos contracorpos torneados;
6	Pesagem dos corpos-de-prova em balança analítica;	Medição da rugosidade superficial;
7	Obtenção das impressões de contato ou <i>footprint</i> dos polímeros para calcular a pressão de contato superior dos pares tribológicos;	
8	Posicionamento do par tribológico no equipamento de ensaio seguido de regulagem da velocidade com inversor de frequência e verificação através de um tacômetro digital;	
9	Ensaio tribológico polímero/metal;	
10	Limpeza por ultra-som dos corpos-de-prova desgastados e secagem posterior;	
11	Aquisição de temperatura durante os ensaios;	
12	Pesagem dos corpos-de-prova desgastados.	
13	Avaliação das superfícies desgastadas por MEV.	
14	Medição e obtenção das imagens da área desgastada dos polímeros para calcular a pressão de contato inferior.	

4. Resultados e Discussão

Os resultados são apresentados na seguinte ordem:

- História Térmica Gerada nos Ensaio Tribológicos;
- Morfologia Gerada nos Ensaio Tribológicos;
- Pressão de Contato Superior e Inferior;
- Análise Comparativa da Taxa de Desgaste dos Polímeros.

4.1 História Térmica Gerada nos Ensaio Tribológicos

Na figura 31 (a) estão representadas as curvas de variação de temperatura dos polímeros em função da distância de deslizamento nas condições de ensaio a seco e com mancais fixos.

É possível observar que o período de amaciamento (*running-in*) ocorre até aproximadamente 700 metros de distância de deslizamento para a borracha nitrílica (NBR). Após este período verifica-se uma queda gradual na variação de temperatura, o qual pode estar associado aos seguintes processos:

- 1) Formação do filme polimérico no contracorpo, figura 31(b), promovendo o aumento do coeficiente de atrito devido o contato polímero-polímero;
- 2) Desprendimento do filme de NBR, antes aderido à superfície do contracorpo;
- 3) Aumento da área de contato, promovendo a redução na pressão de contato e, conseqüentemente, da temperatura do sistema.

As curvas referentes ao PTFE e PTFE grafitado demonstram a existência de um período de amaciamento curto, o qual é, geralmente, relacionado com as características de autolubrificação destes polímeros. Observa-se ainda, que a cada 500 metros de deslizamento do PTFE ocorre, alternadamente, a queda e o aumento na variação de temperatura, possivelmente devido a formação e quebra do filme de PTFE, que possui baixa tensão de cisalhamento.

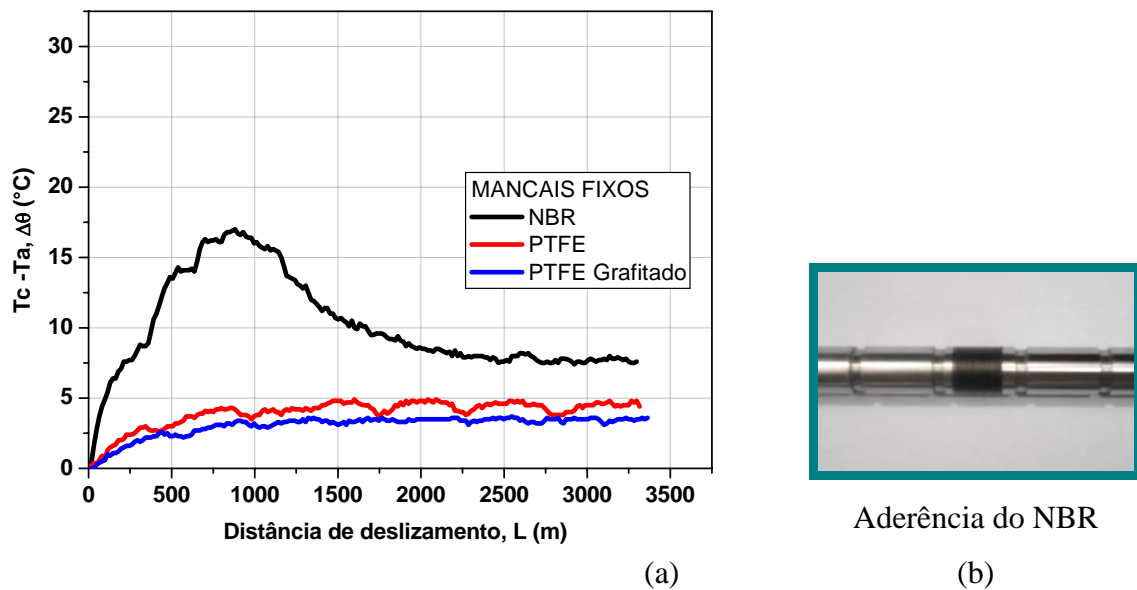


Figura 31 – Variação de temperatura *versus* distância de deslizamento em ensaios de abrasão a seco dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado (a); e detalhe do filme de NBR aderido à superfície do contracorpo metálico (b).

Na figura 32 estão representadas as curvas de variação de temperatura dos polímeros em função da distância de deslizamento nas condições de ensaio lubrificado e com mancais fixos. Nestes ensaios a lubrificação ocorreu em apenas um único instante, no qual foi adicionado uma gota de óleo SAE 15W40 após uma distância de deslizamento de aproximadamente 1750 metros. Logo, os primeiros 1750 metros de distância de deslizamento correspondem à repetição dos ensaios a seco.

Neste caso, o período de amaciamento do NBR é semelhante ao encontrado no ensaio a seco e com mancais fixos, entretanto, este período de acomodação das asperezas é um pouco mais longo ou curto para o PTFE e PTFE grafitado, respectivamente.

Após a lubrificação, houve uma queda significativa na variação de temperatura do NBR. Tal comportamento sugere que, em condições de deslizamento lubrificado, este polímero atinge valores de coeficientes de atrito similares aos do PTFE e PTFE grafitado. Entretanto, a partir de 2500 m de deslizamento, observa-se que a temperatura do NBR volta a subir, sugerindo o rompimento do filme lubrificante.

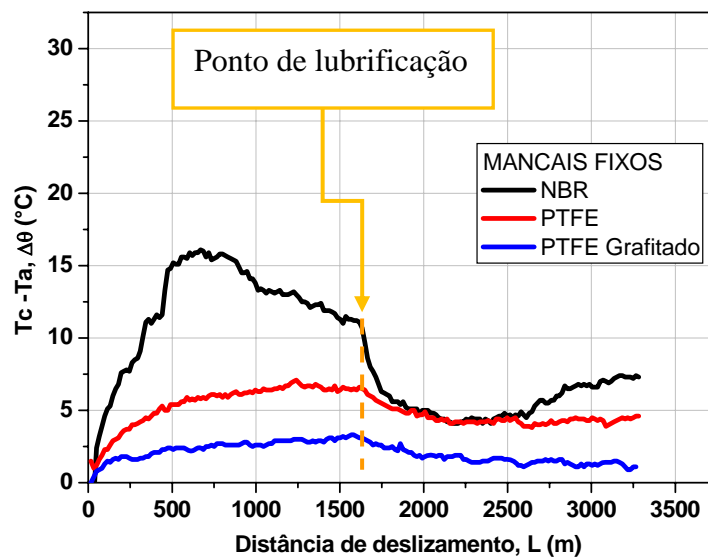


Figura 32 – Variação de temperatura *versus* distância de deslizamento em ensaios de abrasão lubrificada (óleo SAE 15W40) e com mancais fixos dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado.

Na figura 33 estão representadas as curvas de variação de temperatura dos polímeros em função da distância de deslizamento nas condições de ensaio a seco e com mancais livres.

A distância de deslizamento referente ao período de amaciamento do NBR, desgastado com mancais livres, é de 1250 metros, aproximadamente 79 % maior que no ensaio com mancais fixos. Verifica-se que com mancais livres ocorre um aumento na variação de temperatura para todos os polímeros estudados, sendo para a NBR de quase 76%, e para o PTFE e PTFE grafitado de aproximadamente 50%.

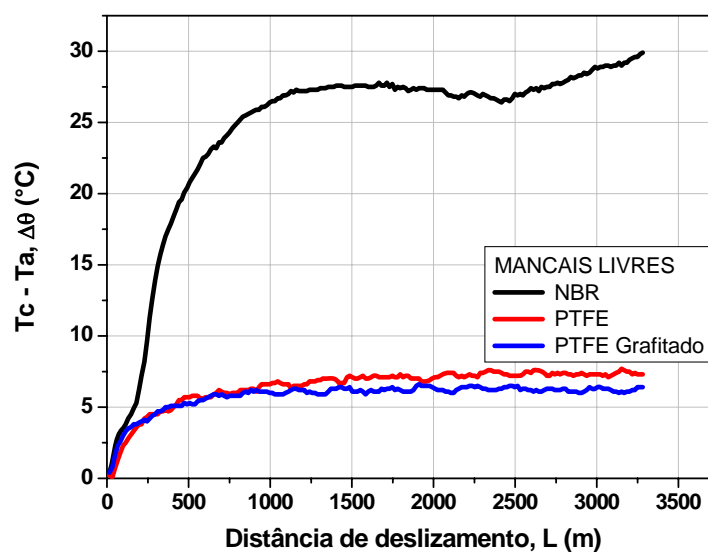


Figura 33 – Variação de temperatura *versus* distância de deslizamento em ensaios de abrasão a seco e com mancais livres dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado.

Como mencionado anteriormente, o NBR apresentou maiores variações de temperatura em relação ao PTFE e PTFE grafitado, mesmo modificando as condições de mancal fixo para mancal livre.

Na figura 34 estão representadas as curvas de variação de temperatura dos polímeros em função da distância de deslizamento nas condições de ensaio lubrificado e com mancais livres.

Verifica-se que após a aplicação do lubrificante o PTFE grafitado não apresentou redução da variação de temperatura, indicando que na presença de mancais livres este polímero se comporta de forma semelhante aos ensaios realizados em mancais fixos sem presença de óleo lubrificante. Entretanto, este é um assunto que está em estudo e ainda requer maior aprofundamento nas pesquisas.

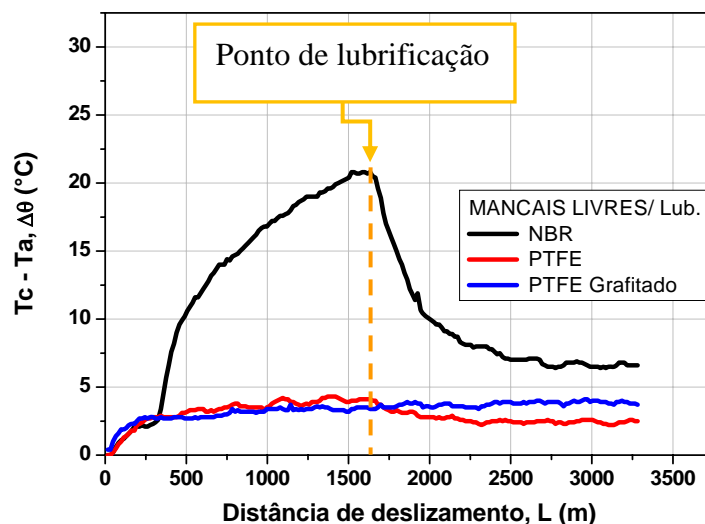


Figura 34– Variação de temperatura *versus* distância de deslizamento em ensaios de abrasão lubrificado (óleo SAE 15W40) e com mancais livres dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado.

4.5 Morfologia Gerada nos Ensaio Tribológicos

As imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas de NBR, ensaiados com mancais fixos e livres com ou sem a aplicação de óleo lubrificante são apresentados nas figuras 35, 36, 37 e 38. As setas verticais, apresentadas nas imagens, indicam a direção de deslizamento da haste metálica nos polímeros.

A figura 35 apresenta a superfície desgastada de NBR obtida em ensaios não lubrificado e com mancais fixos.

A morfologia do desgaste apresentada na figura 35 (a-b) evidencia a presença de partículas de desgaste (*debris*) próximo da zona de contato. Na figura 35 (c-d) é observado que na superfície do NBR ocorre a formação de ondas.

Morfologias semelhantes foram obtidas por LIMA DA SILVA (2006), ao estudar os mecanismos de desgaste de poliuretano sob diferentes pressões de contato.

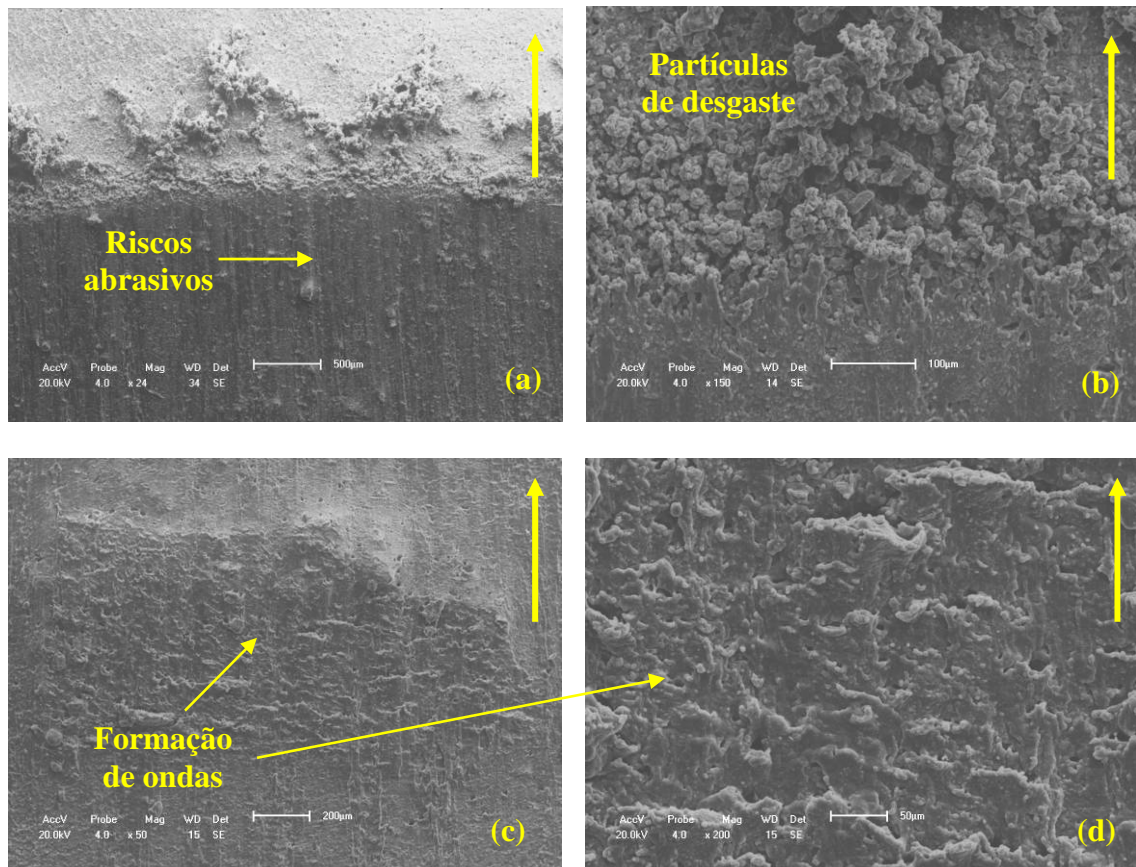


Figura 35 – Imagem da superfície de NBR desgastada no ensaio a seco e com mancais fixos.

A figura 36 apresenta as imagens da superfície desgastada de NBR, ensaiado com mancais fixos e lubrificado em um único ponto após 1750 metros de distância de deslizamento. A lubrificação aplicada uma única vez durante o ensaio promove mudanças na morfologia do desgaste.

Na figura 36 (a-b) é observado o fenômeno de deformação plástica com formação de proa. O mecanismo de fadiga é evidenciado pela formação de ondas na superfície desgastada 36 (c-d).

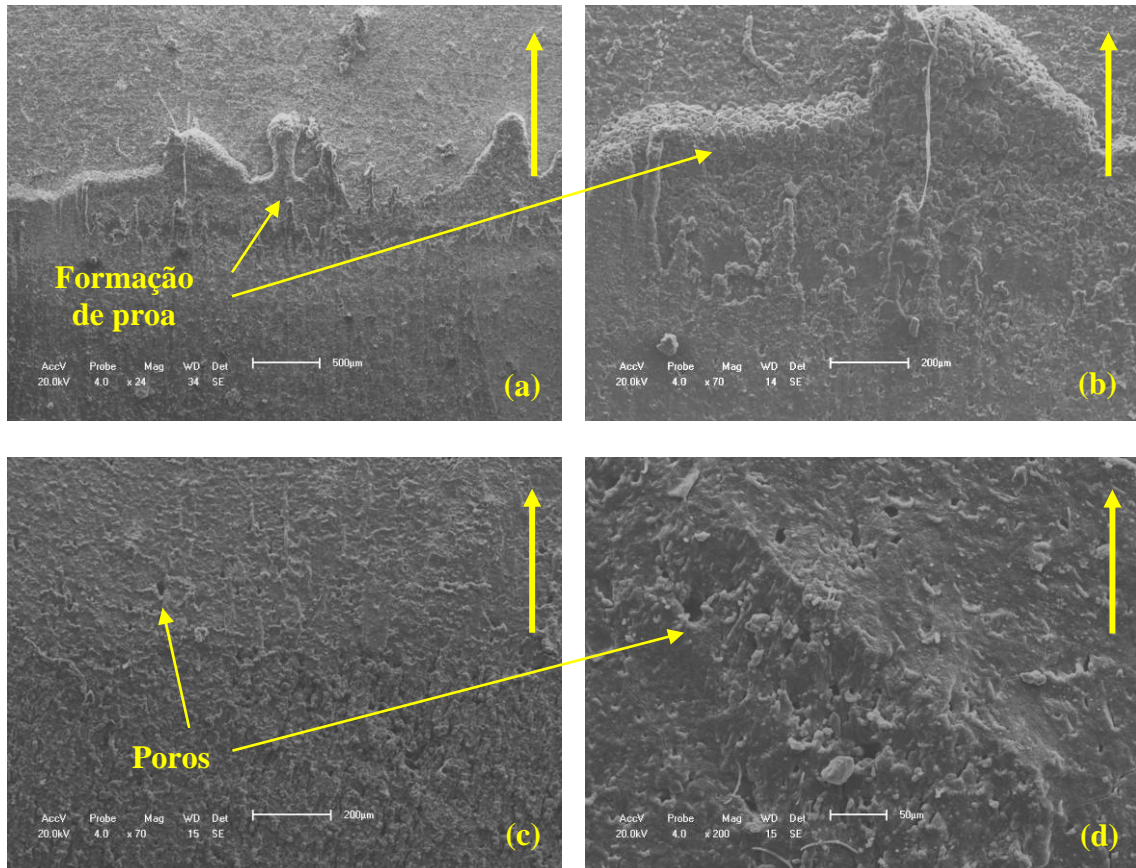


Figura 36– Imagem da superfície desgastada de NBR após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais fixos.

A figura 37 apresenta as imagens da superfície desgastada de NBR ensaiado com mancais livres e em condições de deslizamento seco.

Observando a figura 37 (b), verifica-se a presença de ondas na superfície desgastada indicando que existem similaridades entre a morfologia da superfície desgastada em mancais livres e fixos. Percebe-se ainda a presença de poros e partículas de desgaste na forma esférica.

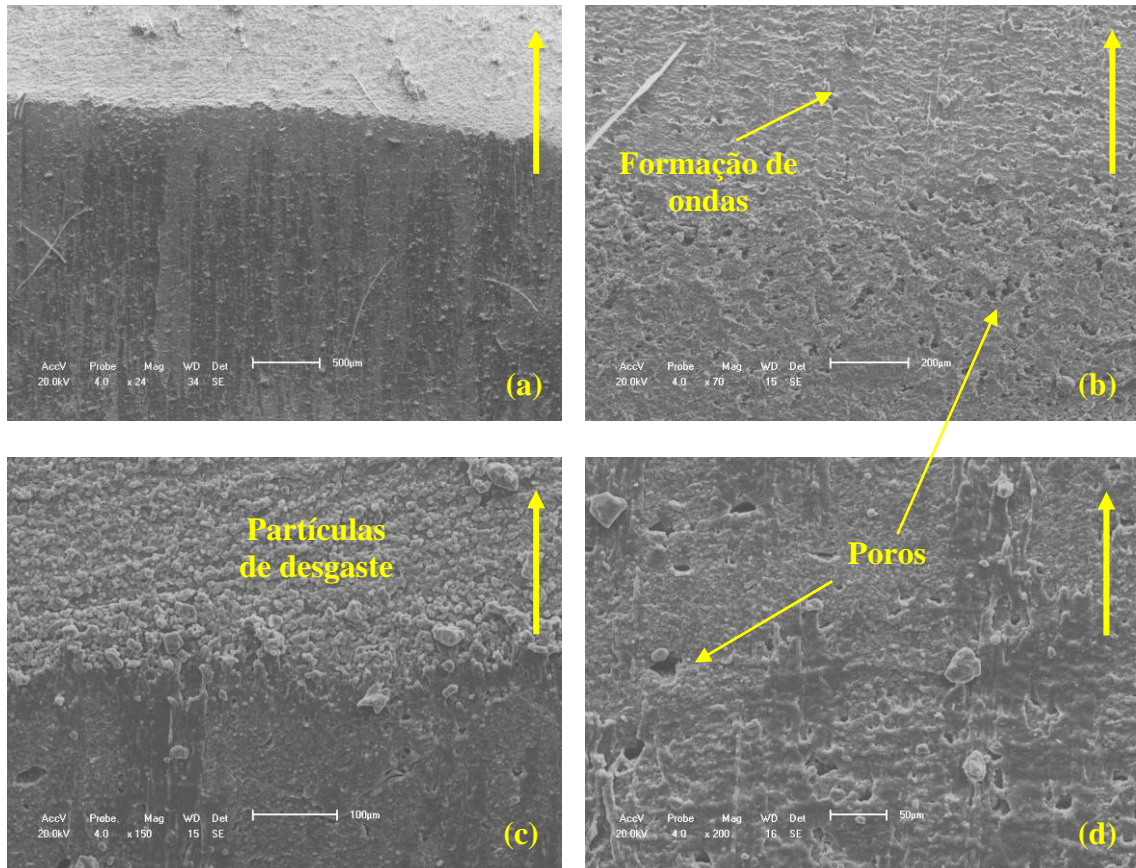


Figura 37 – Imagem das superfícies de NBR após ensaios de desgaste a seco e com mancais livres.

A figura 38 apresenta as imagens da superfície desgastada de NBR ensaiado com mancais livres e em condições de deslizamento lubrificado.

Neste caso são encontrados riscos de abrasão discretos, partículas de desgaste em forma de rolos e o mecanismo de formação de ondas.

Segundo STACHOWIAK e BATCHELOR (1996), a formação de rolos, característico de materiais elastoméricos, pode ocorrer sempre que o desgaste por abrasão estiver presente e é resultado de grandes deformações antes da fratura. Em comparação a outros mecanismos de formação de partículas, o mecanismo de formação de rolos requer maior quantidade de atrito para formar uma partícula de desgaste.

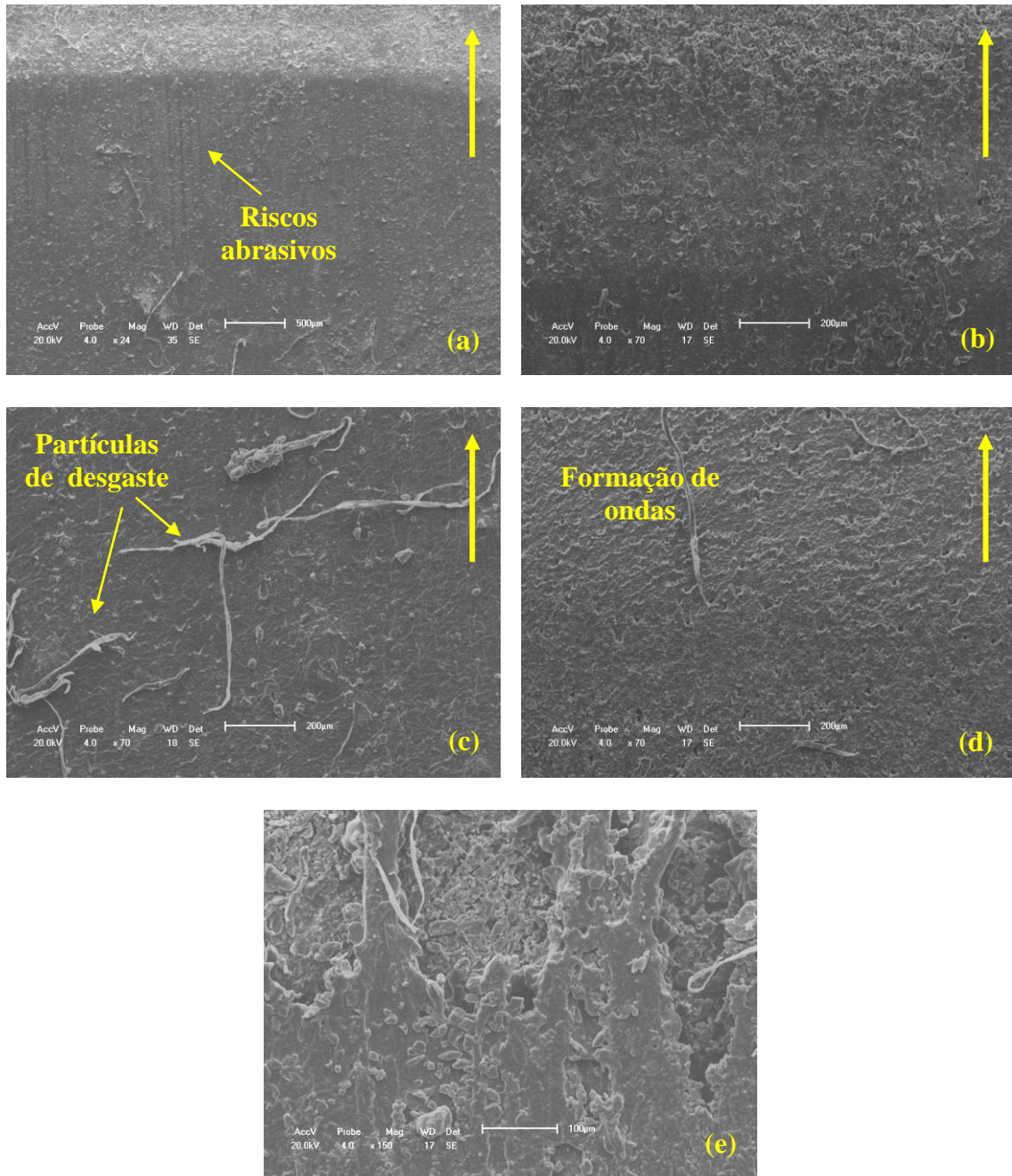


Figura 38 – Imagem da superfície desgastada de NBR após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais livres.

No estudo desenvolvido por KARGER-KOCSIS *et al.* (2008), para avaliar o comportamento tribológico de termoplásticos contra aço, foi observado a presença de ondas de Schallamach, gerado pelo carregamento cíclico.

As imagens das superfícies desgastadas de PTFE, ensaiados com mancais fixos e livres com ou sem a aplicação de óleo lubrificante são apresentados nas figuras 39, 40 e 41. As setas verticais, apresentadas nas imagens, indicam a direção de deslizamento da haste metálica nos polímeros.

Na figura 39 (a), referente à superfície desgastada de PTFE em mancais fixos e a seco, apresenta textura lisa e partículas finas de desgaste. Em 39 (b), observa-se o corte da partícula desgastada próximo a região de delaminação.

A análise realizada por EDS, na região indicada na figura 39 (c), evidenciou a presença do flúor, um dos principais elementos na composição do PTFE. Além disso, um pequeno pico de alumínio deixa indícios de contaminação da superfície.

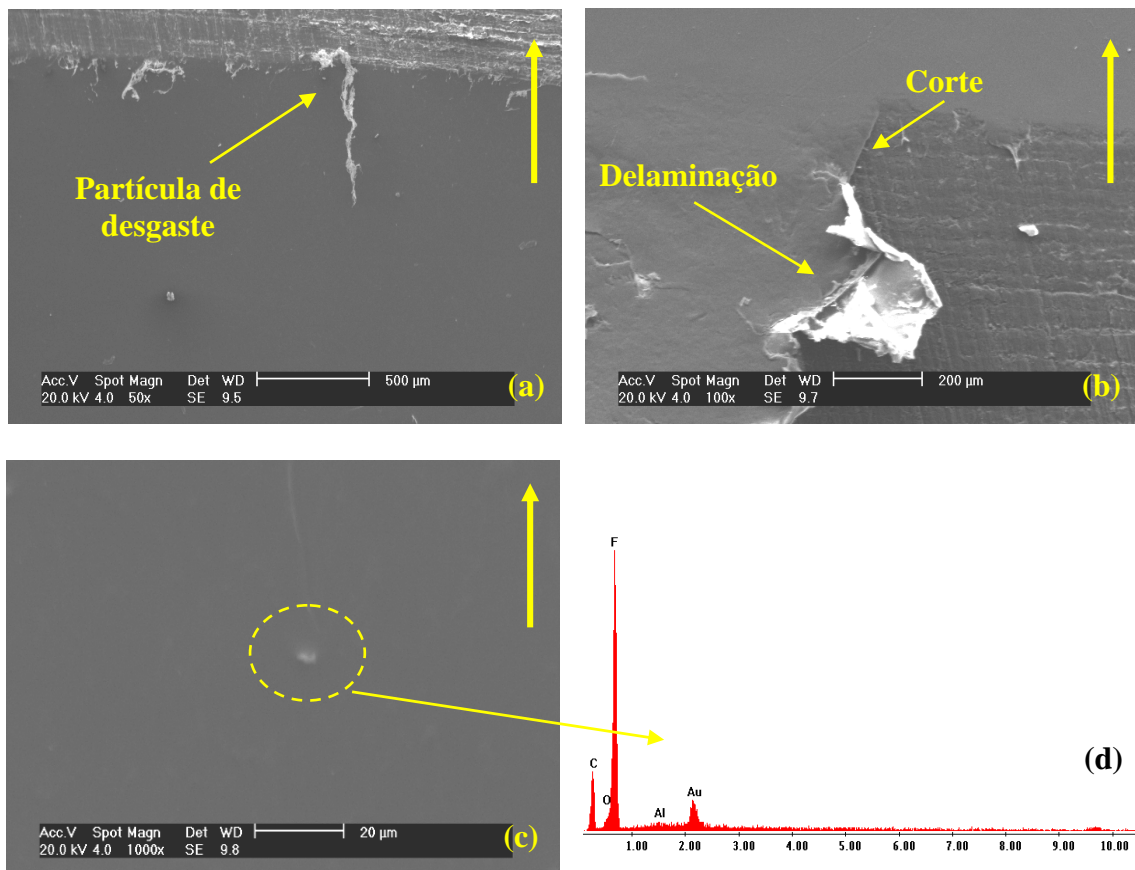


Figura 39 – Imagem da superfície de PTFE desgastada no ensaio a seco e com mancais fixos (a-c), e microanálise por EDS (d).

Para o PTFE, ensaiado com mancais fixos e lubrificados em um único ponto após 1750 metros de distância de deslizamento, o procedimento de metalização impossibilitou a visualização da superfície desgastada devido a formação de um filme de recobrimento mais espesso do que deveria.

A figura 40 apresenta as imagens da superfície desgastada do PTFE, ensaiado com mancais livres sob deslizamento seco.

Assim como para mancais fixos, a superfície desgastada de PTFE em mancais livres apresenta textura lisa. É observada, ainda, a presença de deformação plástica com microtrincas e delaminação.

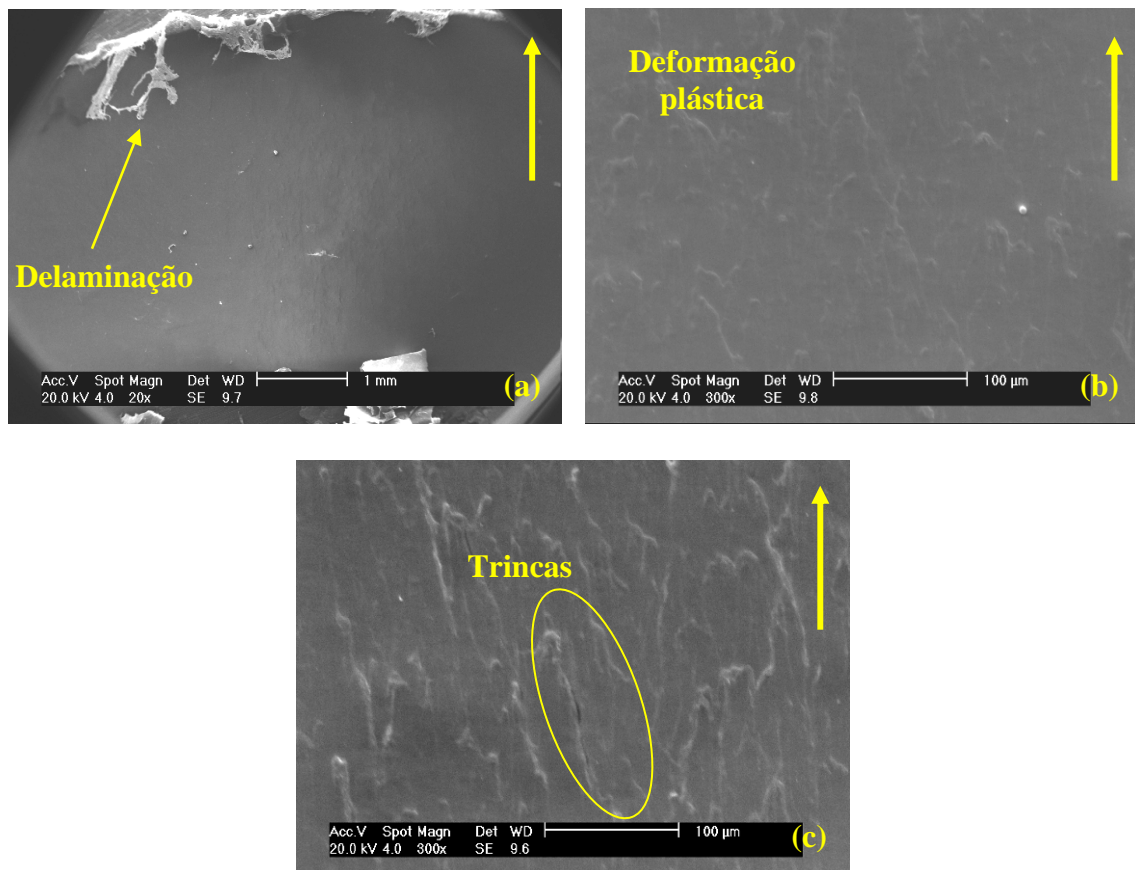


Figura 40 – Imagem das superfícies de PTFE após ensaios de desgaste a seco e com mancais livres.

JIA *et al.* (2007) ao estudar o desgaste por deslizamento entre PTFE, PA66 e PPS sob condições de atrito seco e lubrificado com óleo observou que as superfícies desgastadas de PTFE sob condições de atrito de atrito seco é caracterizada por riscos paralelos à direção de deslizamento. Já as superfícies desgastadas de PA66 e PPS são macias, e apresentam marcas de deformação plástica verificando-se ainda a ausência de debris.

Observa-se na figura 41, entretanto, que comportamento similar ao do PTFE é encontrado nas amostras ensaiadas com mancais livres e lubrificadas uma única vez, após 1750 metros de distância de deslizamento.

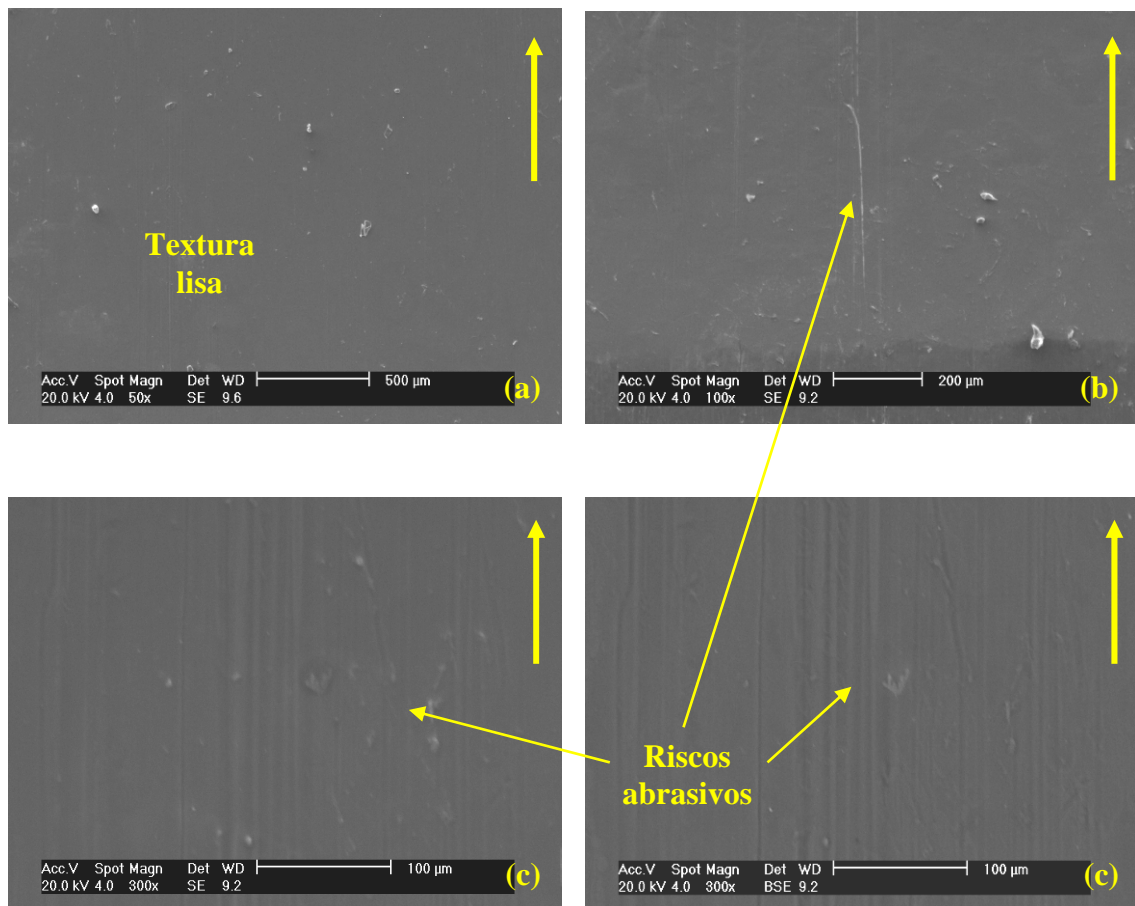


Figura 41 – Imagem da superfície desgastada de PTFE após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais livres.

As imagens das superfícies desgastadas de PTFE grafitado, ensaiados com mancais fixos e livres com ou sem a aplicação de óleo lubrificante são apresentados nas figuras 42, 43, 44 e 45. As setas verticais, apresentadas nas imagens, indicam a direção de deslizamento da haste metálica nos polímeros.

Na figura 42, é observado desgaste por deformação plástica e a formação de lâminas (delaminação) na proa de desgaste do PTFE grafitado. As melhores condições de deslizamento deste material promovem a formação de lâminas de dimensões menores que no PTFE puro.

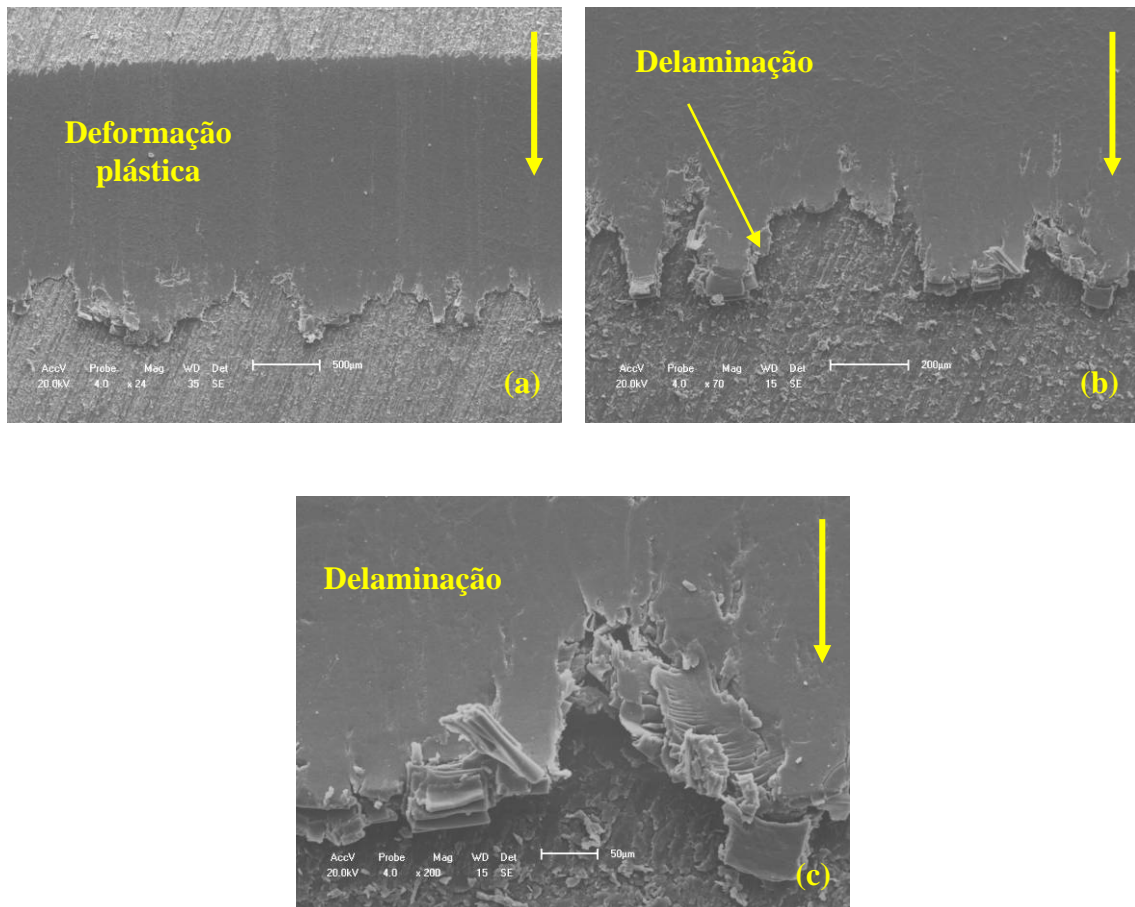


Figura 42 – Imagem das superfícies de PTFE grafitado após ensaios de desgaste a seco e com mancais fixos.

SHI *et al.* (2008) estudou o comportamento tribológico devido a modificação superficial de compósitos de PTFE – nanofibras de carbono através do uso de agentes de acoplamento às fibras. Neste estudo, foi evidenciado que quanto melhor a modificação superficial realizada, menores são os danos decorrentes do processo de desgaste.

No presente estudo, tal comparação pode ser realizada entre o PTFE e o PTFE grafitado, uma vez que a adição de grafite melhora as propriedades de deslizamento.

A figura 43 apresenta as imagens das superfícies desgastadas dos polímeros PTFE grafitado, ensaiados com mancais fixos e com uma única aplicação de óleo lubrificante após 1750 metros de distância de deslizamento.

As superfícies desgastadas de PTFE grafitado apresentadas nas figuras 43 (a-d) indicam a formação de trincas próximas à borda da região desgastada devido ao processo de fadiga. São observados pequenos debris esféricos próximos a região fraturada e delaminação.

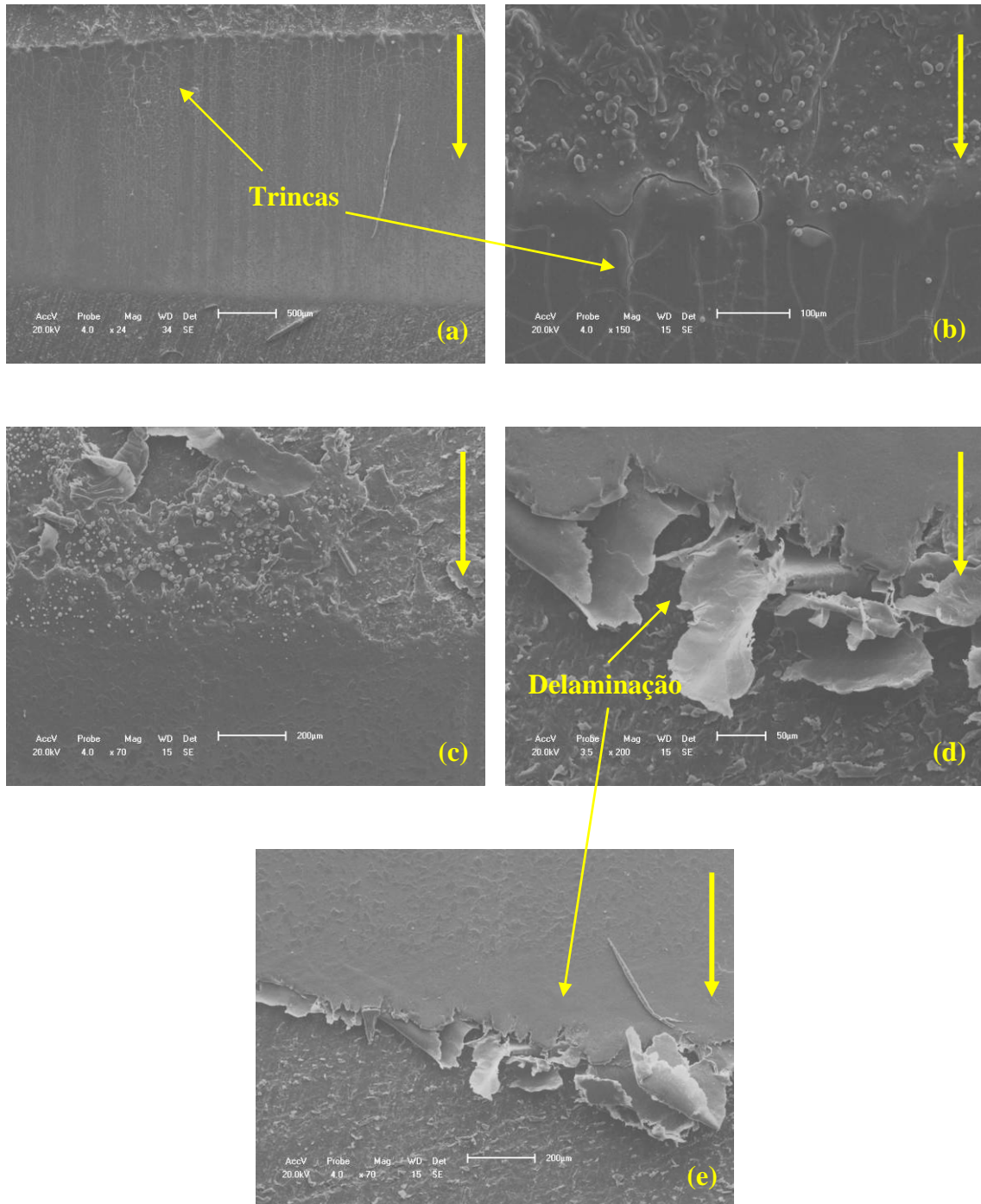


Figura 43 – Imagem da superfície desgastada de PTFE grafitado após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais fixos.

A figura 44 apresenta as imagens da superfície desgastada do PTFE grafitado, ensaiados com mancais livres em ensaios a seco. As setas verticais, apresentadas nas imagens, indicam a direção de deslizamento da haste metálica nos polímeros.

Uma superfície lisa com a presença de partículas destacadas devido à deformação plástica é encontrada na superfície de PTFE grafitado ensaiado com mancais livres.

Adicionalmente, observa-se a presença de riscos abrasivos ou microsulcamentos na superfície desgastada.

A microanálise por EDS na figura 44 (d) indica a existência de carbono na região escura da imagem 44 (c). Tais regiões podem representar o carbono adicionado à matriz de PTFE.

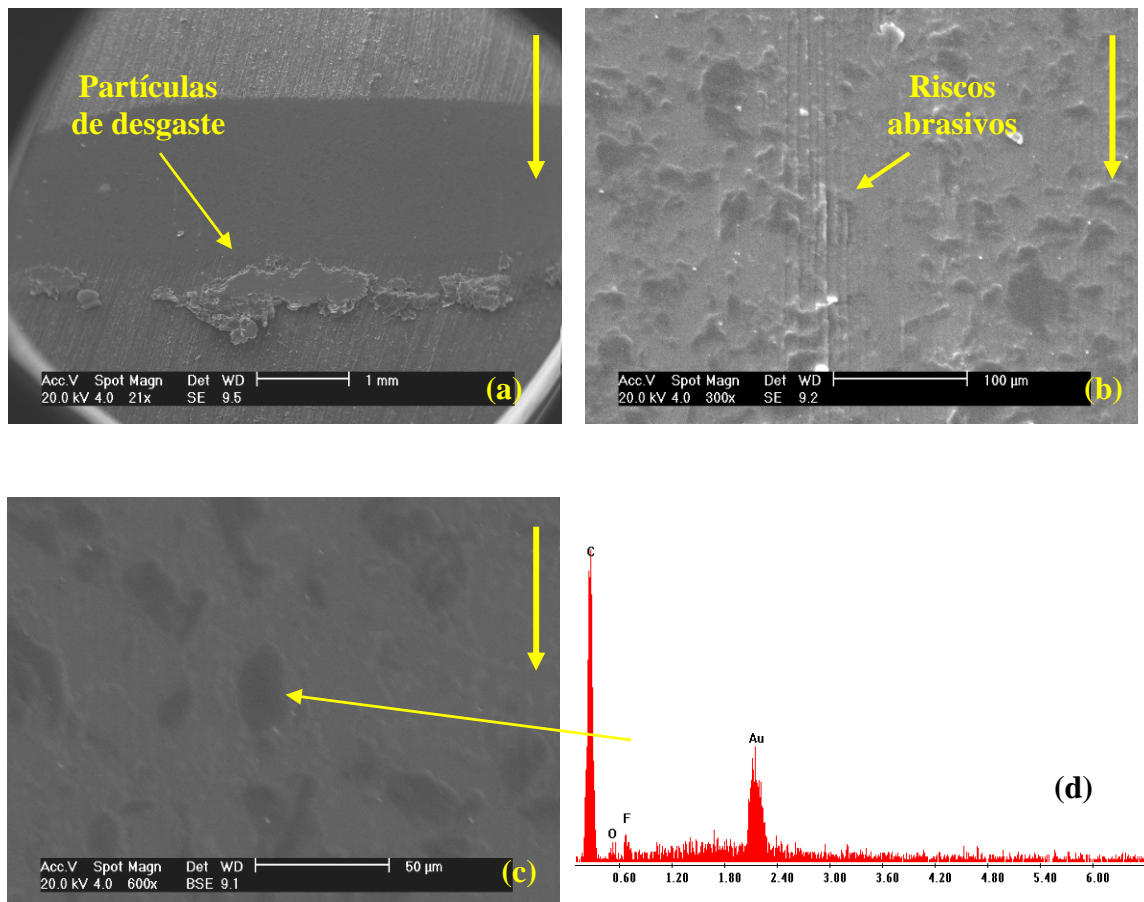


Figura 44 – Imagem das superfícies de PTFE grafitado após ensaios de desgaste a seco e com mancais livres.

A figura 45 apresenta as imagens da superfície desgastada do PTFE grafitado, ensaiado com mancais livres e com uma única aplicação de óleo lubrificante após 1750 metros de distância de deslizamento.

O uso do lubrificante reduziu a presença de riscos abrasivos, entretanto, verifica-se a existência de delaminação e de partículas de desgaste aderidas a superfície devido o processo de deformação plástica.

YO, *et al* (2008), estudou o comportamento tribológicos de PA66 e PA 66/SEBS-g-MA em contato seco e lubrificado contra superfícies metálicas. Foi encontrado, neste estudo,

que em contato seco os polímeros apresentaram traços de fluxo plástico (deformação plástica) e riscos (microsulcamento).

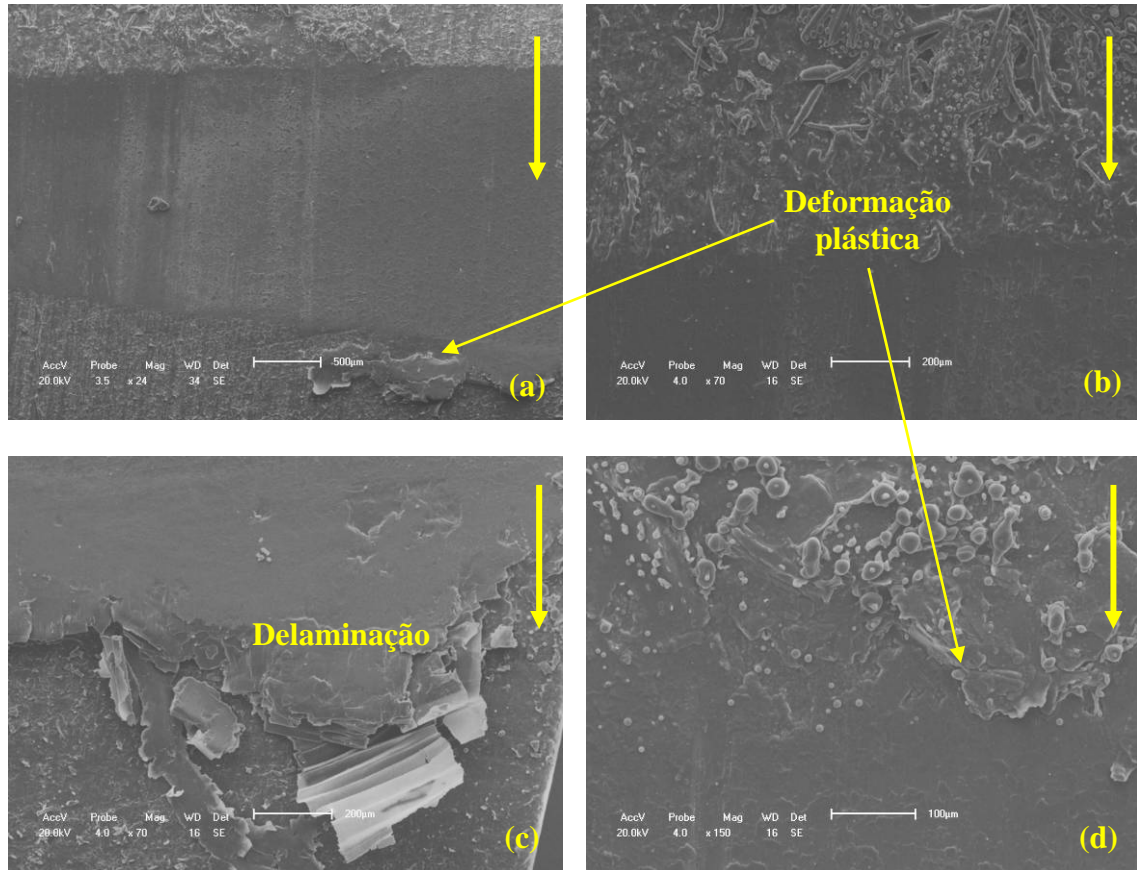


Figura 45 – Imagem da superfície desgastada de PTFE grafitado após ensaio com aplicação de lubrificante (óleo SAE 15W40) e com mancais livres.

Tabela 6 – Resumo das principais características morfológicas encontradas nas superfícies de NBR e PTFE.

Material	Condição de Ensaio	Morfologia Superficial	
Borracha Nitrílica (NBR)	Mancais Fixos	Seco	<i>Microsulcamento (riscos abrasivos); Debris; Formação de ondas;</i>
		Lubrificado	<i>Deformação plástica/ formação de proa; Poros (fadiga).</i>
	Mancais Livres	Seco	<i>Formação de ondas; Debris esféricos; Poros.</i>
			<i>Debris em forma de rolos; Deformação plástica;</i>
		Lubrificado	<i>Microsulcamento (riscos abrasivos); Formação de ondas; Poros.</i>
Politetrafluoretileno (PTFE)	Mancais Fixos	Seco	<i>Textura lisa; Debris em forma de rolos; Corte; Delaminação; Presença alumínio.</i>
		Lubrificado	<i>Enrugamento; Superfície contaminada.</i>
	Mancais Livres	Seco	<i>Superfície lisa; Deformação plástica; Microtrincas.</i>
			Lubrificado

Tabela 7 – Resumo das principais características morfológicas encontradas nas superfícies de PTFE Grafitado.

Material	Condição de Ensaio	Morfologia Superficial	
Politetrafluoretileno Grafitado (PTFE Grafitado)	Mancais Fixos	Seco	<i>Deformação plástica;</i> <i>Delaminação na proa de desgaste.</i>
		Lubrificado	<i>Trincas (fadiga);</i> <i>Deformação plástica;</i> <i>Delaminação na proa de desgaste.</i>
	Mancais Livres		<i>Superfície lisa;</i>
		Seco	<i>Deformação plástica;</i> <i>Microsulcamento (riscos abrasivos).</i>
			<i>Superfície lisa;</i>
		Lubrificado	<i>Deformação plástica;</i> <i>Delaminação.</i>

4.3 Pressão de Contato Inferior

Os valores da pressão de contato inferior em função do material polimérico utilizado nos ensaios com mancais fixos e livres são apresentadas nas figuras 46 e 47. As dimensões das crateras de desgaste utilizadas no cálculo da pressão de contato inferior estão apresentadas no APÊNDICE A.

Os gráficos da pressão de contato inferior indicam que a aplicação de lubrificante retarda a diminuição da pressão de contato com o tempo de ensaio. Este fato ocorre devido a eficiência do lubrificante na redução da temperatura do sistema. De acordo com ZUM GAHR (1987), a pressão de contato de Hertz reduz com o aumento da temperatura da superfície devido à diminuição do módulo de elasticidade.

Na figura 46 observa-se, entretanto, que a pressão de contato obtida com o corpo-de-prova de PTFE grafitado, ensaiado a seco e com mancais fixos, é maior do que a encontrada no ensaio lubrificado. Este fato é explicado ao se observar a imagem da cratera de desgaste (APÊNDICE A, tabela 9) obtida no ensaio a seco, onde verifica-se que o par tribológico PTFE grafitado – aço AISI 52100 não estava totalmente em contato.

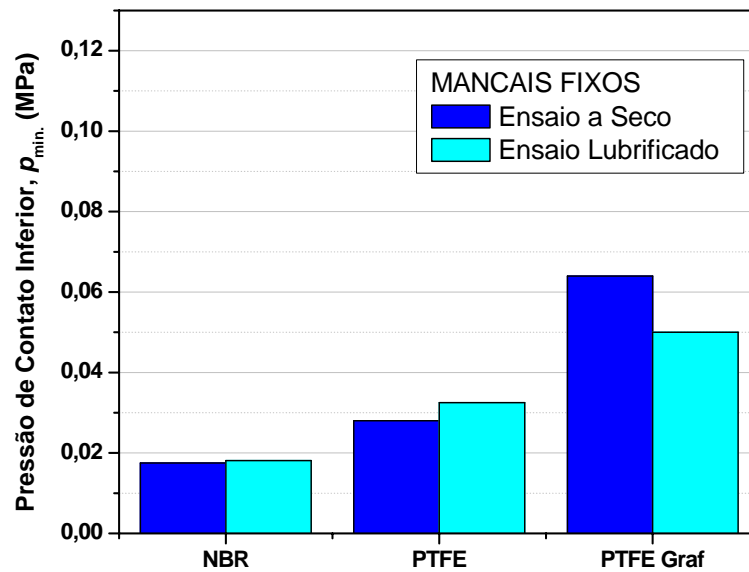


Figura 46 – Pressão de contato inferior, dos ensaios realizados com mancais fixos e carga de 3,15 N, em função do material dos corpos-de-prova.

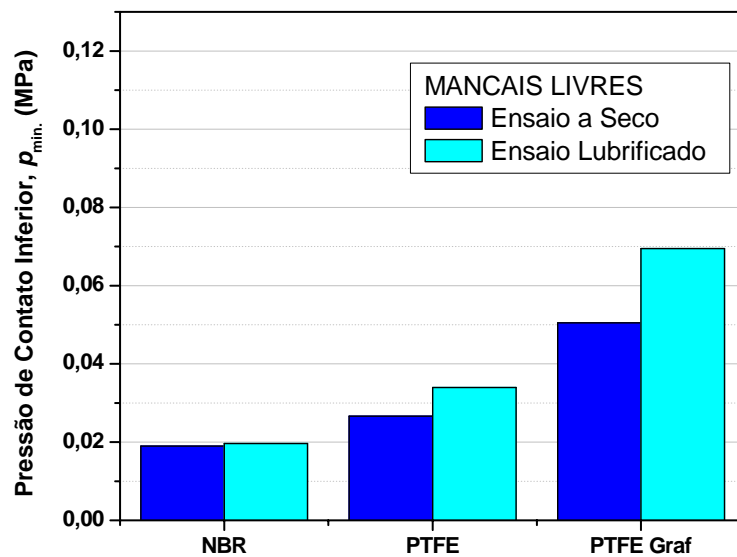


Figura 47 – Pressão de contato inferior, dos ensaios realizados com mancais livres e carga de 3,15 N, em função do material dos corpos-de-prova.

4.5 Análise Comparativa da Taxa de desgaste dos Polímeros

O gráfico da taxa de desgaste dos materiais poliméricos ensaiados com mancais fixos e em condições de deslizamento seco e lubrificado, apresentados na figura 48, indica que o PTFE grafitado sob condições de deslizamento seco apresenta melhor resistência ao desgaste. Entretanto, observa-se que a aplicação de óleo lubrificante aumentou a taxa de desgaste do PTFE e do PTFE grafitado em relação aos ensaios não lubrificados.

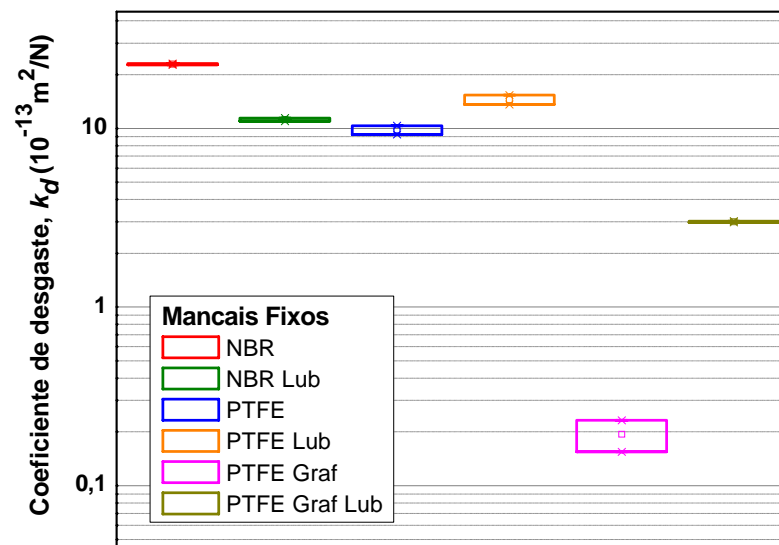


Figura 48 – Taxa de desgaste dos polímeros após ensaios com mancais fixos sob condições de deslizamento seco e lubrificado.

Nos ensaios realizados com mancais livres, figura 49, a taxa de desgaste diminuiu com a aplicação de óleo lubrificante, apresentando flutuações de aproximadamente uma ordem de grandeza entre polímeros do mesmo tipo. Neste caso, o PTFE grafitado sob condições de deslizamento lubrificado oferece maior resistência ao desgaste.

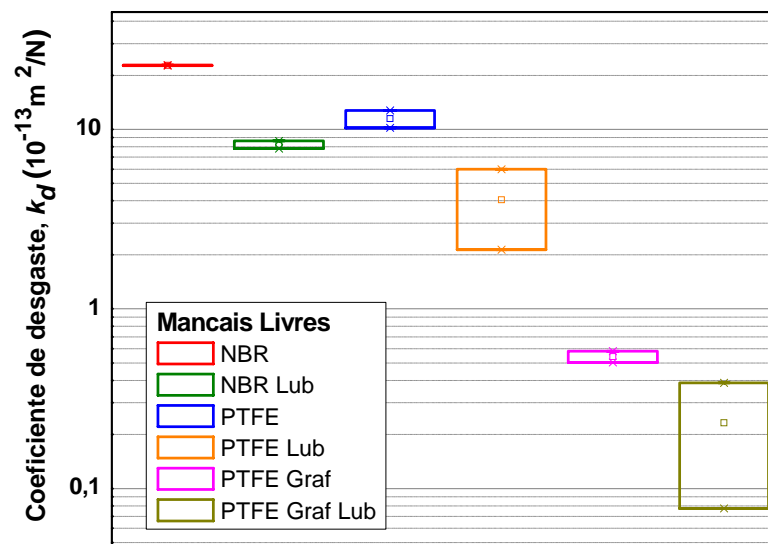


Figura 49 – Taxa de desgaste dos polímeros após ensaios com mancais livres sob condições de deslizamento seco e lubrificado.

Durante o deslizamento de polímeros contra superfícies metálicas, o desgaste é causado principalmente pelo processo de fadiga devido à ação repetida de rasgamento e propagação de trincas. Portanto, a resistência ao desgaste depende principalmente da

habilidade de deformação do polímero (resistência, dureza e trabalho de ruptura) e rigidez da cadeia (módulo de elasticidade) (ZSIDAI *et al.*, 2002).

De acordo com ZSIDAI *et al.*(2002), pode-se obter uma relação entre taxa de desgaste e propriedades do material tais como: tenacidade, dureza, alongação, módulo.

Segundo CASSU e FELISBERTI (2005), a análise dinâmico-mecânica permite a separação da contribuição elástica e viscosa em materiais viscoelásticos, em função tanto da temperatura como do tempo. O módulo de armazenamento corresponde ao módulo de elasticidade obtido em experimentos nos quais a mostra é submetida a estímulos unidirecionais (tração e compressão).

A tabela 8 compara o módulo de elasticidade, obtido por DMA, na temperatura ambiente com o módulo obtido em relação à média do pico máximo de temperatura de cada polímero próximo a região de contato. Verifica-se que apenas o NBR sofre variações no módulo em função da temperatura obtida nos ensaios descritos acima. Relacionando a taxa de desgaste com esta propriedade, verifica-se que o NBR apresenta maiores taxas de desgaste seguido, respectivamente pelo PTFE e PTFE grafitado.

Tabela 8 – Módulo de elasticidade dos polímeros em função da temperatura média de ensaio.

	NBR		PTFE		PTFE Graf	
	T _{amb}	T _{média} (51,3 °C)	T _{amb}	T _{média} (30,48 °C)	T _{amb}	T _{média} (30,1 °C)
E (GPa)	0,025	0,0225	0,8	0,8	1,02	1,02

Segundo TEVRUZ *apud* FEYZULLAHOGLU e SAFFAK (2007), rolamentos radiais de PTFE carregado com carbono reduzem amplamente o desgaste devido ao impedimento da deformação das ligações do PTFE.

5. Conclusões

- A metodologia desenvolvida e utilizada demonstrou ser reproduzível e eficaz para se avaliar comparativamente o desgaste abrasivo e adesivo de sistemas polímero-metal, lubrificados ou a seco;
- Antes dos ensaios, as medidas da dureza e da caracterização termogravimétrica e calorimétrica diferencial exploratória e dinâmico-mecânica dos polímeros geraram um conjunto de dados que distinguem os polímeros, ao revelar (a) as faixas de temperatura em que atuam as diferentes etapas de degradação dos polímeros e suas cargas minerais, (b) os respectivos picos exo e endotérmicos, (c) as propriedades elásticas e dissipativas dos polímeros ensaiados;
- Tais técnicas analíticas permitiram o correlacionamento entre o módulo de elasticidade, a faixa de temperatura, a dissipação de energia e a taxa de desgaste dos polímeros ensaiados;
- Constatou-se que a transição de um contato rotativo seco ou lubrificado não-conforme para conforme de polímeros-metal associou-se à variação na pressão de contato de Hertz, aos mecanismos e taxas de desgaste, à rigidez do contato e às taxas de aquecimento diferenciadas relativos aos diferentes pares tribológicos;
- A taxa de desgaste dos polímeros ensaiados com mancais livres diminuiu com o aumento do módulo de elasticidade e aplicação de óleo lubrificante;
- A presença do grafite como material de carga na matriz de PTFE sugeriu promover a redução do atrito e o aumento do módulo de elasticidade desse polímero que, ao contatar a superfície metálica deslizante apresentou menores variações de temperatura, indicando uma melhoria das condições de deslizamento;
- A quantificação do aquecimento do sistema em relação ao meio (história térmica próxima ao contato) demonstrou ser muito sensível à presença ou ausência de um

filme fluídico lubrificante e, portanto, ao registro associado à inserção de um filme lubrificante entre os sólidos em contato;

- A NBR apresentou maiores valores de aquecimento em relação aos demais polímeros, sugerindo maiores coeficientes de atrito;
- Consistente com as informações da literatura, as fracas ligações químicas existentes entre as cadeias de PTFE promoveram a sua delaminação durante os ensaios e, conseqüentemente, uma redução da temperatura do sistema, atribuída aos menores coeficientes de atrito desses pares tribológicos;
- Os principais mecanismos de dano observados (MEV) nas superfícies desgastadas foram (a) desgaste abrasivo e adesivo (PTFE grafitado), (b) desgaste adesivo, por formação de ondas e deformação plástica (NBR) e (c) desgaste por delaminação (PTFE).

6. Sugestões

1. Compreender e identificar evidências experimentais de diferentes mecanismos de desgaste de polímeros deslizando contra um aço gerando dados que permitam a sua modelagem.
2. Ampliar a investigação tribológica verificando a resposta térmica ao variar as condições de ensaio tais como carga e velocidade de deslizamento, construindo um mapa de avaliação tribológica;
3. Verificar quais mecanismos de dissipação de energia (resposta térmica e vibração) apresenta maior influência dos processos tribológicos de abrasão de polímeros.
4. Investigar os mecanismos de desgaste devido ao posicionamento do corpo-de-prova quanto à proximidade dos mancais, associando às medidas de vibração;
5. Investigar o comportamento da pressão de contato de Hertz em função das condições de uso dos mancais (rígidos ou desbalanceados) e sua influência na temperatura, morfologia e taxa de desgaste resultante.

7. Referências Bibliográficas

ASM HANDBOOK– Surface Engineering. Volume 5 ASM International 1994.

BET, L. – Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas Ópticas Tipo Seguidor. 1999. 243p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.

BHUSHAN, B. – The Engineering Handbook, 2000.

BRISCOE, B.J.; FIORI, L.; PELILLO, E. – Nano-indentation of polymeric surfaces. Journal Physics D: Applications Physics 31 (1998) 2395 – 2405. Dúvidas sobre como escrever esta referência.

BRYDSON, J.A. – Plastics Materials; I.J.A. Brydson. 7th ed. Library of Congress Cataloguing in Publication Data, 1999; 920p.

CASSU, S.N. e FELISBERTI, M.I – Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. Quim. Nova, vol. 28, No. 2, 255-263, 2005.

CHIAVERINI, V. – Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica, vol. 3, 2ª edição, São Paulo, McGraw-Hill, 1986.

CRAWFORD, R.J. – Plastics Engineering. Third edition 1998, Butterworth Heineman. Department of Mechanical, Aeronautical and Manufacturing Engineering, The Queen's University of Belfast

FEYZULLAHOGLU, E.; SAFFAK, Z. – The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions. Materials and Design 2007. Article in press.

HUTCHINGS, I.M. Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: British Library Cataloguing in Publication Data, 1992-a.

JIA, B.-B.; LI, T.-S.; LIU, X.-J.; CONG, P.-H. – Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions. *Wear* 262 (2007) 1353 – 1359.

KARGER-KOCSIS, J.; FELHÖS, D.; XU, D.; SCHLARB, A.K. – Unlubricated sliding and rolling wear of thermoplastic dynamic vulcanizates (Santoprene ®) against steel. *Wear* 265 (2008) 292 – 300.

KREVELEN, D. W. VAN – *Properties of Polymers – Their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions*. third edition, 1997. Elsevier.

LIMA DA SILVA, R.C. – *Mecanismos de desgaste de poliuretano em ensaios de microabrasão*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

MEDEIROS, J. T. N. – *Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico*; Tese de Doutorado apresentada a Escola Politécnica de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia, 2002.

MEYER, A.L.; SOUZA, G.P.; OLIVEIRA, S.M.; TOMCZAK, F.; WASILKOSKI, C.; PINTO, C.E. – Avaliação das Propriedades Termo-Mecânicas de Borracha Nitrílica após Ensaio de Compatibilidade de acordo com ASTM D 3455 – *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 3, p. 230 – 234, ABPol, São Carlos, Brasil – 2006.

MYSHKIN, N.K.; PETROKOVETS, M.I.; KOVALEV, A.V. – Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International* 38 (2005) 910 – 921.

NEALE, M. J. – *The Tribology Handbook*, Butterworth – Heinemann, second edition 1995.

PERSSON, B.N.J. – *Sliding Friction: Physical principles and applications*. Series: Nanoscience and technology. Springer 2000.

RAMALHO, A.; MIRANDA, J.C. – The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. *Wear* 260 (2006) 361 – 367.

ROSATO, D.V.; ROSATO, D.V. – *Plastics Engineered Product Design* – Elsevier 2003.

ROTTLER, J.; ROBBINS, M.O. – Macroscopic friction laws and shear yielding of glassy solids. *Computer Physics Communications* 169 (2005) 177 – 182.

SILVA, C.H. – Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina. Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia, 2003.

SHI, Y.; FENG, X.; WANG H.; LU X. – The effect of surface modification on the friction and wear behavior of carbon nanofiber – filled PTFE composites. *Wear* 264 (2008), 934 – 939.

STOETERAU, R.L. – *Tribologia*. UFSC 2004.

STACHOWIAK, G.W; BATCHELOR, AW. *Engineering Tribology*, 1996.

TOMANIK, E. – Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna. Tese de Doutorado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia, 2000.

VANSWIJGENHOVEN, E.; CUTULIC, S.; KENIS, K.; DE REGTER, G.; CROLS, O.; PENNING, P. – The effect of pneumatic gas pressure on the wear behavior of PTFE. *Wear*. 2007.

VERÁSTEGUI, R.N. – Análise da refusão superficial de aços por laser com altas taxas de resfriamento. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

YAMAGUCHI, Y. – *Tribology of Plastic Materials: Their Characteristics and Applications to Sliding Components*. Tribology Series 16, Elsevier 1990.

YANG, L.J. – A test methodology for the determination of wear coefficient. *Wear* 259 (2005); 1453 – 1461.

ZSIDAI, L. *et al* – The tribological behaviour of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens. *Wear* 253 (2002) 673 – 688.

ZUM GAHR, K-H. – *Microstructure and Wear of Materials*. Tribology Series 10, Institute of Materials Technology, University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, Elsevier 1987.

APÊNDICE A

Superfícies Poliméricas Desgastadas

As áreas de contato, utilizadas no cálculo da pressão de contato inferior, foram obtidas após os ensaios de desgaste através da medição das diagonais elípticas da cratera formada. A obtenção das imagens foi realizada com uma máquina digital Sony Syber-shot modelo DSC-P93 e uma lupa Olympus.

Tabela 9 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais fixos nas condições de ensaio a seco.

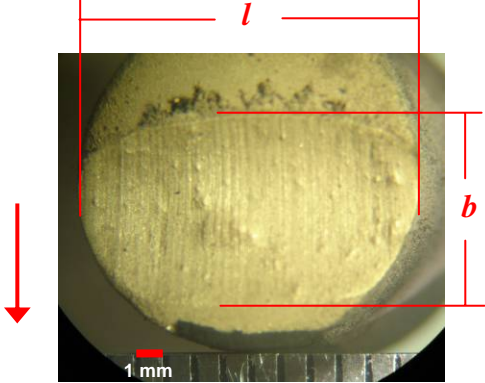
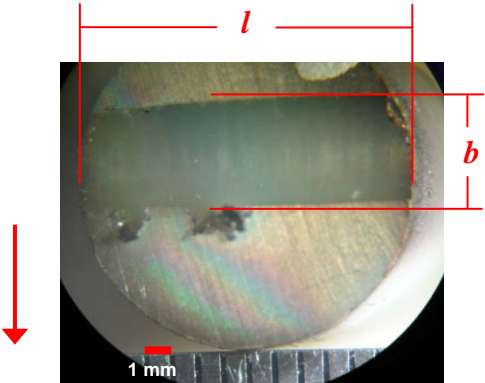
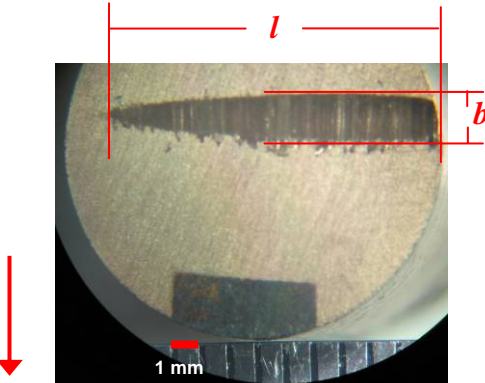
	NBR Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 6,60 mm
	PTFE Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 3,76 mm
	PTFE grafitado Comprimento (l) = 11,10 mm Largura (b) = 1,82 mm

Tabela 10 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais fixos e condições de deslizamento a seco.

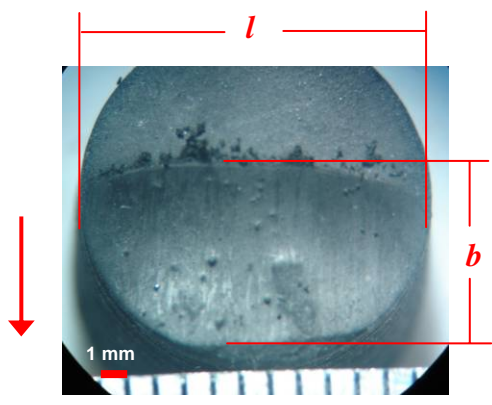
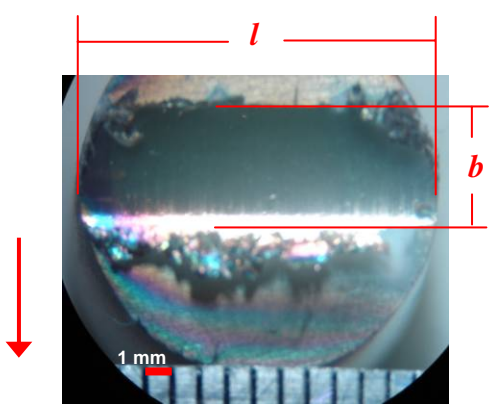
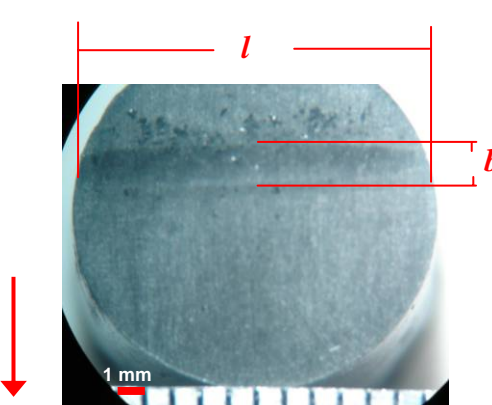
	NBR Comprimento (l) = 12,34 mm Largura (b) = 7,16 mm
	PTFE Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 4,70 mm
	PTFE grafitado Comprimento (l) = 12,25 mm Largura (b) = 2,28 mm

Tabela 11 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais fixos nas condições de ensaio lubrificado

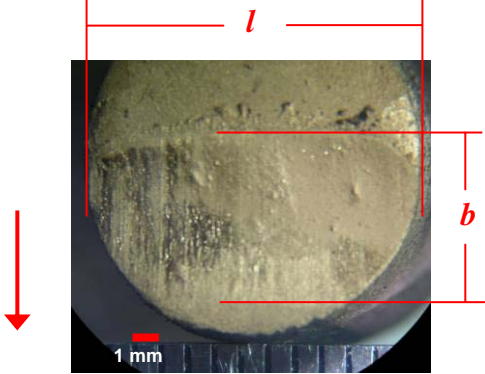
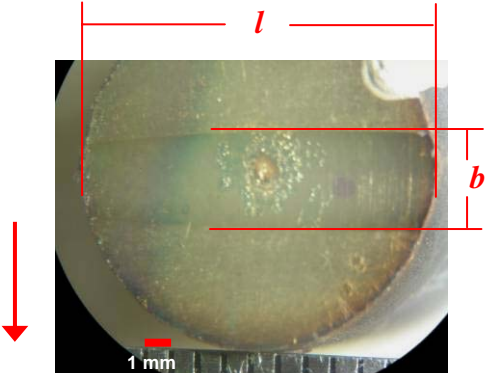
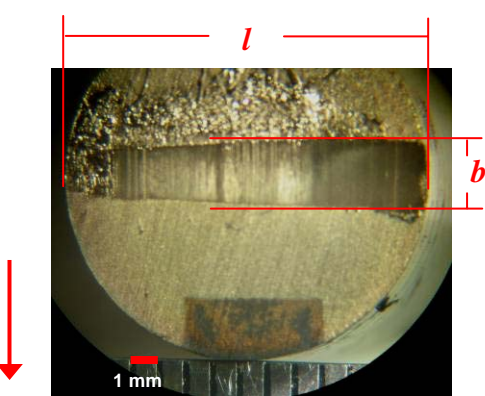
	NBR Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 6,18 mm
	PTFE Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 3,19 mm
	PTFE grafitado Comprimento (l) = 13,01 mm Largura (b) = 2,72 mm

Tabela 12 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais fixos e condições de deslizamento lubrificado.

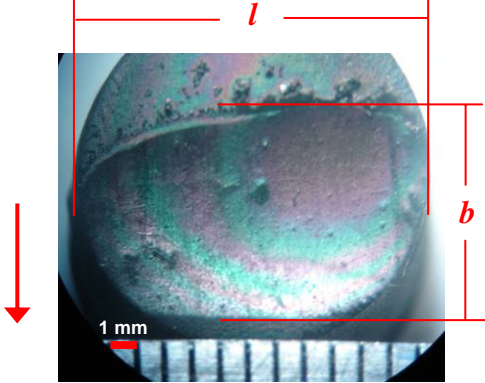
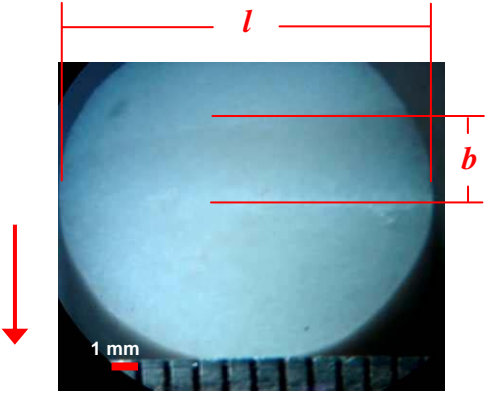
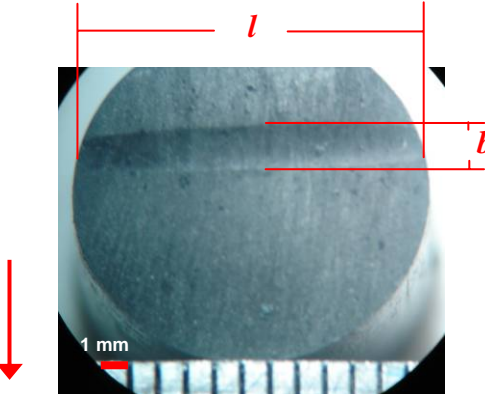
	NBR Comprimento (l) = 12,57 mm Largura (b) = 6,94 mm
	PTFE Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 3,97 mm
	PTFE grafitado Comprimento (l) = 12,80 mm Largura (b) = 2,07 mm

Tabela 13 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais livres nas condições de ensaio a seco

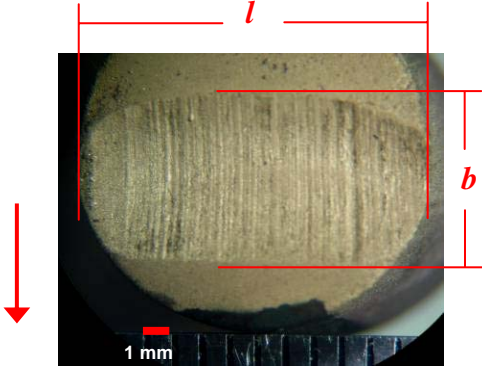
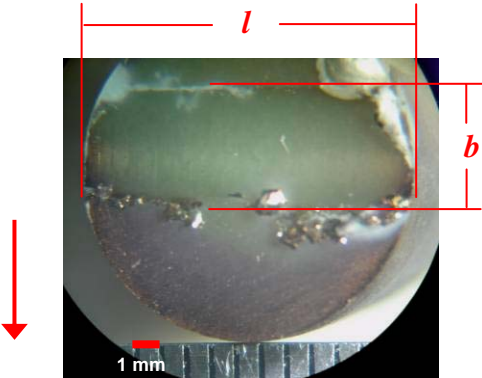
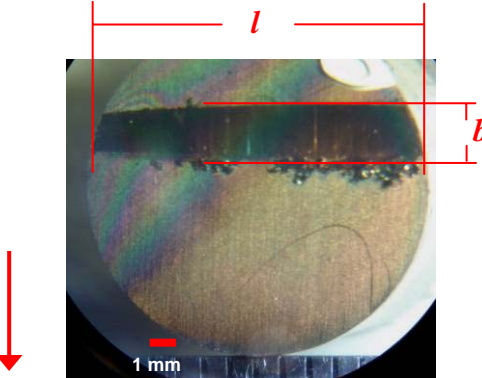
	NBR Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 6,16 mm
	PTFE Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 4,34 mm
	PTFE grafitado Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 2,10 mm

Tabela 14 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais livres e condições de deslizamento a seco.

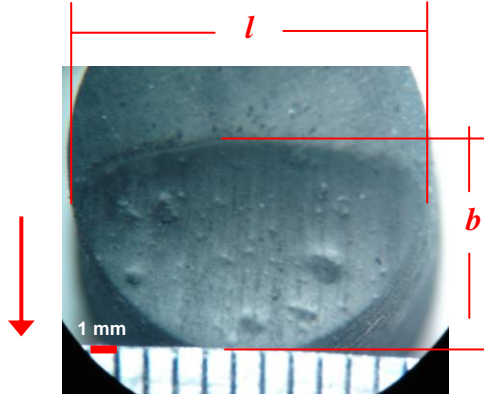
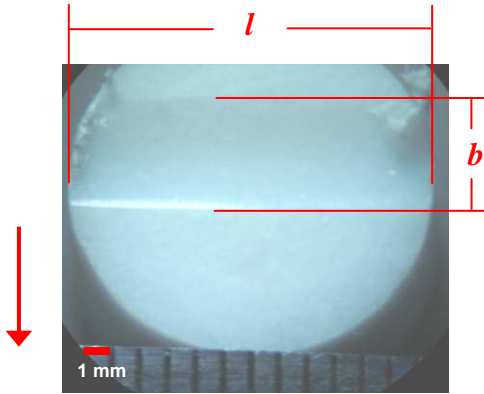
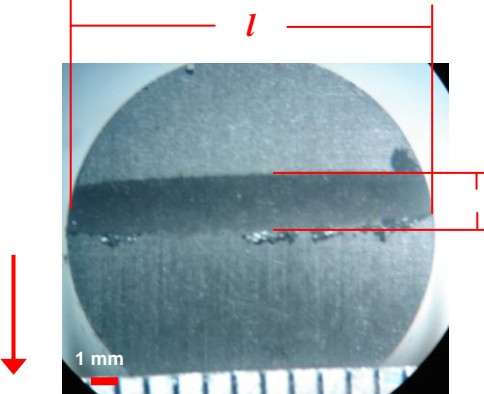
	NBR Comprimento (l) = 12,38 mm Largura (b) = 6,46 mm
	PTFE Comprimento (l) = 13 mm Largura (b) = 4,40 mm
	PTFE grafitado Comprimento (l) = 12,85 mm Largura (b) = 2,55 mm

Tabela 15 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado para mancais livres nas condições de ensaio lubrificado

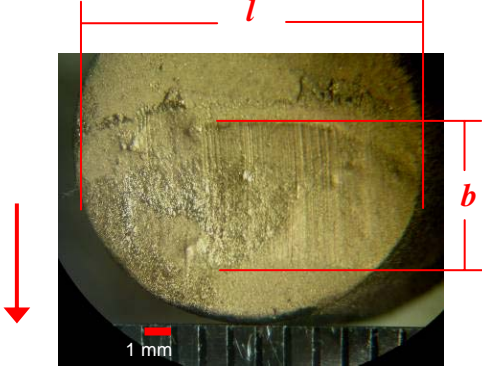
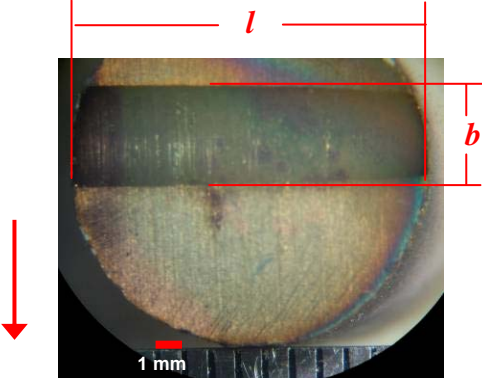
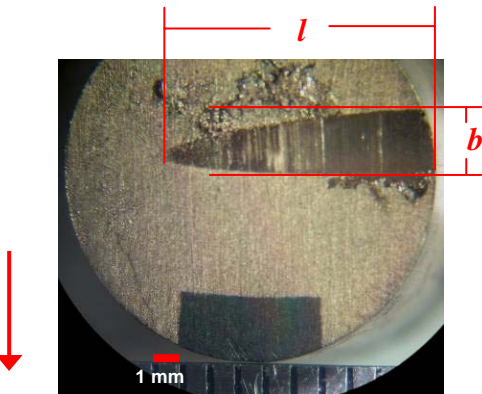
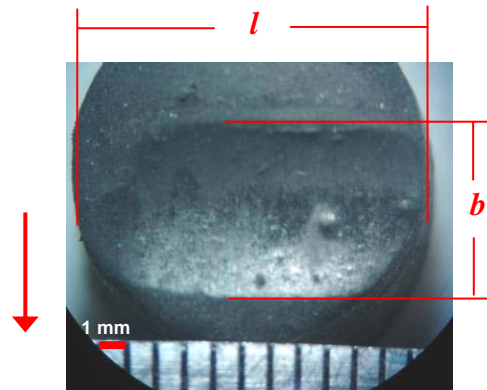
	<p>NBR</p> <p>Comprimento (l) = 13 mm</p> <p>Largura (b) = 5,79 mm</p>
	<p>PTFE</p> <p>Comprimento (l) = 13 mm</p> <p>Largura (b) = 3,26 mm</p>
	<p>PTFE grafitado</p> <p>Comprimento (l) = 8,67 mm</p> <p>Largura (b) = 2,33 mm</p>

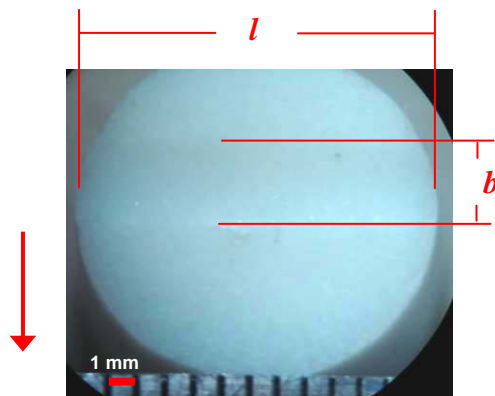
Tabela 16 – Superfícies desgastadas de NBR, PTFE e PTFE grafitado referente a repetição dos ensaios com mancais livres e condições de deslizamento lubrificado.



NBR

Comprimento (l) = 12,21 mm

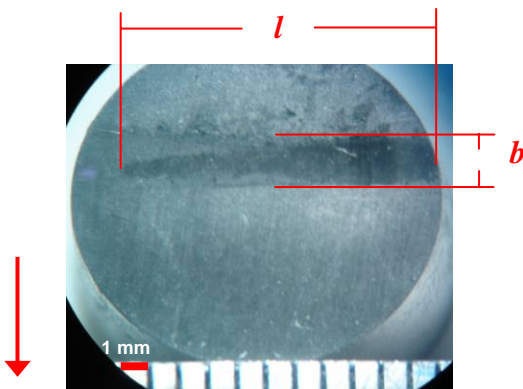
Largura (b) = 6,39 mm



PTFE

Comprimento (l) = 13 mm

Largura (b) = 3,67 mm



PTFE grafitado

Comprimento (l) = 10,48 mm

Largura (b) = 2,26 mm