

DIEGO HERNAN GIRALDO VASQUEZ

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE TRÊS MATERIAIS
TERMOPLÁSTICOS SUBMETIDOS A DESGASTE POR
DESILZAMENTO A SECO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

**São Paulo
2003**

DIEGO HERNAN GERALDO VASQUEZ

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE TRÊS MATERIAIS
TERMOPLÁSTICOS SUBMETIDOS A DESGASTE POR
DESLIZAMENTO A SECO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

São Paulo

2003

Aos meus pais, Evelia e Mário, pela compreensão
infinita e apoio incondicionais em todos os
momentos da minha vida.
Ao meu irmão Mário Alejandro, que me motiva para
melhorar sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos via processo 132181/2001-0 (bolsa de mestrado).

Ao Prof. Dr. Roberto Martins de Souza, por sua orientação durante o último ano, confiando-me a realização deste trabalho, e mostrando sempre disposição para discutir e corrigir o trabalho realizado.

Ao Prof. Dr. Amilton Sinatora, pelas proveitosas sugestões nas várias etapas de realização deste trabalho.

As minhas amigas Carmen Elena Patão e Claudia Patricia Ossa que me apoiaram em momentos importantes do mestrado.

A Silene Carneiro e Sidney Carneiro, que sempre estiveram dispostos a me ajudar no que for preciso.

Aos colegas técnicos, mestrando e doutorandos do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Depto. de Eng. Mecânica, pelas experiências compartilhadas e pelo companheirismo, solidariedade e paciência que me foram destinados durante momentos importantes da realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE ACRÔNIMOS DE MATERIAIS PLÁSTICOS REFERENCIADOS	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Plásticos e polímeros	4
2.1.1. Considerações iniciais	4
2.1.2. Os termoplásticos	5
2.1.3. Cristalinidade	6
2.1.4. Temperatura de fusão e temperatura de transição vítrea	8
2.1.5. Viscoelasticidade	11
2.1.5.1. Fluidez	11
2.1.5.2. Modelo dos quatro elementos para a viscoelasticidade	13
2.1.5.3. Relaxação de tensão	16
2.1.6. Deformação plástica em polímeros semi-cristalinos.	18
2.1.7. Comportamento dinâmico-mecânico e energia de amortecimento	21
2.2. Tribologia dos polímeros	26
2.3. Atrito dos materiais termoplásticos	28
2.3.1. Mecanismos de atrito	28
2.3.2. Efeito da Energia de superfície	30
2.4. Desgaste por deslizamento nos termoplásticos	31
2.4.1. Transferência "normal" em plásticos deslizando com metais	34
2.4.2. Transferência lamelar	35
2.4.3. Transferência por Fusão	36
2.4.4. Abrasão	37
2.4.5. Fadiga	39
2.4.6. Adesão	40
2.5. Relação entre propriedades dinâmico-mecânicas e comportamento	

42	tribológico dos termoplásticos .	
42	2.6. Influência dos parâmetros do sistema no comportamento tribológico dos	
42	termoplásticos	
39	2.6.1. Velocidade de deslizamento	
44	2.6.2. Carga aplicada	
46	2.6.3. Temperatura de contato	
51	3 OBJETIVOS	
51	3.1. Objetivo Geral	
51	3.2. Objetivos Específicos	
52	4 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	
52	4.1. Materiais	
51	4.1.1. Discos de Aço Inoxidável com Nitrogênio	
53	4.1.2. Termoplásticos utilizados	
55	4.1.2.1. UHMWPE	
57	4.1.2.2. POM	
59	4.1.2.3. PA6.6	
61	4.2. Caracterização dos corpos-de-prova	
63	4.2.1. Rugosidade	
64	4.2.2. Microdureza Instrumentada	
66	4.2.3. Dureza Vickers	
67	4.3. Ensaio Tribológico	
69	4.3.1. Estimativa da temperatura no contato	
71	4.3.2. Condições de ensaio	
74	4.3.3. Coeficiente de atrito cinético e taxa de desgaste	
81	4.3.4. Perda de massa	
82	4.3.5. Observação das Superfícies Desgastadas	
83	5 RESULTADOS	
83	5.1. Caracterização dos corpos-de-prova	
83	5.1.1. Disco de aço inoxidável com nitrogênio	
83	5.1.1.1. Composição química	
84	5.1.1.2. Análise metalográfica	
84	5.1.1.3. Dureza Vickers	
85	5.1.1.4. Rugosidade	
86	5.1.2. Caracterização dos materiais termoplásticos	

179	7 CONCLUSÕES
177	6.3. Aplicabilidade dos resultados
175	6.2.4. Perda de massa
172	6.2.3. Desgaste
169	6.2.2. Coeficiente de atrito
167	6.2.1. Temperatura na região de contato durante os ensaios
167	6.2. Resultados do ensaio pino-contra-disco
165	6.2.4. Fluência
164	6.2.3. Análise Dinâmica-Mecânica
161	6.2.2. Ensaios de Microdureza Instrumentada
160	6.1. Dureza
159	6.1. Propriedades mecânicas e mecânico-dinâmicas dos termoplásticos
159	6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS
151	5.2.5.3. PA6.6
144	5.2.5.2. POM
137	5.2.5.1. UHMWPE
136	5.2.7. Imagens das superfícies dos pinos
135	5.2.6. Perda de massa
131	5.2.5. Ensaios pino-contra-disco com fusão do PA6.6
130	5.2.4.4. Efeito da temperatura na taxa de desgaste
128	5.2.4.3. Efeito da condigão PV na taxa de desgaste
125	5.2.4.2. Efeito da velocidade na taxa de desgaste
122	5.2.4.1. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste
119	5.2.4. Taxa de desgaste
112	5.2.3. Ensaios de Fluência à Temperatura ambiente
111	5.2.2.3. Efeito da condigão PV no coeficiente de atrito
108	5.2.2.2. Efeito da velocidade no coeficiente de atrito
107	5.2.2.1. Efeito da carga aplicada no coeficiente de atrito
105	5.2.2. Coeficiente de atrito
95	5.2.1. Temperatura no pino durante os ensaios
94	5.2. Ensaios de desgaste
90	5.1.2.3. Ensaios de Comportamento Dinâmico-Mecânico
86	5.1.2.2. Ensaio Instrumentado de Microdureza
86	5.1.2.1. Dureza Vickers

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

184

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo experimental das respostas de coeficiente de atrito e desgaste encontradas em sistemas deslizantes a seco. Para tanto, foram realizados ensaios de deslizamento em um equipamento pino-contra-disco com movimento relativo contínuo entre as amostras, na configuração de pinos de material termoplástico e disco de aço inoxidável com nitrogênio. Os materiais termoplásticos ensaiados foram o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE), o poli(óxido de metileno) (POM) e a poliamida 6.6. (PA6.6). Foram usadas três condições de carga aplicada e três condições de velocidade de deslizamento. O coeficiente de atrito e a perda de altura dos pinos foram monitorados ao longo dos ensaios. O desgaste foi estudado por estimativa da taxa de desgaste considerando a fluência de material polimérico e por microscopia óptica e eletrônica de varredura. Os resultados obtidos mostraram que os coeficientes de atrito do POM e do PA6.6 foram sensíveis às condições de carga e velocidade, e que o coeficiente de atrito dos três materiais foi sensível à condição pressão-velocidade (PV). As taxas de desgaste estimadas mostraram que o UHMWPE e o POM apresentaram uma resistência ao desgaste superior à apresentada pelo PA6.6. Diferenças entre as morfologias das superfícies dos pinos foram notadas após os ensaios de desgaste.

Palavras-chave: desgaste, atrito, materiais termoplásticos, condição PV, fluência.

ABSTRACT

This work presents an experimental study on wear and friction coefficient responses during dry sliding. Sliding tests were carried out using a pin-on-disk wear testing machine, with fixed thermoplastic pins and rotating stainless steel disks. The thermoplastic materials tested were ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), polyoxymethylene (POM) and polyamide 6.6. (PA6.6). Three conditions of applied load and three conditions of sliding velocity were used. Friction coefficient and change in height of the pins were monitored during the sliding tests. The wear was studied by calculation of wear rate, considering creep of the thermoplastic pins, and by optical and scanning electron microscopy of the worn surfaces. The results showed that the friction coefficient of the POM and PA6.6 pins were susceptible to the applied load and sliding velocity, and that friction coefficient of the three materials studied was susceptible to the pressure-velocity condition (PV). The calculated wear rates showed that UHMWPE and POM have greater wear resistance than PA6.6. Differences in the morphologies of the worn surfaces were also observed.

Key-words: wear, friction, thermoplastics materials, PV condition, creep.

LISTA DE ACRÔNIMOS DOS MATERIAIS PLÁSTICOS

REFERENCIADOS

Sigla	Nome do material
ABS	Copoli (acrilonitrila/butadieno/estireno)
HDPE	Poliétileno de alta densidade
PA	Poliamida
PBO	Poli (benzoxazola)
PC	Policarbonato
PE	Poliétileno
PEEK	Poli (éter-éter-cetona)
PEN	Poli(etileno-naftalato)
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PI	Poli-imida
PMMA	Poli (metacrilato de metila)
POM	Poli (óxido de metileno)
PP	Polipropileno
PTFE	Poli (tetrafluor-etileno)
PVC	Poli (clorato de vinila)
SBR	Elastômero de copoli (butadieno/acrolonitrila)
UHMWPE	Poliétileno de ultra-alto peso molecular

LISTA DE FIGURAS

- 7 Figura 1 – Esquema de um esterulito segundo o modelo da micela tranjeada (BUDINSKI, K.G.; BUDINSKI, K.B., 1999).
- 8 Figura 2 – Micrografia da estrutura esterulítica, e esquema de um esterulito em detalhe, mostrando o modelo da cadeia dobrada (SMITH, 1998).
- 9 Figura 3 - Determinação da temperatura de transição vítrea para um polímero usando a variação do volume específico (JASTRZEBSKI, 1987)
- 10 Figura 4. Mudanças no módulo de relaxação com a temperatura para polímeros semicristalinos e amorfos. O tempo de carregamento é constante. (TOBOLSKY, A.V.; 1980 apud JASTRZEBSKI, 1987)
- 12 Figura 5 - Curva típica de fluência em ensaio a temperatura e esforço aplicado constantes (JASTRZEBSKI, 1987).
- 13 Figura 6. Modelo dos quatro elementos ou de Maxwell-Voigt para viscoelasticidade (COURTNEY, 2000).
- 14 Figura 7. Curva Resposta de e vs t em condições de esforço e temperatura constantes segundo o modelo dos quatro elementos (JASTRZEBSKI, 1987).
- 17 Figura 8. Curva típica de relaxação de tensão a temperatura (T) constante (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K., 1999)
- 18 Figura 9- Módulo de relaxação de tensão $G(t)$ a temperatura constante em função do tempo de observação (CALCOTE, 1968).
- 19 Figura 10. Ilustração esquemática da mudança de morfologia do esterulito durante o estiramento a frio de um polímero semi-cristalino (MEYERS; CHAWLA, 1999)
- 20 Figura 11. Representação esquemática dos mecanismos de deformação plástica atuando em um polímero semi-cristalino (YOUNG; LOVELL, 1991 apud DA SILVA, 2002)
- Figura 12. Curvas esforço-deformação para o acetato de celulose a várias temperaturas

- 21 de ensaio (CANEVAROLO, 2002)
- 22 Figura 13 – Variação da tensão e da deformação com o tempo para um material viscoelástico, mostrando o ângulo de fase d (DP UNION, 2003)
- 24 Figura 14 – Representação esquemática da capacidade de amortecimento ($\tan d$) de um polímero semi-cristalino em função da temperatura (BARTNEV; LAVRENTEV, 1981).
- 25 Figura 15. Variação do módulo de armazenamento para amostras de policarbonato (PC) submetidas a várias condições de resfriamento (CANEVAROLO, 1991)
- 26 Figura 16. Variação do módulo elástico E em função da temperatura mostrando a temperatura de transição mecânica T_M (BARTNEV; LAVRENTEV, 1981)
- 28 Figura 17 - A origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica (BRISCOE, 1981).
- 29 Figura 18. Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para o HDPE deslizando contra vidro. (HUTCHINGS, 1992)
- 30 Figura 19 - Modelo de deslizamento entre as macromoléculas de PE (YAMAGUSHI, 1990).
- 31 Figura 20 – Relação entre a componente de adesão do atrito e tensão superficial crítica (LEE apud KURITSUYNA; MEISNER).
- 33 Figura 21. Descrição dos mecanismos de dissipação de energia no deslizamento de um polímero contra um contra-corpo rígido (BRISCOE, 1990).
- 35 Figura 22 - Os três modos genéricos (A, B e C) de transferência de filme polimérico (BRISCOE, 1990).
- 37 Figura 23 - Variação da taxa de desgaste no estado estacionário com a carga normal no deslizamento contra uma superfície de aço ($Ra=0,15$ mm) sob condição não-lubrificada (EVANS et all, 1979 apud HUTCHINGS, 1992)

39	Figura 24. Correlação de RATNER-LANCASTER para desgaste de polímeros em condições predominantemente abrasivas (BRISCOE, 1981 apud HUTCHINGS, 1992).
41	Figura 25. Filme transferido de PEEK a uma superfície de aço (BAHADUR, 2000).
42	Figura 26 – Coeficiente de atrito por rolamento e Tand do PTFE com 92% de cristalinidade, em função da temperatura (LUDÉMA, TABOR (1966))
44	Figura 27 - Comportamento da área real e da tensão de cisalhamento em função da velocidade de deslizamento (LUDÉMA; TABOR, 1966).
45	Figura 28- Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento para alguns termoplásticos (TANAKA; YAMADA 1999).
46	Figura 29. Relação entre coeficiente de atrito dinâmico e carga para várias cargas aplicadas para um sistema poliamida e aço (YAMAGUCHI, 1990).
47	Figura 30. Atrito em função da carga e da velocidade para o PTFE puro e composto deslizante contra aço AISI 52100 (VINOGRADOV et al, 1965).
48	Figura 31 – Efeito da condigãp PV no atrito do polietileno deslizando contra aço inoxidável (WANG et al, 1995).
49	Figura 32 - Curva de temperatura no contato (T) pelo tempo para condições PV cada vez mais elevadas (BARTENEV, LAVRENTEV, 1981).
49	Figura 33 – Efeito da velocidade de rotação na temperatura de contato de PE contra aço inoxidável (DA SILVA et al, 1999).
50	Figura 34. Variação da taxa de desgaste com a velocidade para PA 6.6 deslizando a seco contra aço com 0,4 %C ((LANCASTER, 1979 apud HUTCHINGS, 1992)
54	Figura 35 - Geometria dos pinos poliméricos testados
57	Figura 36. Deformação por Compressão do UHMWPE a 20 °C e 50 °C (BRASKEM, 2003)

75	Figura 50. Curva típica obtida no testes no equipamento pino-contra-disco.
75	Figura 49 - Variação da perda de massa em função da distância de deslizamento [HUTCHINGS, 1992].
69	Figura 48 - Esquema mostrando termopar, pino e disco (DA SILVA, 1998).
68	Figura 47 - Esquema do sistema pino-contra-disco.
65	Figura 46 - Curva típica de dureza dinâmica (PINTAUDE, SINATORA, 2000).
64	Figura 45 - Indicação esquemática dos parâmetros utilizados para cálculo de dureza dinâmica (STILWELL; TABOR, 1961 apud PINTAUDE, 2000).
63	Figura 44. Esquema que ilustra o método usado para medição da rugosidade do disco de aço inoxidável nitrogenado.
62	Figura 43. Ensaio de tração para o PA 6.6 com 50% de umidade relativa (TICONA, 2002)
61	Figura 42. Esquema da estrutura do PA6 (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999).
60	Figura 41. Deformação do POM Hostatorm em função do tempo e da temperatura (HOECHST, 2003).
60	Figura 40. Deformação do POM Hostatorm em função do tempo e do esforço tratvo aplicado(HOECHST, 2003).
59	Figura 39. Variação do Módulo elástico do POM Hostatorm com o tempo e a temperatura, com esforço tratvo de 10 MPa (HOECHST, 2003).
59	Figura 38. Variação do Módulo elástico do POM Hostatorm com o tempo e o esforço aplicado (HOECHST, 2003).
58	Figura 37. Esquema da estrutura do POM (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999).

- 77 Figura 51. Deformação devida à fluência a temperatura ambiente. Material: UHMWPE. Carga aplicada: 100 N; Velocidade: 0,5 m/s.
- 78 Figura 52. Determinação da inclinação da curva e coeficiente de atrito para os intervalos de 250 m. Termoplástico: PA 6.6/6. Carga: 50 N. Velocidade: 0,5 m/s
- 84 Figura 53 - Microestrutura do aço inoxidável mostrando as microestruturas presentes - ferrita (clara) e austenita (escura) (DA SILVA, 2002).
- 88 Figura 54. Durezas dos materiais termoplásticos usando diferentes métodos.
- 89 Figura 55. Comparação entre os Módulos Elásticos medidos dos termoplásticos testados e os valores fornecidos pelos fabricantes.
- 90 Figura 56. Resultados do ensaio DMA para o UHMWPE
- 91 Figura 57. Resultados do ensaio DMA para o UHMWPE acima da temperatura ambiente.
- 92 Figura 58. Resultados do ensaio DMA para o POM
- 93 Figura 59. Resultados do ensaio DMA para o POM acima da temperatura ambiente.
- 94 Figura 60. Resultados do ensaio DMA para o PA6.6
- 95 Figura 61. Temperatura na região próxima à superfície de contato em função da distância percorrida. Material: POM; P = 100 N; V = 1,0 m/s.
- 100 Figura 62. Temperatura próxima à superfície de contato para os termoplásticos estudados em função da condição PV.
- 102 Figura 63. Temperatura próxima à superfície de contato para o UHMWPE e o POM em função da velocidade de deslizamento.
- 102 Figura 64. Temperatura próxima à superfície de contato para o PA6.6 em função da velocidade de deslizamento.
- Figura 65. Temperatura próxima à superfície de contato para o UHMWPE e o POM

103	em função da carga aplicada.
104	Figura 66. Temperatura próxima à superfície de contato para o PA6.6 em função da carga aplicada.
106	Figura 67 - Resultados de Coeficiente de Atrito para os ensaios realizados
107	Figura 68. Efeito da carga aplicada no coeficiente de atrito.
109	Figura 69. Efeito da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito dos materiais testados.
111	Figura 70. Efeito da condigão PV no coeficiente de atrito.
112	Figura 71. Ensaios de fluência à temperatura ambiente para o UHMWPE
113	Figura 72. Ensaios de fluência à temperatura ambiente para o POM
113	Figura 73. Ensaios de fluência à temperatura ambiente para o PA6.6
114	Figura 74. Comparação entre a deformação por fluência a temperatura ambiente do UHMWPE medida com os dados fornecidos pelo fabricante.
114	Figura 75. Comparação entre a deformação por fluência a temperatura ambiente do POM medida com os dados fornecidos pelo fabricante.
117	Figura 76. Ajustes lineares às curvas de fluência para o UHMWPE
117	Figura 77. Ajustes lineares às curvas de fluência para o POM
118	Figura 78. Ajustes lineares às curvas de fluência para o PA6.6
122	Figura 79 - Resultados de taxa de desgaste para os ensaios realizados
123	Figura 80. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste do UHMWPE. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.
	Figura 81. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste do POM. São indicadas

- 124 as temperaturas medidas na região próxima ao contato.
- 125 Figura 82. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste do PA6.6.
- 126 Figura 83. Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste do UHMWPE. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.
- 127 Figura 84. Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste do POM. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.
- 128 Figura 85. Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste do PA6.6. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.
- 129 Figura 86. Resultados de taxa de desgaste em função da condição PV.
- 131 Figura 87. Resultados de taxa de desgaste em função da temperatura atingida na região próxima à superfície de contato.
- 133 Figura 88. Ensaio com fusão do PA6.6. Carga: 50 N. Velocidade: 1,0 m/s.
- 134 Figura 89. Ensaio com fusão do PA6.6. Carga: 200 N. Velocidade: 0,5 m/s.
- 135 Figura 90. Perda de massa para os ensaios pino-contra-disco realizados.
- 136 Figura 91. Perda de volume para os ensaios pino-contra-disco realizados.
- 137 Figura 92. Imagens usando MO de pinos de UHMWPE. Carga: 50 N.
- 138 Figura 93. Imagens usando MO do pino de UHMWPE. Carga: 100 N.
- 139 Figura 94. Imagens usando MO do pino de UHMWPE. Carga: 200 N.
- 139 Figura 95. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s.
- 140 Figura 96. Formação de camadas na superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s. Imagens obtidas por MEV.

- 141 Figura 97. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 50 N e 1,0 m/s.
- 142 Figura 98. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 100 N e 0,1 m/s.
- 142 Figura 99. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 100 N e 0,5 m/s.
- 143 Figura 100. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 200 N e 0,5 m/s.
- 145 Figura 101. Imagens usando MO de pinos de POM. Carga: 50 N.
- 146 Figura 102. Imagens usando MO de pinos de POM. Carga: 100 N.
- 147 Figura 103. Imagens usando MO de pinos de POM. Carga: 200 N.
- 147 Figura 104. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de POM. Condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s.
- 148 Figura 105. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. 50 N; 0,5 m/s.
- 148 Figura 106. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. 50 N; 1,0 m/s.
- 149 Figura 107. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. Carga: 100 N.
- 150 Figura 108. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. Carga: 200 N.
- 152 Figura 109. Imagens usando MO do pino de PA6.6. Carga: 50 N.
- 153 Figura 110. Imagens usando MO do pino de PA6.6. Carga: 100 N.
- 154 Figura 111. Imagens usando MO do pino de PA6.6. Carga: 200 N.
- 154 Figura 112. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de PA6.6. Condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s.

- 155 Figura 113. Imagens obtida por MEV de um pino de PA6.6. 50 N; 0,5 m/s.
- 155 Figura 114. Imagens obtida por MEV de um pino de PA6.6. 50 N; 1,0 m/s.
- 156 Figura 115. Imagens obtida por MEV de um pino de PA6.6. Carga: 100 N.
- 157 Figura 116. Imagens obtida por MEV de um pino de PA6.6. Carga: 200 N.
- 158 Figura 118. Imagens obtida por MEV de um pino de PA6.6. Condições de ensaio:
200 N e 0,5 m/s.

LISTA DE TABELAS

16	Tabela 1. Fórmulas empíricas para fluência unidimensional com influência do esforço aplicado, do tempo e da temperatura (BORESI et al, 1993)
24	Tabela 2 - Regiões de transição de polímeros (CANEVAROLO, 1991).
55	Tabela 3- Propriedades dos termoplásticos testados segundo fabricantes (PLASTTECNO, 2002; TECHNYL, 2002; CORMATEC, 2002)
72	Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios de desgaste
72	Tabela 5 – Valores de condição PV para os diversos níveis de carga e velocidade de deslizamento.
73	Tabela 6. Raio de pista e velocidade de rotação dos testes.
81	Tabela 7. Determinação da taxa de desgaste e o coeficiente de atrito para o PA 6.6/6. Carga = 50 N. Velocidade = 0,5 m/s
83	Tabela 8 – Composição química do aço inoxidável austenítico nitrogênio (DA SILVA, 2002).
85	Tabela 9 – Dureza Vickers do aço inoxidável nitrogênio (DA SILVA, 2002)
85	Tabela 10 - Aço Inoxidável com Nitrogênio –Ra desejada $0,3 < Ra < 0,6$ mm.
86	Tabela 11. Dureza Vickers dos termoplásticos testados
86	Tabela 12. Resultados do ensaio instrumentado de microdureza para o UHMWPE
87	Tabela 13. Resultados do ensaio instrumentado de microdureza para o POM
87	Tabela 14. Resultados do ensaio instrumentado de microdureza para o PA6.6
87	Tabela 15. Comparação entre durezas medidas e dos fabricantes para os termoplásticos estudados.

89	Tabela 16. Comparação entre módulo elástico medido e do fabricante para os termoplásticos estudados.
96	Tabela 17. Temperatura próxima à superfície de contato para os termoplásticos estudados nos maiores valores de carga aplicada.
96	Tabela 18. Temperatura próxima à superfície de contato de pinos de PA6.6 em função da condição PV.
97	Tabela 19. Parâmetros usados na estimativa da temperatura no contato.
97	Tabela 20. Valores de Coeficiente de Atrito para os testes com monitoramento da temperatura.
98	Tabela 21. Números de PECLFT para as condições de ensaio.
99	Tabela 22. Valores de temperatura para os testes com monitoramento da temperatura.
105	Tabela 23 - Resultados de coeficiente de atrito UHMWPE contra Inox.
105	Tabela 24 – Resultados de coeficiente de atrito POM contra Inox
106	Tabela 25. Resultados de coeficiente de atrito dos ensaios PA6.6 contra Inox.
108	Tabela 26. Parâmetros dos testes de hipótese sobre o efeito da carga no coeficiente de atrito para o UHMWPE.
110	Tabela 27. Parâmetros dos testes de hipótese sobre o efeito da velocidade no coeficiente de atrito para o UHMWPE.
111	Tabela 28. Efeito da condição PV no coeficiente de atrito para os termoplásticos
115	Tabela 29. Parâmetros considerados para determinar os intervalos de ajuste linear para as deformações por fluência.
115	Tabela 30. Resultados do ajuste linear realizado para os ensaios de fluência
119	Tabela 31 – Resultados de perda de altura em função da distância - UHMWPE

119	Tabela 32 – Resultados de perda de altura em função da distância - POM.
120	Tabela 33 – Resultados de perda de altura em função da distância – PA6.6.
121	Tabela 34 – Resultados de taxa de desgaste dos ensaios com UHMWPE
121	Tabela 35 – Resultados de taxa de desgaste dos ensaios com POM
121	Tabela 36 – Resultados de taxa de desgaste dos ensaios com PA6.6

1 INTRODUÇÃO

Desde a terceira década do século passado começaram a ser desenvolvidas artificialmente, de forma sistemática e ordenada, novas variedades de um grupo de materiais baseados nas cadeias de carbono que, com o decorrer dos anos, foram batizados de polímeros. Os polímeros constituem, em conjunto com os metais e as cerâmicas, os materiais que originam a enorme quantidade e variedade de materiais que atualmente estão sendo usados industrialmente e cientificamente e tecnologicamente.

A análise e utilização de materiais poliméricos, também conhecidos como plásticos, se dá nos mais diversos ramos dos setores acadêmico e produtivo e vem sendo uma prática que tem aumentado significativamente nas últimas décadas. É por isto que muitos ramos da ciência estão dedicando seus esforços à compreensão dos fenômenos envolvidos com as aplicações onde os plásticos estão presentes. Considerando-se o número de publicações relacionadas com materiais poliméricos neste início de século XXI, tem-se uma evidência do interesse do mundo científico e tecnológico por estes materiais.

Dentre os materiais plásticos de maior possibilidade de aplicação, a família dos termoplásticos constitui uma porcentagem importante daqueles que vêm sendo usados na atualidade. Algumas características desta família de materiais, como sua facilidade de processamento e conformação, baixo custo e baixa densidade, em geral os qualificam a atuarem em setores extremamente diversos como a medicina, a indústria automotiva, de embalagens ou de circuitos eletrônicos (MANO,1994). Como consequência desta versatilidade, o meio científico e industrial reconhece a importância em saber as propriedades e comportamento deste grupo de materiais, para otimizar tanto sua obtenção como sua utilização.

A tribologia, demonstrando ser uma atividade dinâmica e concatenada com o desenvolvimento tecnológico, vem contando com um número cada vez maior de

cientistas interessados no desenvolvimento de técnicas, equipamentos e teorias que permitam aproveitar melhor as possibilidades que os materiais plásticos oferecem. O interesse provém de um fato real: este tipo de material está sendo usado em muitos sistemas onde boas propriedades tribológicas são exigidas, como selos, engrenagens, freios e embreagens, correias de transmissão, articulações artificiais, moinhos, motores, instrumentos espaciais e equipamentos audiovisuais (BAER, 1986). Portanto, o domínio tecnológico das propriedades tribológicas dos polímeros, e uma utilização racional dos recursos envolvidos com o projeto, fabricação, utilização e manutenção de equipamentos, são fatores de grande interesse para os meios científico e industrial do país.

Visando uma maior compreensão do comportamento destes materiais, muito se tem investido na caracterização tribológica dos termoplásticos mais comercializados. Dentre a enorme variedade de termoplásticos existentes, a grande maioria das pesquisas tribológicas é referida a algum dos seguintes materiais (ZHANG, 1989): polietileno (PE), polipropileno (PP), politetrafluoretileno (PTFE), poliamida (PA), polioximetileno (POM), poli(cloreto de vinila) (PVC), poli(éter-éter-cetona) (PEEK), poli(metacrilato de metila) (PMMA) e poliimida (PI). A concentração neste grupo de materiais é explicada pelo fato de serem altamente comercializados e cobrirem uma ampla faixa de propriedades.

Os estudos desenvolvidos a respeito destes materiais buscam entender seu comportamento e, deste modo, tentam aplicar esses resultados na enorme variedade de compostos derivados. Compreender o que ocorre nesses materiais em estado puro, isto é, sem um teor de plastificantes e reforçantes, além do necessário para o processamento, constitui uma base importante do conhecimento dos fenômenos envolvidos no contato. Os resultados assim obtidos servirão de base para a compreensão dos fenômenos presentes nos materiais derivados dos polímeros com formulações mais simples.

Sabe-se que parâmetros como carga aplicada, velocidade de deslizamento, umidade relativa e temperatura de trabalho, entre outros, devem ser analisados com detalhe pela sua grande influência no comportamento dos tribossistemas onde há um ou mais componentes termoplásticos. As peças fabricadas em material plástico comumente trabalham em contato com corpos metálicos ou cerâmicos que, por sua maior rigidez quando comparada com a dos polímeros, fazem com que a perda de massa e o dano ocorram quase totalmente no material mais mole, isto é, no material plástico. Levando em consideração que nas aplicações industriais os componentes mecânicos fabricados em materiais poliméricos normalmente estão em contato com materiais mais duros, as pesquisas desenvolvidas usando um contracorpo metálico podem ajudar a otimizar a performance destes tipos de componentes.

Neste trabalho procurou-se uma configuração de ensaio e materiais que permitissem comparar comportamentos e obter resultados que ampliassem o conhecimento da influência de algumas variáveis como velocidade de deslizamento e carga na performance de materiais termoplásticos. Optou-se por usar uma configuração pino-contradisco onde os pinos fossem do material polimérico e o disco de aço inoxidável duplex com nitrogênio, dado que este par de materiais é usado em aplicações médicas, além deste tipo de aço estar sendo alvo de pesquisas no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP (PMT-EPUSP).

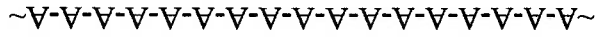
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Plásticos e polímeros

2.1.1 Considerações iniciais

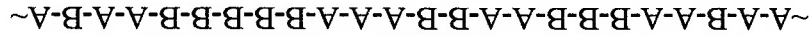
Os polímeros são cadeias nas quais uma molécula orgânica, chamada unidade monomérica, se une a outras unidades monoméricas mediante ligações covalentes (CALLISTER, 1994). O caso mais simples é o do polietileno, constituído por uma molécula de etileno (CH_2) que se liga covalentemente com outras iguais. Neste caso, o etileno é a unidade monomérica do polímero. Essas cadeias poliméricas ligam-se a outras cadeias mediante forças de carácter secundário, como forças de Van der Waals, de tipo dipolo ou de tipo ponte de hidrogénio. Sendo assim, mesmo contando com ligações fortes (covalentes) ao longo da cadeia, a força de ligação entre cadeias é fraca. Como consequência, tem-se o fato dos polímeros geralmente apresentarem propriedades mecânicas inferiores às observadas nos demais grupos de materiais.

Uma primeira classificação dos polímeros está baseada na diversidade de unidades monoméricas na cadeia polimérica, sendo divididos em homopolímeros e copolímeros (CALLISTER, 1994). Os homopolímeros são polímeros cujas cadeias estão formadas por um único tipo de unidade monomérica, podendo ser representados assim:



onde cada letra representa uma unidade monomérica.

Já os copolímeros têm suas cadeias formadas pela repetição de dois ou mais tipos de unidades monoméricas, podendo ser representados assim:



Para as aplicações industriais, os polímeros geralmente precisam de substâncias adicionais que permitam seu processamento e a otimização das suas propriedades. Este material assim processado e ligado é chamado de plástico (CANEVAROLO, 2002). Os plásticos podem ser considerados como polímeros disponíveis em forma de resinas, as quais são preparadas junto a aditivos naturais e sintéticos visando otimizar a produção e, por exemplo, para estabilizar as reações químicas, melhorar as propriedades mecânicas, agilizar o processamento, facilitar a fluidez durante a manufatura de componentes, etc.

2.1.2 Os termoplásticos

Uma classificação dos polímeros, que tem tido alto grau de aceitação, é a baseada no seu comportamento termomecânico (CANEVAROLO, 2002). Por esta classificação existem três tipos de materiais poliméricos:

A. Plásticos:

A.1. Termoplásticos: Polímeros que, sob o efeito de temperatura e pressão amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições (ASKELAND, 1988). Retirada a solicitação de temperatura e pressão, solidificam adquirindo a forma do molde. Este processo é reversível, possibilitando que os termoplásticos possam ser parcialmente reciclados e re-processados.

Estes materiais são solúveis em meios orgânicos e suas cadeias poliméricas podem ser lineares ou ramificadas. Exemplos de termoplásticos são o polietileno (PE), o poli(cloreto de vinila) (PVC), o polipropileno (PP), a poliamida (PA), o poli(tetrafluoretileno) (PTFE) e o poli(óxido de metileno) (POM).

A.2. Termorrígidos: Materiais que uma vez processados obtêm uma estrutura reticulada. Sob solicitações de pressão e temperatura amolecem, mas, uma

Uma característica muito importante nos termoplásticos é o seu grau de cristalinidade. Regiões cristalinas (cristalitos) são formadas quando um número suficiente de cadeias se aproximam umas das outras, de forma que as forças de

2.1.3 Cristalinidade

Dentre os materiais poliméricos descritos, são os termoplásticos que constituem o grupo com maior aplicabilidade na indústria, pelas características de processabilidade e propriedades mecânicas obtidas, constituindo aproximadamente 90% da produção mundial de polímeros (JASTRZEBSKI, 1987). É por esta razão que este trabalho ocupa-se do comportamento tribológico dos termoplásticos e as seções posteriores tratarão de alguns dos aspectos mais relevantes que influem na tribologia dos termoplásticos.

Existem outros tipos de materiais poliméricos como as tintas e os adesivos, mas as características destes materiais não são de interesse para este estudo.

São termoplásticos orientados satisfazendo a condição geométrica de que a relação entre o comprimento das fibras e o diâmetro é superior a 100. Esta configuração é obtida durante um processo de aeração, proporcionando uma melhoria nas propriedades mecânicas e permitindo o uso na forma de fios finos.

C. Fibras:

Polímeros que na temperatura ambiente podem apresentar alta deformação elástica, explicada pelo grande número de configurações possíveis que podem conseguir suas cadeias poliméricas. A estrutura deste tipo de material é caracterizada pela formação de uma rede de alta flexibilidade (MEYERS; CHAWLA, 1999)

B. Elastômeros:

vez retiradas estas condições, não retornam à estrutura reticulada original, perdendo suas propriedades originais. Exemplos: baquelite, resinas epóxi.

ligação secundária se sobrepõem à tendência à desordem produzida pela ativação térmica (CANEVAROLO, 2002). Os cristallitos são regiões de matéria em que as unidades estruturais, sejam átomos, íons, meros ou moléculas, estão arranjadas em um sistema regular geométrico (BUDINSKI K.G.; BUDINSKI, K.B., 1999). Cada cristallito tem dimensões globais da ordem de várias centenas de nanômetros.

O comprimento das cadeias poliméricas supera as dimensões de um cristallito, podendo uma cadeia passar de uma região cristalina para uma região amorfa e atingir novamente uma outra região cristalina, como mostrado na Figura 1, na qual apresenta-se o modelo denominado micela trançada (CALLISTER, 1994).

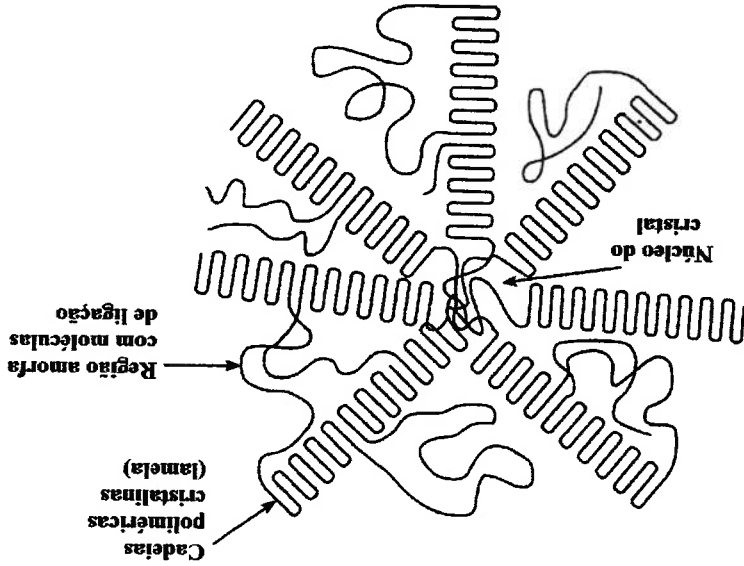


Figura 1 – Esquema de um estereocristallito segundo o modelo da micela trançada (BUDINSKI, K.G.; BUDINSKI, K.B., 1999).

A literatura mostra que monocristais de polímeros podem ser desenvolvidos através da cristalização lenta de uma solução polimérica diluída (CANEVAROLO, 2002). Estes cristais se apresentam na forma de estrias finas ou lamelas com espessura de cerca de 10 nm. Devido ao fato da espessura da estria ser apenas uma fração do comprimento da cadeia, esta última é obrigada a se dobrar para trás e para frente ao longo do cristal. Este modelo é mostrado na Figura 2.

A temperatura de transição vítrea é aquela abaixo da qual a mobilidade das cadeias moleculares se torna restrita pela coesão intermolecular, tornando o material

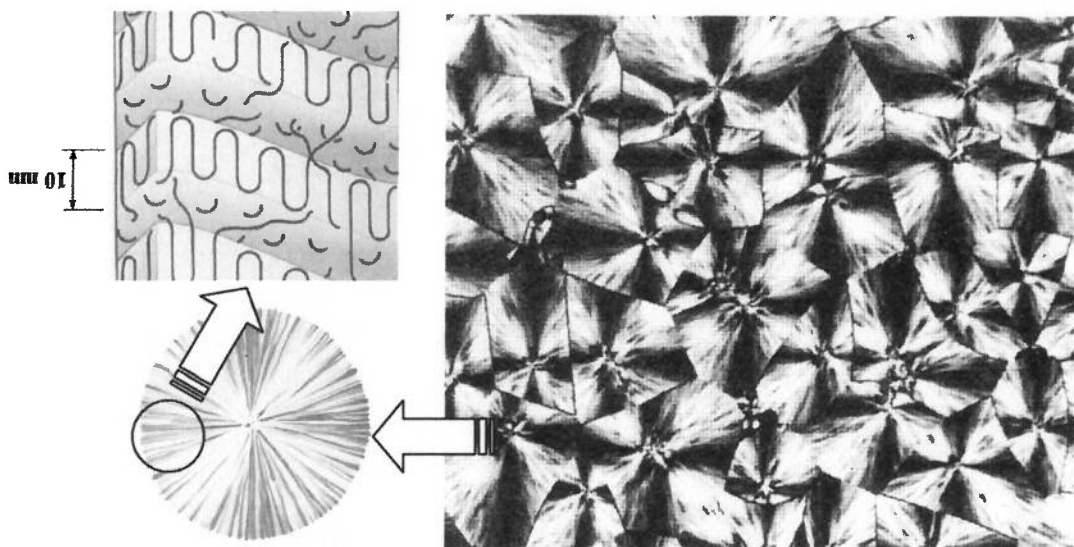
também influencia o comportamento térmico, como será tratado a seguir. A mobilidade das cadeias nos materiais poliméricos apresenta um comportamento dependente da temperatura. A estrutura presente no material

2.1.4 Temperatura de fusão e temperatura de transição vítrea

Uma maior orientação das cadeias moleculares também contribui para o aumento da resistência mecânica e da dureza dos polímeros, o que sem dúvida se reflete no seu comportamento tribológico. Neste trabalho posteriormente serão apresentadas as idéias vigentes sobre a influência da cristalinidade na tribologia dos materiais termoplásticos.

Como observado na Figura 2, esfervilhos tomam formas polidricas devido a interferência mútua no crescimento, assemelhando-se aos grãos de um material policristalino. Cada esfervilho consiste de um grande número de cristaltos, enquanto que cada grão em um metal é um monocristal.

Figura 2 – Micrografia da estrutura esfervilica, e esquema de um esfervilho em detalhe, mostrando o modelo da cadeia dobrada (SMITH, 1998).



mais rígido (YOUNG; LOVELL, 1991). Abaixo de T_g , o polímero apresenta um estado onde os movimentos moleculares como a rotação e a vibração estão limitados, e o material encontra-se no chamado estado vítreo, respondendo às solicitações mecânicas preferencialmente de forma elástica. Esta temperatura também depende da história termomecânica do polímero e da maneira como é realizado o esfriamento, como esquematizado na Figura 3 (JASTRZEBSKI, 1987). É na temperatura T_g que, quando esfriado, o polímero faz a transição de um estado com comportamento viscoso, ou de borracha, para o estado vítreo, onde predomina o comportamento elástico.

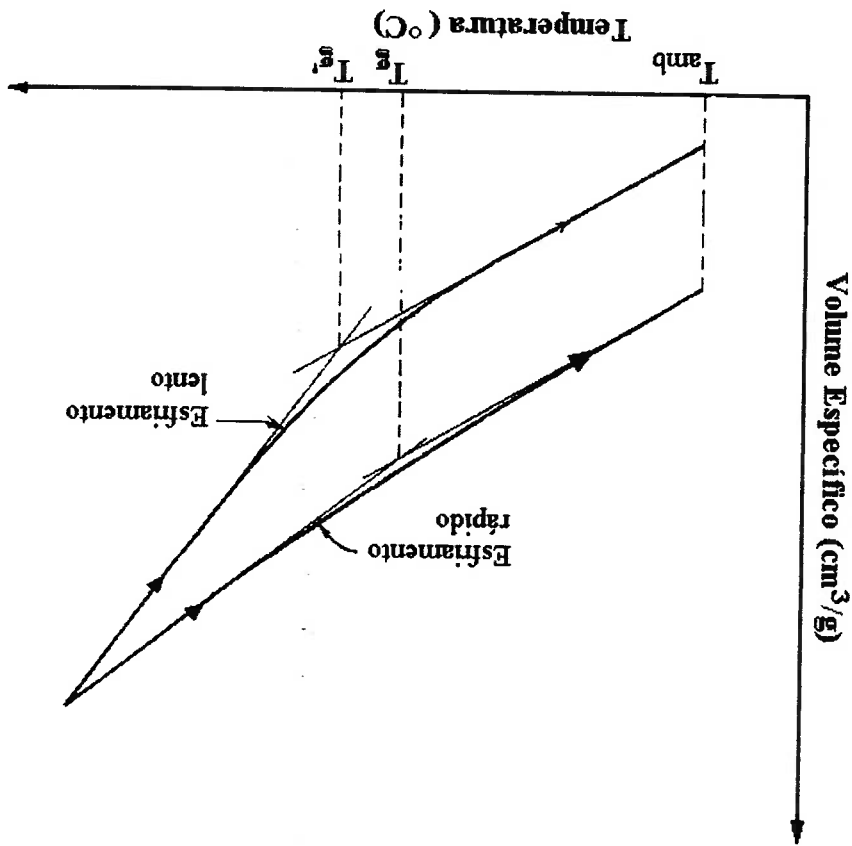


Figura 3 - Determinação da temperatura de transição vítrea para um polímero usando a variação do volume específico (JASTRZEBSKI, 1987)

Uma vez superada a T_g , as moléculas possuem maiores níveis de energia e são possíveis movimentos de segmentos de uma molécula presentes na região amorfa, mantendo a região cristalina rígida. A flexibilidade do corpo termoplástico é função da mobilidade gerada pela fase amorfa, restrita pela rigidez da fase cristalina.

Quanto maior a fração volumétrica cristalina maior será a tendência ao comportamento elástico do material.

A temperatura de fusão (T_m), própria dos polímeros semicristalinos, é aquela na qual toda a cristalinidade desaparece, e os cristaltos e esferulitos se desagregam fazendo com que o material passe a se comportar como um líquido altamente viscoso (CALLISTER, 1994). Nesta fase, o comportamento do material é prioritariamente plástico, pela alta mobilidade das cadeias.

Como será visto posteriormente, para os materiais viscoelásticos existe um parâmetro relacionado com a rigidez do material, chamado módulo de relaxação. Na Figura 4 é esquematizado o módulo de relaxação (E) em função da temperatura para dois tipos de material, permitindo observar como os polímeros amorfos não apresentam T_m , passando diretamente do estado vítreo para o de comportamento viscoso.

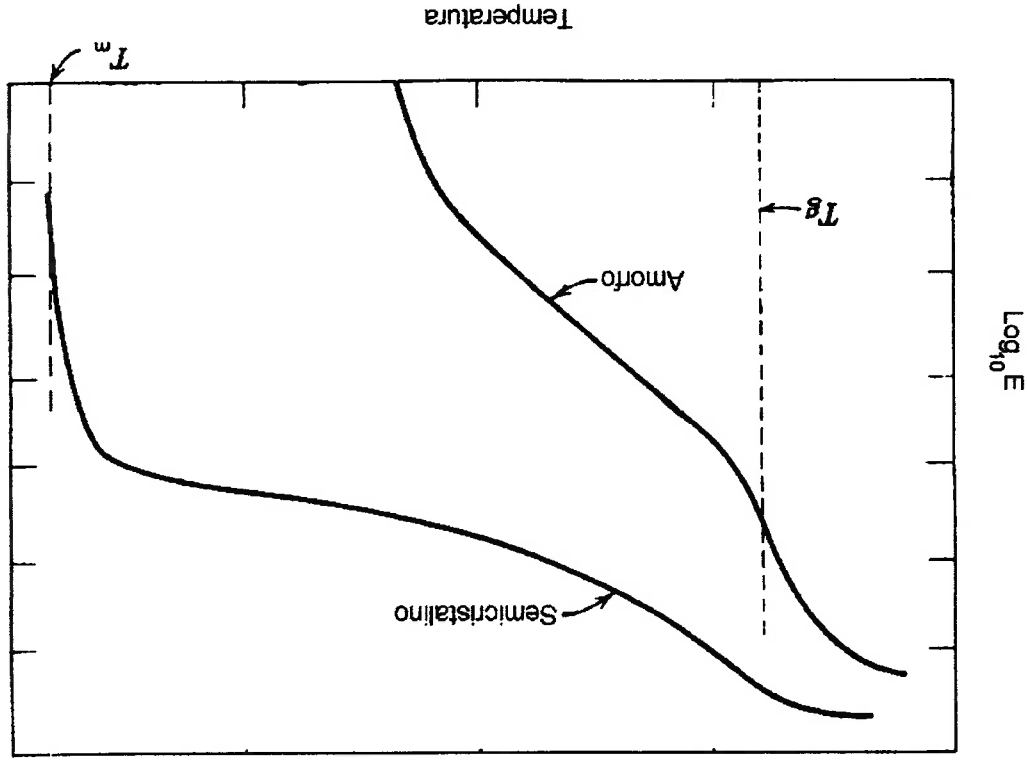


Figura 4. Mudanças no módulo de relaxação com a temperatura para polímeros semicristalinos e amorfos. O tempo de carregamento é constante. (TOBOLSKY, A.V.; 1980 *apud* JASTRZEBSKI, 1987)

Um dos ensaios mais simples para se descrever o comportamento viscoelástico de materiais é o ensaio de fluência, no qual um carregamento compressivo é aplicado instantaneamente em um corpo-de-prova (c.d.p.) e mantido

(BORESI, *et al.*, 1993).

podem ser citados os metais a altas temperaturas, polímeros, concreto e outros carregamento constante. Dentre os materiais que apresentam este comportamento do tempo e da temperatura, que ocorre em certos materiais quando submetidos a um A fluência pode ser definida como uma lenta deformação plástica dependente

2.1.5.1 Fluência

A componente elástica (“sólido”) é devida à rotação e estiramento dos átomos das cadeias e a componente plástica (“fluido”) é devida ao atrito e escoamento entre as moléculas poliméricas. Este comportamento viscoelástico é a causa da fluência e da relaxação da tensão nos polímeros, fenômenos que serão abordados a seguir.

(CANEVAROLO, 1991) e (BORESI, *et al.*, 1993).

A viscoelasticidade é definida como o fenômeno pelo qual o polímero apresenta características de um fluido e de um sólido, simultaneamente

2.1.5 Viscoelasticidade

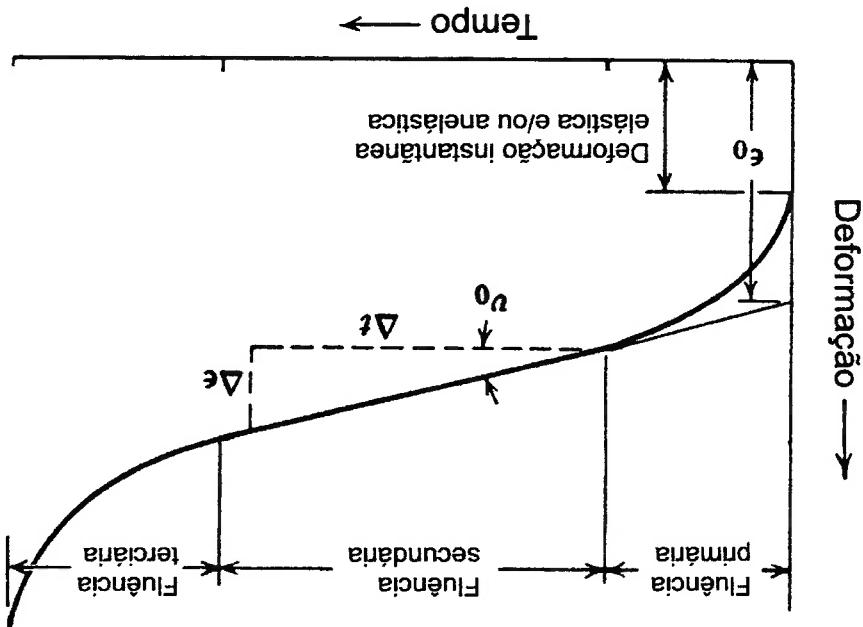
É observado, no entanto, que as definições de T_g e T_m não podem ser feitas sem se considerar outros fatores como modo de estiramento ou aquecimento, método de medição, etc. Segundo CANEVAROLO (2002), os conceitos relacionados com T_m e T_g inicialmente podem parecer simples e absolutos, mas na realidade envolvem parâmetros termodinâmicos e de mecanismos de deformação que fazem com que não exista um critério universal para a determinação destes valores. O que interessa para o estudo aqui apresentado é compreender que as propriedades dos termoplásticos variam com a temperatura, fenômeno que influirá no comportamento tribológico.

A fluência terciária ocorre com uma taxa acelerada, causada pela redução da área do c.d.p como resultado de um processo de dano progressivo, produzindo finalmente a fratura do material.

A parte da curva onde a taxa de deformação tem um valor mínimo e constante é a chamada região de fluência secundária ou regime estacionário (*steady-state creep*). Na Figura 5, esta região apresenta uma inclinação constante dada por v_0 , que corresponde ao valor da taxa de deformação neste período. A fluência secundária está associada ao comportamento viscoso do material, decorrente do deslizamento entre as moléculas.

Nota-se que a curva de fluência apresenta três regiões distintas. Na primeira parte da curva, onde se observa uma taxa de deformação de fluência decrescente no tempo, tem-se a região de fluência primária. Nos termoplásticos, essa componente de deformação é devida à capacidade de alinhamento das cadeias moleculares quando submetidas a uma tensão (BAER, 1986).

Figura 5 - Curva típica de fluência em ensaio a temperatura e esforço aplicado constantes (JASTRZEBSKI, 1987).



Uma curva típica de fluência é mostrada na Figura 5. Durante o tempo de ensaio, medindo-se a deformação deste corpo em constante durante o tempo de ensaio, medindo-se a deformação deste corpo em

2.1.5.2 Modelo dos quatro elementos para a viscoelasticidade

Visando uma aproximação matemática que permita calcular a deformação devida ao comportamento viscoelástico de materiais, foi elaborado um modelo chamado modelo dos quatro elementos (COURTNEY, 2000).

Assume-se que a resposta de um material viscoelástico, quando submetido a um esforço, pode ser explicada usando um arranjo de duas molas com constantes elásticas diferentes e dois amortecedores com fluidos de viscosidades diferentes, como mostrado na Figura 6.

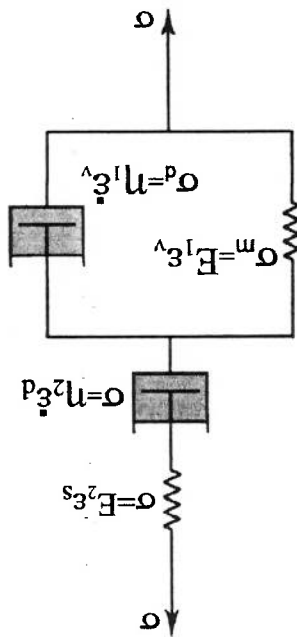


Figura 6. Modelo dos quatro elementos ou de Maxwell-Voigt para viscoelasticidade (COURTNEY, 2000).

Na realidade este modelo é formado pela combinação de dois modelos mais elementares conhecidos como os modelos de Maxwell e Voigt (CANBEVAROLO, 2002). O modelo de Maxwell é constituído pelo acoplamento de uma mola e um amortecedor em série, enquanto que no modelo de Voigt esses mesmos elementos estão em paralelo. Foi observado que cada um destes modelos não explicava por si só o comportamento real dos materiais viscoelásticos, então foram combinados e

encontrou-se que o resultado assemelhava-se à resposta obtida experimentalmente. Na Figura 7 é mostrada uma resposta, em termos de deformação para um material viscoelástico, resultante da aplicação de um esforço constante e a temperatura constante.

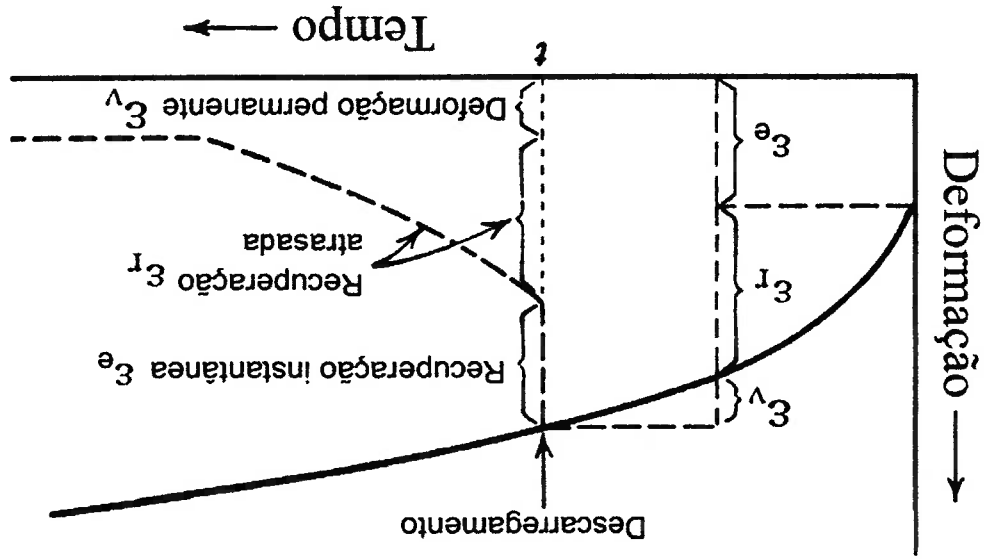


Figura 7. Curva Resposta de ϵ vs t em condições de esforço e temperatura constantes segundo o modelo dos quatro elementos (JASTRZEBSKI, 1987).

Segundo JASTRZEBSKI (1987) verifica-se que a deformação inicial ($t=0$) tem uma componente elástica (ϵ_e) e, no caso da tensão aplicada exceder a tensão de escoamento do material, uma componente plástica. Com o decorrer do tempo, pode-se observar um aumento na deformação total do corpo $\epsilon(t)$ devido ao aumento da componente relacionada à fluência do material.

Para o modelamento do comportamento sob tensão com fluência, definiu-se a deformação total $\epsilon(t)$ pela soma das três parcelas ϵ_e, ϵ_r e ϵ_v , sendo estas definidas por:

ϵ_e = deformação elástica instantânea;

ϵ_r = deformação elástica atrasada, devida à viscoelasticidade;

ϵ_v = deformação plástica.

Desta forma tem-se:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_r + \epsilon_v \quad (1)$$

Segundo COURTNEY (2000) e JASTRZEBSKI (1987), cada componente

está dado por:

$$\epsilon_e = \frac{E_2}{\sigma} ; \epsilon_r = \frac{E_1}{\sigma} (1 - e^{-t \cdot E_1 / 3 \cdot \eta_2}) \quad \text{e} \quad \epsilon_v = \frac{3 \cdot \eta_2}{\sigma} t \quad (2)$$

onde E_1 e E_2 são as constantes elásticas das molas e η_1 e η_2 correspondem às viscosidades dos fluidos dos amortecedores, segundo a disposição de elementos

mostrada na Figura 6.

Os termos na Equação (2) expressam que a deformação nos materiais com comportamento viscoelástico depende do tempo, além das propriedades do material. Um outro aspecto importante é a dependência linear da deformação com o esforço aplicado, o que é chamado de comportamento viscoelástico linear (BORESI *et al.*, 1993).

Segundo YOUNG; LOVELL (1991) a influência da temperatura na fluência dos materiais poliméricos tem sido amplamente reconhecida. No entanto, não tem sido desenvolvido um modelo matemático de amplo reconhecimento que modele a deformação deste tipo de material em função da temperatura, como tem sido elaborado para a fluência a temperatura constante. Os trabalhos efetuados na área têm permitido estabelecer que nos materiais plásticos a deformação por fluência aumenta com o aumento na temperatura, pois os parâmetros elásticos e viscosos do material variam com a temperatura do material.

Na Tabela 1 são mostradas algumas formulações empíricas desenvolvidas para fluência em função do tempo, temperatura e esforço (BORESI *et al.*, 1993).

Tabela 1. Fórmulas empíricas para fluência unidimensional com influência do esforço aplicado, do tempo e da temperatura (BORRESI et al., 1993)

Equação	Pesquisador
$\frac{d\epsilon}{dt} = T \cdot e^{(-a/T - b + c\sigma)}$	Nadai, 1931
$\epsilon = a \cdot \left(\frac{\sigma}{b}\right)^n \cdot e^{(-d/T)} + \left(\frac{\sigma}{m}\right)^n \cdot t$	Odqvist, 1953
$\epsilon = a \cdot \sigma^n \cdot t^k \cdot e^{(-b/T)}$	Pickel et al., 1971
$\epsilon = a \cdot t^k \cdot \text{senh}(a\sigma) \cdot e^{(-b/T)}$	Pickel et al., 1971
$\epsilon = a \cdot t^k [\text{senh}(b\sigma)]^n \cdot e^{(-b/T)}$	Pickel et al., 1971

Nota: T=temperatura, t= tempo, σ = esforço aplicado; os outros símbolos representam constantes empíricas estabelecidas para cada material.

Segundo os modelos representados na Tabela 1, a dependência da fluência com o tempo está determinada pelos valores das constantes inseridas nos modelos, mas em termos gerais pode-se dizer que a deformação por fluência depende de três parâmetros do sistema, que são: O esforço aplicado, o tempo de observação e a temperatura do material.

2.1.5.3 Relaxação de tensão

Os materiais poliméricos apresentam um outro fenômeno chamado de relaxação de tensão, o qual pode ser observado submetendo-se um c.d.p. a uma deformação constante ϵ (instantânea), e medindo-se a tensão $\sigma(t)$ necessária para manter essa deformação em função do tempo (YOUNG; LOVELL, 1991). Uma curva típica deste ensaio está esquematizada na Figura 8.

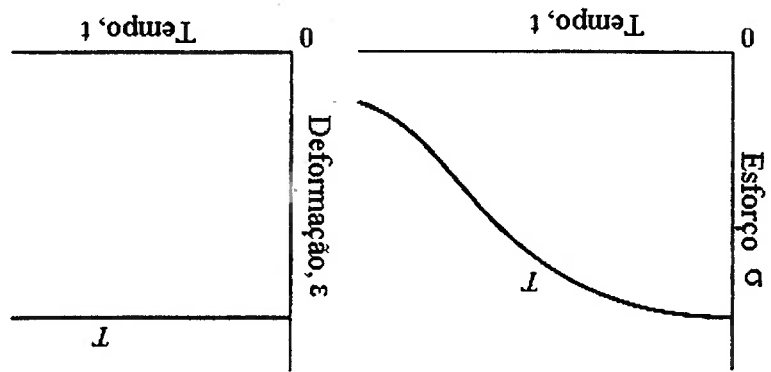
A Figura 9 apresenta um diagrama esquemático do módulo de relaxação de tensão para um polímero em função do tempo, a temperatura constante. Nesta figura é definido um parâmetro temporal τ (tempo de relaxação) que irá caracterizar a escala do tempo para o comportamento viscoelástico do material (CALCOTE, 1968). O tempo de relaxação é definido como o tempo necessário para que a deformação no material seja produzida com a aplicação de um esforço igual a $1/e \approx (36,7\%)$ do esforço original.

Quando ocorrer deformação viscosa, a tensão pode chegar a zero, decorrido um período de tempo suficientemente longo. Caso não ocorra deformação viscosa, a tensão chegará a um valor finito, chamado de módulo de relaxação G_r em um tempo “infinito”.

De forma análoga ao que foi feito no estudo da fluência, pode-se também nesse caso definir uma função denominada módulo de relaxação de tensão (CALCOTE, 1968), dada pela Equação (3):

$$G(t) = \sigma(t)/\epsilon \quad (3)$$

Figura 8. Curva típica de relaxação de tensão a temperatura (T) constante (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K., 1999)



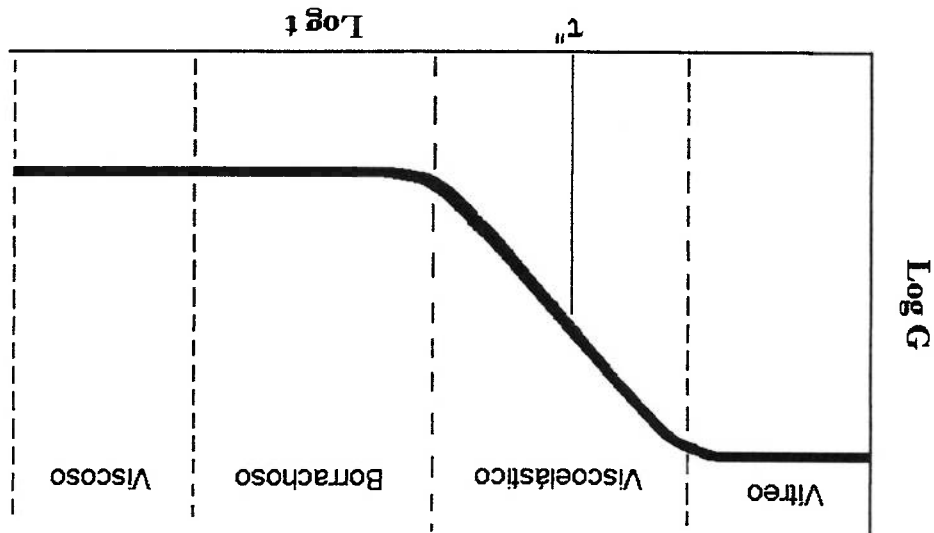


Figura 9- Módulo de relaxação de tensão $G(t)$ a temperatura constante em função do tempo de observação (CALCOTE, 1968).

Deve-se observar que as considerações feitas para o estudo da fluência também são válidas para a relaxação de tensão, isto é, temperaturas mais altas provocarão uma diminuição no valor de τ'' , enquanto temperaturas mais baixas farão τ'' aumentar.

2.1.6 Deformação plástica em polímeros semi-cristalinos.

Nas aplicações práticas, os polímeros semi-cristalinos são usados geralmente entre as temperaturas T_g e T_m , na chamada região de trabalho. A explicação é que abaixo de T_g estes materiais são frágeis e, acima de T_m , se comportam como líquidos viscosos (CANEVAROLO, 2002).

A Figura 10 mostra uma curva de tensão-deformação na região de trabalho, para um polímero semi-cristalino, indicando as mudanças que ocorrem na estrutura do esférulito, com a aplicação de esforços de tração (MEYERS; CHAWLA, 1999).

A Figura 11 apresenta um possível mecanismo de deformação plástica para polímeros semi-cristalinos (CALCOTE, 1968, *apud* DA SILVA, 2002). O modelo apresenta uma dinâmica de deformação em quatro estágios:

A – região cristalina antes da deformação;

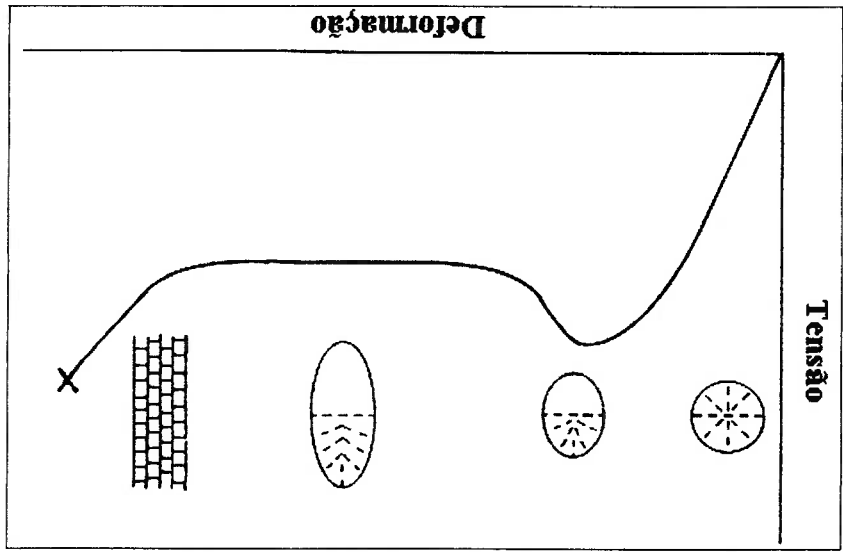
B – cristais deformando por escorregamento, maclação e/ou transformação martensítica;

C – quebra de cristais poliméricos e rompimento das moléculas;

Quando os esfervilhos são deformados homogeneamente, a deformação ocorre pela combinação de mecanismos de escorregamento, maclação e/ou transformação martensítica. Além disto, a presença de regiões amorfas, facilitam o cisalhamento dos cristais.

Inicialmente os esfervilhos adquirem uma forma alongada na direção paralela ao estiramento. Com o aumento dos esforços, maiores são as deformações, conduzindo ao rompimento dos esfervilhos e ao realinhamento das cadeias, resultando em regiões localizadas com morfologia fibrosa, designada por estrutura fibrilar.

Figura 10. Ilustração esquemática da mudança de morfologia do esfervilho durante o estiramento a frio de um polímero semi-cristalino (MEYERS; CHAWLA, 1999)

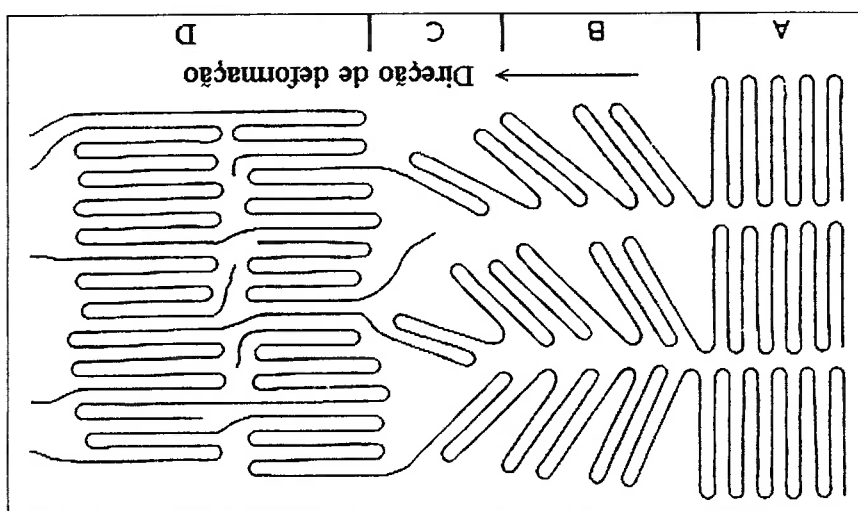


Em geral, os materiais termoplásticos apresentam este tipo de comportamento, ou seja, o aumento da temperatura facilita a deformação plástica e diminui tanto o limite de escoamento como a resistência à tração.

Um outro fator que afeta o comportamento dos materiais termoplásticos durante a aplicação de esforços é a temperatura. Na Figura 12 é mostrado como varia o resultado do ensaio de tensão com a temperatura para o acetato de celulose. Na figura, é observado como a deformação plástica é facilitada pelo aumento da temperatura na faixa entre 0° C e 65 °C, e quando o material é ensaiado a 80 °C, diminui a energia de ligação entre as cadeias produzindo fratura do material com um esforço e uma deformação menores que os aplicados nas outras temperaturas.

No deslizamento de polímeros semi-cristalinos contra materiais considerados muito mais duros, tais como metais e cerâmicos, a interface de deslizamento dos polímeros pode sofrer deformação viscoplástica cuja magnitude dependerá dos parâmetros mecânicos impostos pelo sistema e da rugosidade do contra-corpo (BRISCOE; TABOR, 1978).

Figura 1. Representação esquemática dos mecanismos de deformação plástica atuando em um polímero semi-cristalino (YOUNG; LOVELL, 1991 *apud* DA SILVA, 2002)



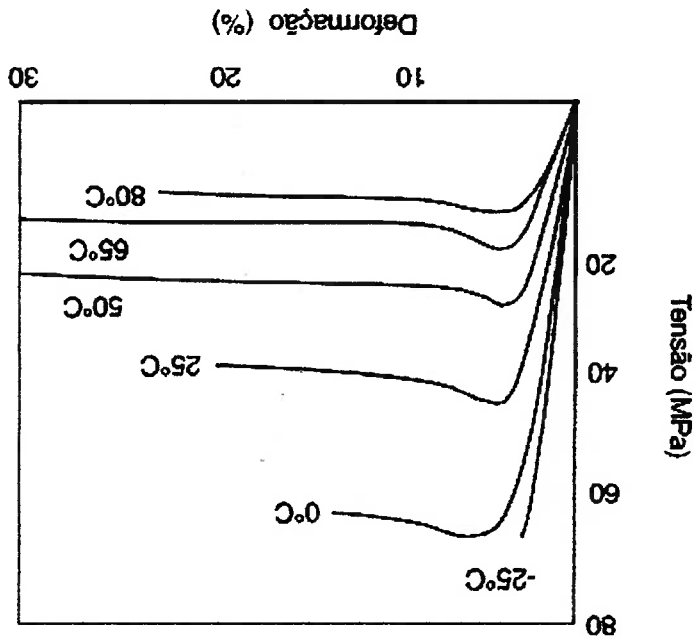
D – realinhamento das cadeias poliméricas na direção de deformação e formação de estrutura fibrilar.

Quando se solicita um material polimérico com uma tensão senoidal, este responderá a esta solicitação com uma deformação atrasada com relação à solicitação. Este atraso se deve à necessidade de ocorrer rearranjos moleculares associados a fenômenos de relaxação de cadeias poliméricas, ou segmentos dela (CANFVAROLO, 1991). A relação entre os valores da tensão aplicada e da deformação é mostrada esquematicamente na Figura 13. Nota-se que nos materiais viscoelásticos a deformação (ε) está atrasada em relação à tensão (σ) pelo ângulo de fase (δ).

Os ensaios dinâmico-mecânicos (DMA) têm como objetivo o estudo do efeito da estrutura molecular, bem como da morfologia dos polímeros, em propriedades como módulo de elasticidade, tempo de relaxação, além dos mecanismos de dissipação de energia.

2.1.7 Comportamento dinâmico-mecânico e energia de amortecimento

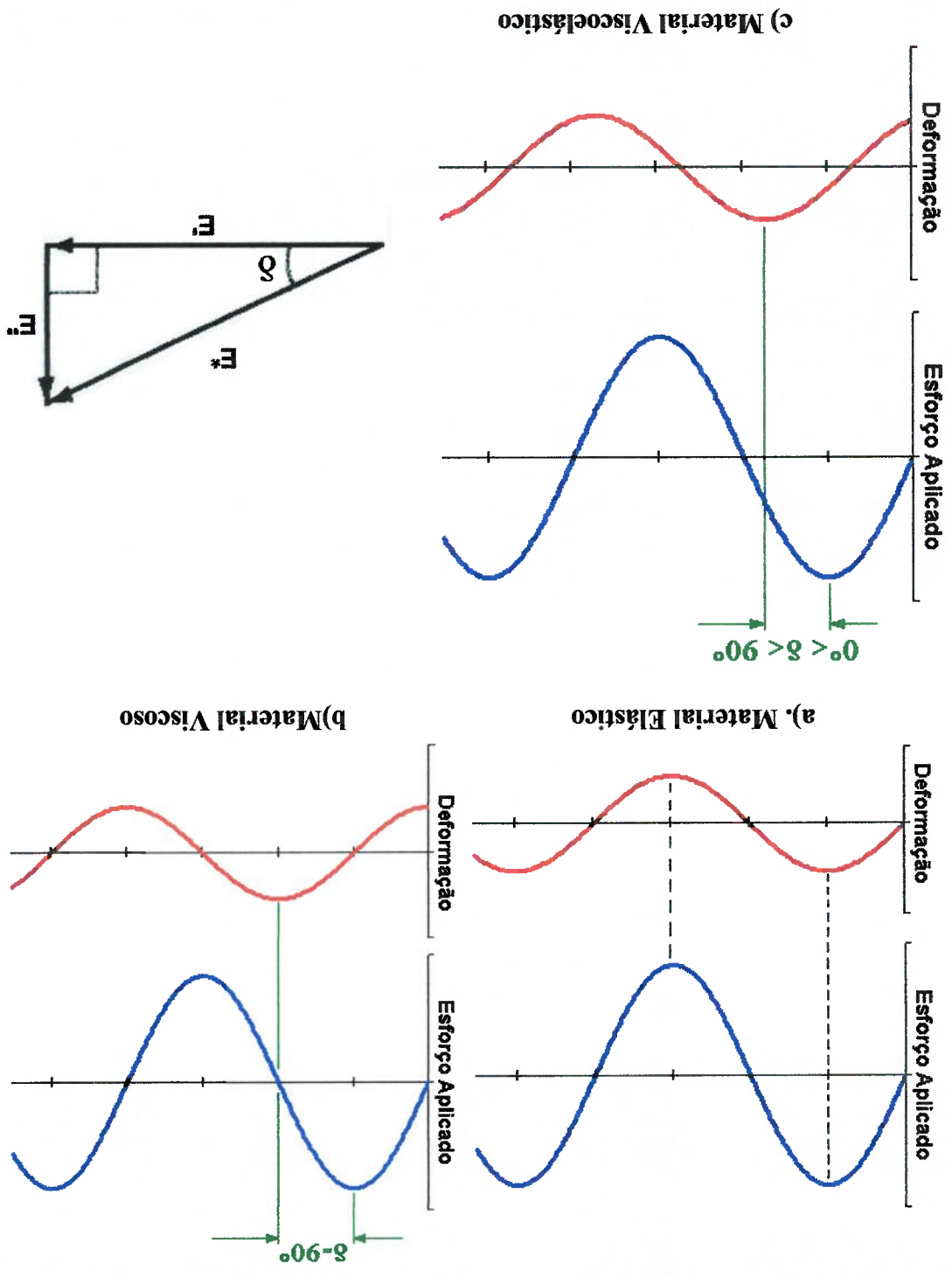
Figura 12. Curvas esforço-deformação para o acetato de celulose a várias temperaturas de ensaio (CANFVAROLO, 2002)



- (5) $\sigma'' = \sigma \cdot \sin \delta$ (componente da tensão fora de fase com a deformação)
- (4) $\sigma' = \sigma \cdot \cos \delta$ (componente da tensão em fase com a deformação)

Separando-se o vetor de tensão em componentes ortogonais, tem-se:

Figura 13 – Variação da tensão e da deformação com o tempo para um material viscoelástico, mostrando o ângulo de fase δ (DP UNION, 2003)



Os correspondentes módulos de elasticidade em fase e fora de fase com a deformação são determinados diretamente das Equações (4) e (5):

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon} = \frac{\sigma \times \cos \delta}{\epsilon} = E^* \times \cos \delta \tag{6}$$

$$E'' = \frac{\sigma''}{\epsilon} = \frac{\sigma \times \sin \delta}{\epsilon} = E^* \times \sin \delta \tag{7}$$

onde:

$$E^* = \text{módulo de elasticidade absoluto} = (E'^2 + E''^2)^{1/2} \tag{8}$$

O módulo de elasticidade em fase com a deformação (E'), chamado de módulo de armazenamento, reflete a resposta elástica do material, onde as componentes de tensão e deformação estão em fase. Esta parte da energia de deformação é introduzida no sistema pela aplicação de σ . Por outro lado, E'' descreve a energia de deformação que é totalmente dissipada (muitas vezes na forma de calor ou atrito interno), por isso é chamado de módulo de perda (CANEVAROLO, 1991).

A relação de amortecimento ou perda de energia do material é dada pela tangente de perda:

$$\frac{E''}{E'} = \frac{E^* \cdot \sin \delta}{E^* \cdot \cos \delta} = \tan \delta \tag{9}$$

Segundo CANEVAROLO (1991) o amortecimento é um indicativo de quão longe está o comportamento do material do comportamento plástico ideal. Materiais com alto amortecimento dissipam muito da energia que foi usada para deformá-lo, na forma de calor. Um material perfeitamente elástico não apresenta amortecimento ($\tan \delta = 0$), enquanto que um material com comportamento Newtoniano, como a água, apresenta amortecimento infinito ($\tan \delta = \infty$).

A Figura 14 apresenta um esquema da variação da capacidade de amortecimento de um polímero semi-cristalino com um único grupo funcional em

função da temperatura (BARTENEV; LAVRENTEV, 1981). Os picos na curva correspondem a mudanças na estrutura do material, que são representadas por letras gregas.

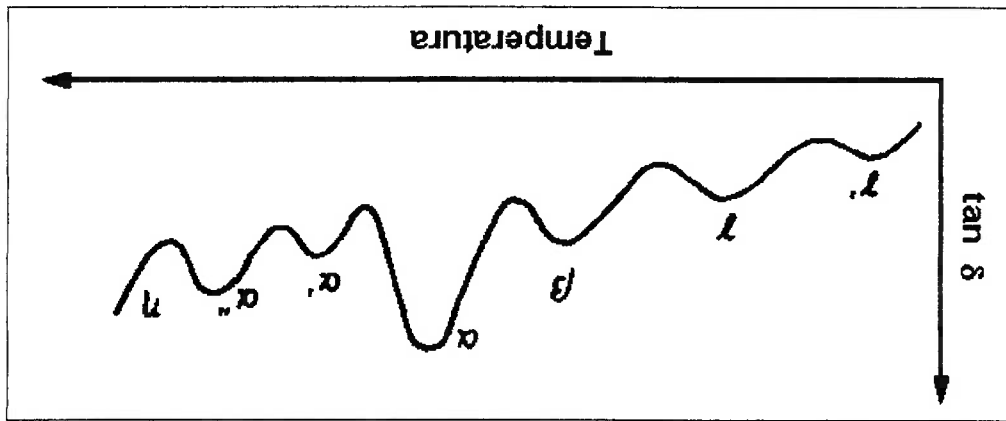


Figura 14 – Representação esquemática da capacidade de amortecimento ($\tan \delta$) de um polímero semi-cristalino em função da temperatura (BARTENEV; LAVRENTEV, 1981).

A Tabela 2 apresenta uma relação entre os picos presentes na curva com movimentos moleculares. No caso de polímeros semicristalinos, é muito difícil explicar o comportamento viscoelástico (posição dos picos) devido à complexidade de uma estrutura bifásica (CANEVAROLO, 1991).

Tabela 2 - Regiões de transição de polímeros (CANEVAROLO, 1991).

<i>Transições</i>	<i>Causa</i>
γ' e γ	Movimentos de pequenos grupos de moléculas no estado vítreo
β	Movimento de 2 - 3 unidades de repetição
α	Mov. coordenados de 10 - 20 unidades de repetição – transição vítrea
α' e α''	Movimentos de estruturas supermoleculares
η	Fusão

Os resultados de módulos de armazenamento e módulo de perda em função da temperatura, obtidos com ensaios DMA, também fornecem informações a respeito das variações na estrutura dos materiais. Na Figura 15 é mostrado como é determinada a temperatura de transição vítrea ($\approx 146^\circ\text{C}$) para o policarbonato (PC)

num ensaio DMA usando o resultado de módulo de armazenamento em função da temperatura (CANEVAROLO, 1991).

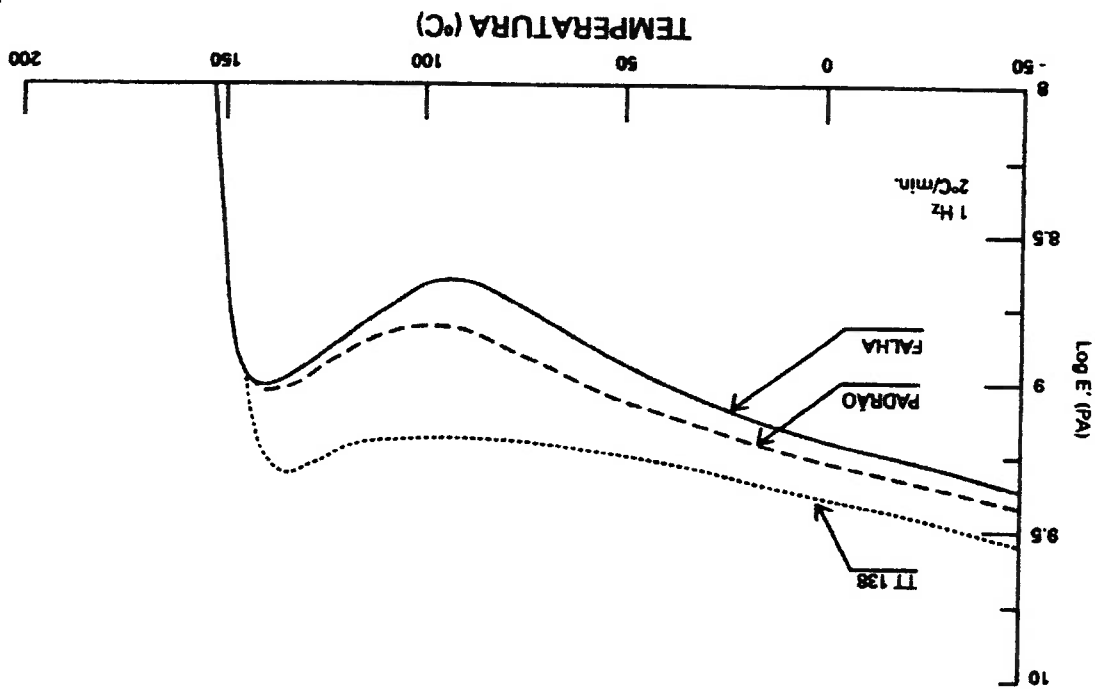


Figura 15. Variação do módulo de armazenamento para amostras de policarbonato (PC) submetidas a várias condições de resfriamento (CANEVAROLO, 1991)

Na literatura russa é usado um parâmetro chamado de temperatura de transição mecânica (T_M) que considera as condições de aplicação da carga (BARTENEV; LAVRENTEV, 1981). Como mostrado na Figura 16, T_M pode ser definida como a temperatura na qual são observadas as máximas perdas mecânicas. De acordo com esses autores, quando o material é aquecido e passa por T_M , a flexibilidade do material aumenta consideravelmente e o módulo elástico diminui abruptamente. T_M é inversamente proporcional à duração da aplicação da força, e aumenta com a frequência de deformação. Segundo esses autores, T_g é obtida sem aplicação de sollicitações mecânicas, enquanto que T_M depende do estado de esforços do material.

Parâmetros como coeficiente de atrito estático e dinâmico e resistência ao desgaste são considerados propriedades do sistema, ou melhor, do tribossistema e

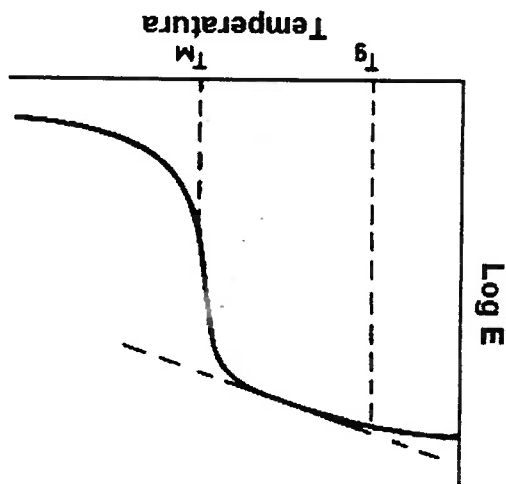
a zona atingida pelos fenômenos decorrentes da interação entre os sistemas. caso, os termos não fazem diferença. É usado também o termo interface para denotar possível que num tribossistema ambos os componentes sejam alvo de estudo e, nesse de análise, e aquele que faz contato é o contra-corpo, mas este termo é arbitrário e é (WILLIAMS, 1995). Geralmente, é chamado de corpo o material que está sendo alvo um corpo, um contra-corpo e um meio no qual a interação entre estes dois acontece Pode-se considerar, em termos gerais, que um tribossistema é formado por

os materiais em contato (HUTCHINGS, 1992). desgaste de superfícies de engenharia, com o objetivo de entender as interações entre A tribologia é definida como a ciência que estuda o atrito, a lubrificação e o

2.2 Tribologia dos polímeros

Como foi explicado, os ensaios mecânico-dinâmicos permitem observar a resposta dos materiais às aplicações mecânicas, permitindo analisar as propriedades mecânicas em função das condições de temperatura nas que o material se encontra.

Figura 16. Variação do módulo elástico E em função da temperatura mostrando a temperatura de transição mecânica T_M (BARTENEV; LAVRENTEV, 1981)



não como uma propriedade do material. A explicação para esta afirmação consiste no fato de que além dos materiais em contato, há outros fatores que têm um papel fundamental na resposta tribológica do sistema. A modo de resumo, alguns dos fatores mais importantes são (ZUM GAHR, 1988):

- Condições de carregamento
- Características macrogeométricas
- Características microgeométricas
- Propriedades mecânicas e físico-químicas dos materiais
- Propriedades do meio
- Características do meio interfacial presente e formado na interação

Desta forma, para se determinar as propriedades tribológicas, ou para analisar resultados obtidos de ensaios experimentais, é extremamente necessário especificar as condições do sistema tribológico em estudo.

Segundo DA SILVA (2001), a própria observação do sistema tribológico, e a interação dos fenômenos que ocorrem na região do contato, nos sugerem uma relação biunívoca entre o coeficiente de atrito e o comportamento ao desgaste dos materiais do sistema. No entanto, tanto os livros-texto sobre tribologia de polímeros (YAMAGUSHI, 1990; BARTENEV; LAVRENTEV, 1981; e BRISCOE; TABOR, 1978), quanto os artigos técnicos de revisões ou *review papers* (SANTNER; CZICHOS, 1989; LUDEMA; TABOR, 1966; e ZHANG, 1998) geralmente apresentam separadamente os assuntos de atrito e de desgaste de polímeros. Tal fato se justifica pela complexidade dos assuntos e pela necessidade de um entendimento claro sobre os dois fenômenos, conduzindo assim a uma congruência de conhecimentos e a uma visão global deste ramo da tribologia.

A mesma postura também será empregada nas seções a seguir e, em função do escopo do trabalho, a revisão apresentada estará centrada nos termoplásticos.

2.3 Atrito dos materiais termoplásticos

Quando os polímeros deslizam sobre outros materiais, metálicos e/ou não-metálicos, o atrito tende a ser determinado pelas propriedades do material polimérico, já que algumas propriedades mecânicas como dureza, tensão de escoamento e limite de resistência à tração são significativamente menores quando comparadas com as dos metais e dos materiais cerâmicos. Este fato não exclui a significativa parcela de contribuição de características de superfície (mecânicas e físico-químicas).

Para melhor entender os fenômenos atuantes no contato envolvendo pelo menos um material polimérico, apresenta-se seguir uma descrição dos mecanismos de atrito atuantes nos termoplásticos.

2.3.1 Mecanismos de atrito

O atrito nos polímeros, assim como para metais, é atribuído a dois mecanismos principais, o de deformação e o de adesão (LUDMA; TABOR, 1966) e (LANCASTER, 1990). A Figura 17 mostra, para o deslizamento de uma aspereza dura contra uma superfície polimérica, a região onde ocorre mecanismo de deformação (zona coesiva) e de adesão (zona interfacial).

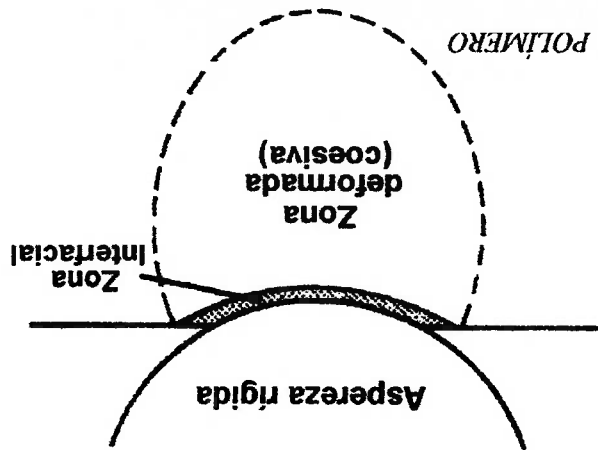


Figura 17 - A origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica (BRISCOE, 1981).

O mecanismo de deformação envolve dissipação completa de energia em volta da área de contato, produzindo uma indentação no caso de um contato estático ou um sulco quando houver deslizamento. Este mecanismo possui forte dependência com a rugosidade do contra-corpo.

O mecanismo de adesão é proveniente das fracas forças atômicas de ligação, responsáveis pela coesão entre as cadeias poliméricas. Este mecanismo está relacionado com o cisalhamento das junções entre o corpo e o contra-corpo e a deposição de filmes de polímero transferidos ao contra-corpo (BARTENEV; LAVRANTEV, 1981). Na Figura 18 é mostrado como o coeficiente de atrito variou com a formação de uma camada de termoplástico, posteriormente transferida a um contra-corpo de vidro. Quando esta camada estabilizou-se no contra-corpo, o coeficiente de atrito diminuiu. Este é um exemplo de como o coeficiente de atrito está intimamente relacionado com o fenômeno do desgaste.

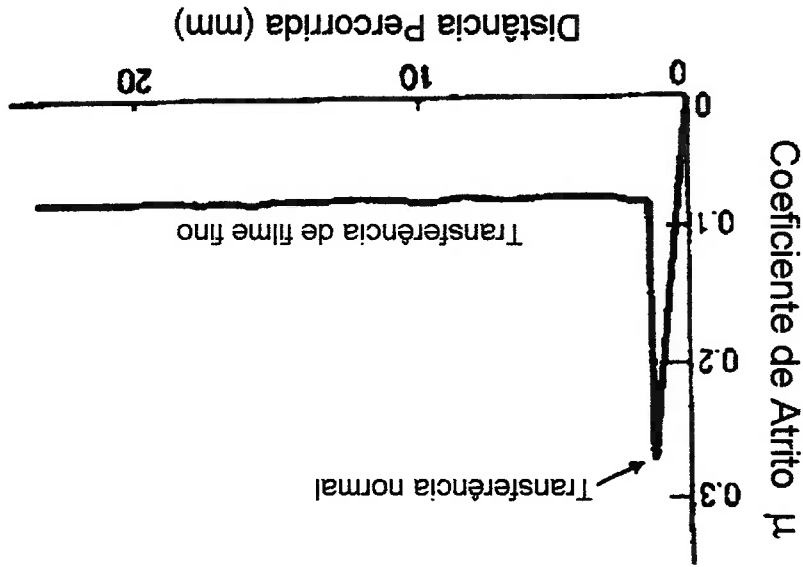


Figura 18. Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para o HDPE deslizando contra vidro. (HUTCHINGS, 1992)

Um dos fatores que explica este comportamento é a modificação da estrutura do polímero no contato, facilitando a adesão de material plástico ao contra-corpo e produzindo um deslizamento entre as cadeias no interior do material polimérico. A Figura 19 mostra, esquematicamente, o aspecto microscópico do atrito entre

superfícies de aço e de polietileno (PE). Neste caso, o movimento relativo ocorre entre as moléculas A e B do PE, pois a superfície do aço adere mais fortemente às moléculas de PE, do que estas entre si.

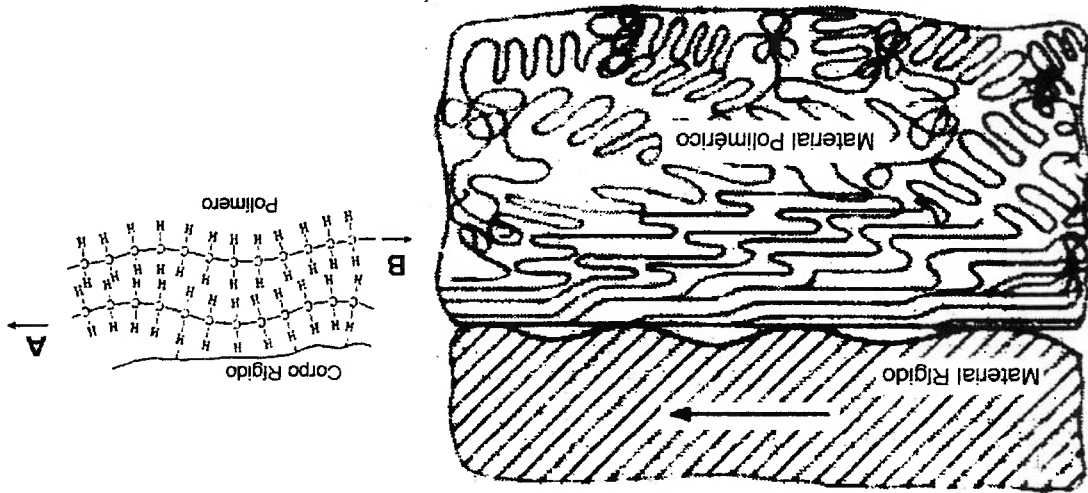


Figura 19 - Modelo de deslizeamento entre as macromoléculas de PE (YAMAGUSHI, 1990).

2.3.2 Efeito da Energia de superfície

No início da década de 60 do século XX começou-se a buscar uma correlação entre as propriedades tribológicas dos materiais e as energias presentes nas superfícies em contato. Se o mecanismo de adesão é considerado o principal mecanismo para polímeros deslizando, a seco, sobre uma superfície 'lisa', é razoável crer que as interações eletrostáticas e/ou de Van der Waals tenham papel fundamental para o coeficiente de atrito (DA SILVA, 2002). No entanto, a compreensão dos fenômenos de adesão e a sua correlação com a energia de superfície (ou trabalho de adesão) é mais complicada quando do deslizeamento sobre superfícies mais rugosas, pois a componente de deformação começa a ter papel decisivo no valor do coeficiente de atrito.

LEE (1983) *apud* KURITSUYNA; MEISNER (1988) obteve resultados interessantes isolando a componente de adesão do atrito. A Figura 20 mostra a

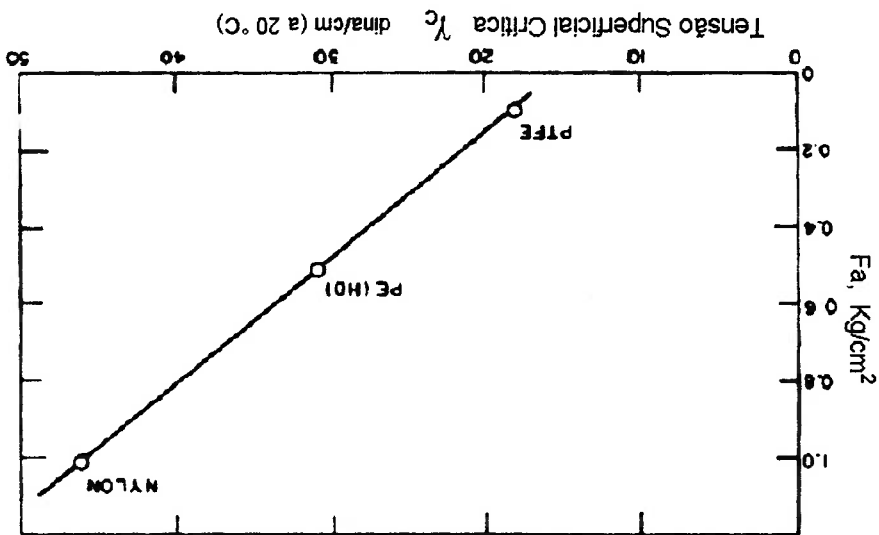
Nos últimos anos, muito tem se investido no estudo do desgaste de tribossistemas contendo pelo menos um componente de material termoplástico. Uma primeira e bem difundida conclusão é que o parâmetro denominado condição PV, dado pelo produto entre a carga aplicada e a velocidade de deslizamento, definirá os níveis de desgaste em um sistema (ZUM-GAHR, 1987; RUBEM *et al*, 1993;

2.4 Desgaste por deslizamento nos termoplásticos

Como indicado nesta seção, a contribuição da adesão ao atrito nos materiais termoplásticos não tem sido ainda bem definida em termos de equacionamento. O que interessa para este estudo é que há uma relação entre a adesão do material termoplástico com o contra-corpo e o coeficiente de atrito presente no sistema.

É importante considerar que a componente de deformação pode ser indiretamente afetada pela componente de adesão, pois uma alta aderência entre polímero e contra-corpo pode reduzir a perda de energia por amortecimento do polímero (LEE, 1983; *apud* KURITSUYNA; MEISNER, 1988).

Figura 20 – Relação entre a componente de adesão do atrito e tensão superficial crítica (LEE, 1983; *apud* KURITSUYNA; MEISNER, 1988).



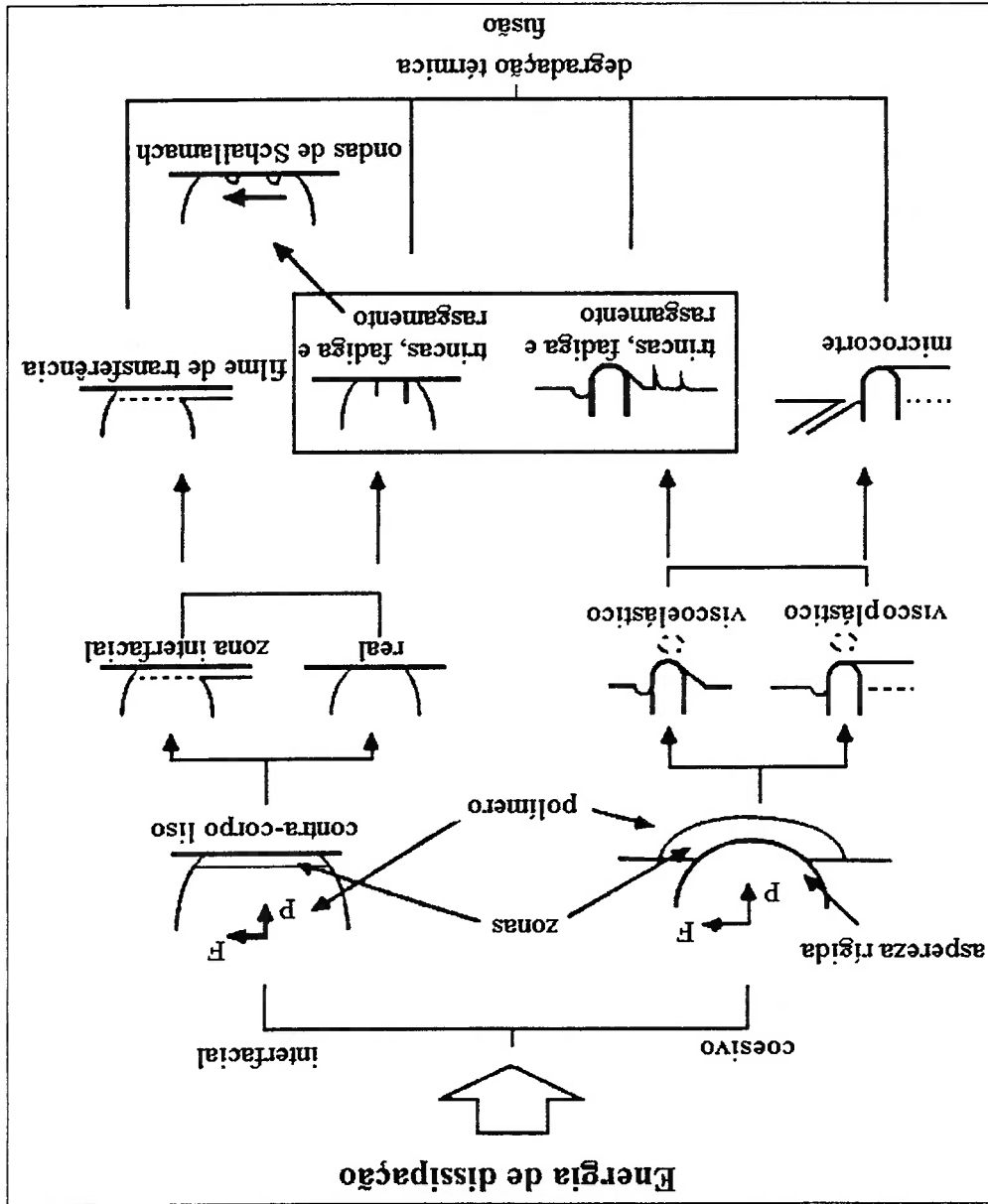
influência da tensão superficial crítica, parâmetro relacionado com a energia de superfície, na força de adesão para o PTFE, polietileno e poliamida.

BRISCOE (1990) desenvolveu um esquema (Figura 21) para identificar os fenômenos envolvidos no desgaste por deslizamento dos polímeros. O contra-corpo é considerado perfeitamente rígido e todo o trabalho de atrito, convertido na forma de calor, é evacuado do sistema. Entretanto, existem volumes adjacentes de material chamados de zonas de dissipação de energia primária, onde o trabalho é dissipado principalmente pelas deformações inelásticas. Estes processos de deformação mudam as características do polímero ou do meio ambiente, bem como provocam a reorientação das cadeias poliméricas e aumentam a temperatura da interface.

ARGAWAL *et al.*, 1989; MARCUS *et al.*, 1951). O grau de cristalinidade, a mobilidade e a flexibilidade da macromolécula, a capacidade de formação de radicais livres, os grupos funcionais originais e a presença de ligações duplas de carbono são algumas das características microestruturais que também influenciam o desgaste dos materiais poliméricos (YAMAGUSHI, 1990).

A Figura 21 incorpora o modelo previamente citado de duas componentes para o atrito. A primeira componente é proveniente das forças de adesão entre o polímero e o contra-corpo rígido e conduz a um processo de dissipação interfacial de energia. Acredita-se que a componente de adesão influencia a “zona de dissipação de energia primária”, normalmente localizada próxima da interface, com uma espessura típica de 2 a 10 nm. Outra componente é chamada de deformação ou sulcamento e geralmente influencia volumes que são muito maiores, sendo comparáveis com o

Figura 21. Descrição dos mecanismos de dissipação de energia no deslizamento de um polímero contra um contra-corpo rígido (BRISCOE, 1990).



compromimento de contato aparente. Estas componentes são responsáveis pelas classes de mecanismos de desgaste que envolvem fenômenos de superfície e deformações sub-superficiais, sendo respectivamente chamadas de desgaste por adesão e desgaste por abrasão, processo interfacial e processo coesivo (HUTCHINGS, 1992) ou ainda desgaste interfacial e desgaste por deformação volumétrica (LANCASTER, 1990).

No deslizamento de materiais poliméricos contra um contra-corpo rígido, muitas vezes ocorre um mecanismo de desgaste que tem como característica a deposição de um filme sobre o contra-corpo. Algumas condições de deslizamento promovem a formação de filmes com espessura constante (TANAKA, 1982), pois ocorre um balanço entre mecanismos de arrancamento e de deposição. Nestas condições admite-se que apenas as camadas superiores de filme de transferência são removidas. A estabilidade destes filmes também depende da maior adesão entre estes e o contra-corpo; quanto maior esta adesão, menor será a taxa de desgaste (MARCUS *et al.*, 1951).

A seguir, serão apresentados os mecanismos de desgaste de materiais poliméricos que envolvem mecanismos de transferência de filme e mecanismos “tradicionais”, como fadiga, adesão e abrasão.

2.4.1 Transferência “normal” em plásticos deslizando contra metais

Nos tribossistemas onde há contato entre um termoplástico e um metal, por vezes a junção entre polímero e contra-corpo metálico é mais forte que o próprio polímero, fazendo com que o desgaste do material ocorra por transferência de fragmentos de plástico em direção ao contra-corpo. Repetidos deslizamentos conduzem a uma progressiva transferência de camadas, as quais eventualmente se destacam. A transferência conduz à formação de filmes irregulares com espessuras da ordem de 0,1 a 1,0 μm (BAHADUR, 2000).

Sobre estas condições, denominadas como “transferência normal” (ZUM-GAHR, 1987) ou “regime de alto atrito”, o polímero é transferido para o contra-corpo sem significativo rompimento de cadeias ou degradação química.

Não está bem estabelecido se estes filmes são depositados à mesma taxa em que o material é perdido, ou se os detritos que vão sendo arrancados do polímero vão formando o filme. Esta última hipótese é mais provável, pois frequentemente encontrou-se volumes de filmes maiores do que as cavidades de desgaste.

Existe uma evidência (BAHADUR, 2000) de que certos polímeros relatam em transferir filmes para si mesmos, resultando em menores taxas de desgaste. Segundo este mesmo autor, fenômeno está relacionado com um processo de destacamento intercristalino, pois as tensões excedem a resistência entre cristais ou grãos.

2.4.2 Transferência lamelar

O mecanismo de transferência lamelar também é conhecido como regime de baixo atrito ou mecanismo de cisalhamento lamelar (BRISCOE, 1990). Na Figura 22, este mecanismo é chamado de processo “a frio” e “não degradante” (Tipo B). Este mecanismo se refere a um comportamento “especial” de polímeros como o PTFE, HDPE e o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE). Estes polímeros, pela configuração das cadeias poliméricas e a ausência de grupos do tipo polar ou volumétrico, são chamados de “polímero de perfil molecular plano ou liso” (BRISCOE, 1990; SPEERSCHNEIDER, 1962). Estas características conduzem a um alto grau de cristalinidade e ligações intermoleculares fracas.

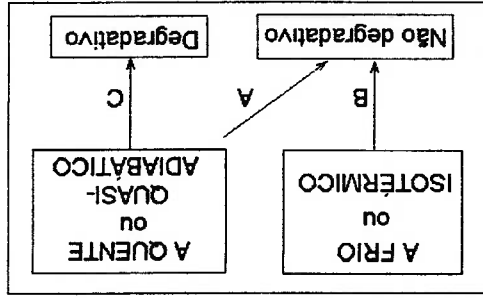


Figura 22 - Os três modos genéricos (A, B e C) de transferência de filme polimérico (BRISCOE, 1990).

Os filmes de transferência são mais uniformes do que nos outros mecanismos de transferência e apresentam espessura entre 1 a 40 nm (BAHADUR, 2000). Estes filmes são originários da extrusão de lâminas ou fibras destes polímeros, que são particularidades de sua microestrutura.

Embora estes polímeros formem filmes em um contra-corpo duro, subsequentes deslizamentos na mesma direção tendem a ocorrer na interface entre o corpo polimérico e o filme, conduzindo a uma baixa taxa de desgaste. O coeficiente de atrito diminui com a formação do filme, como também diminuem as tensões de contato ao mudar de contato metal-polímero para polímero-polímero (TANAKA *et al.*, 1973).

O filme transferido é muito fino e contém cadeias moleculares fortemente orientadas na direção de deslizamento (BAHADUR, 2000). Porém, a adesão é fraca, o filme é altamente deformado e removido durante os movimentos subsequentes. Deve ser feita uma distinção entre filme de transferência e detritos de desgaste compactados e deformados, frequentemente vistos na superfície de desgaste.

2.4.3 Transferência por Fusão

Polímeros termoplásticos, geralmente têm baixa condutividade térmica e baixa temperatura de amolecimento e fusão (CALLISTER, 1994). Estes fatores conduzem a um amolecimento sob condições de deslizamento muito mais leves do que as suportadas pelos metais, indicando que o rápido aumento da taxa de desgaste que ocorre com o LDPE (Figura 23) é devido ao amolecimento térmico. O mesmo efeito é seguido com um aumento da velocidade, ficando bem claro a importância da condição PV para este mecanismo. Seguindo com os conceitos da Figura 22, este mecanismo pode ser classificado como transferência “a quente” e “não degradativa” (Tipo A).

1. Deformação das superfícies numa área de contato determinada pela dureza de indentação H_i ;

2. Deslizamento relativo na direção oposta à força de atrito μP ; e

tinha três estágios:

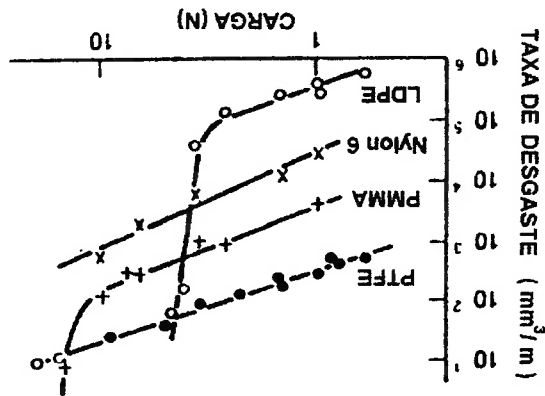
Uma proposta para relacionar o desgaste abrasivo dos polímeros com as propriedades medidas no ensaio de tração foi apresentada por RATNER *et al.*, em 1964, baseada na produção de partículas arrancadas da superfície (CENNA *et al.*, 2003). Os autores propuseram que a produção de partículas decorrentes do desgaste ocorre pelo destacamento de material de superfícies em movimento relativo, causado pela presença de asperezas do contra-corpo ou pela presença de partículas duras entre as superfícies ou embebidas em uma delas (LANCASTER, 1969).

O mecanismo de desgaste abrasivo tem sido definido como o desgaste que

2.4.4 Abrasão

Com o aumento da temperatura, devido ao atrito, ocorre a destruição dos esterulitos e uma queda da resistência ao cisalhamento, conduzindo a uma amortização e a um escoamento plástico (LANCASTER, 1969). Com uma posterior elevação da temperatura, este processo pode tornar-se “degradativo”, atuando assim, o mecanismo do tipo C (vide Figura 22).

Figura 23 - Variação da taxa de desgaste no estado estacionário com a carga normal no deslizamento contra uma superfície de aço ($R_a=0,15 \mu\text{m}$) sob condição não-lubrificada (EVANS *et al.*, 1979 *apud* HUTCHINGS, 1992)



3. Destacamento do material na região de contato envolvendo uma quantidade de trabalho equivalente à integral da relação esforço-deformação. Uma medida aproximada para esta integral é o produto do esforço de ruptura, σ_u , e o alongamento na ruptura ϵ_u .

Já que o processo descrito ocorre sequencialmente, o desgaste total pode ser assumido como sendo proporcional à probabilidade de cada estágio acontecer. Segundo estes autores, o volume de desgaste por unidade de distância percorrida é:

$$V = c \frac{H_G \epsilon_u}{\mu P} \quad (10)$$

sendo “c” uma constante empírica.

Esta formulação foi desenvolvida sem uma pesquisa detalhada a respeito dos mecanismos de ruptura e separação das partículas na região superficial (CENNA *et al.*, 2003). Tentando explicar melhor os fenômenos que influenciavam o modelo de RATNER (1964), LANCASTER (1969) fez uma revisão do desgaste abrasivo de polímeros e identificou os diversos processos físicos envolvidos. Com base numa análise dos resultados experimentais da abrasão a dois corpos concluiu que nos polímeros a deformação plástica é predominante somente quando o indentedor é muito agudo. Isto é devido aos módulos elásticos dos polímeros serem consideravelmente menores que os módulos dos metais, fazendo com que a deformação elástica tenha um papel muito mais importante na mecânica do contato e, conseqüentemente, no desgaste abrasivo dos polímeros.

Com base nos trabalhos de RATNER *et al.* (1964) e LANCASTER (1969), BRISCOE (1981) desenvolveu um trabalho experimental com diversos polímeros em condições predominantemente abrasivas. O resultado é apresentado na Figura 24.

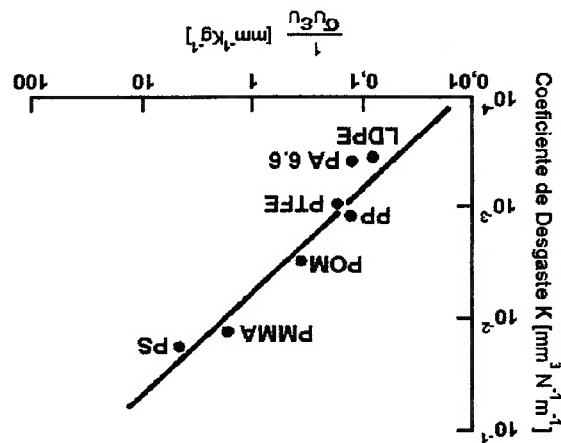
Podese dividir o fenômeno de fadiga em superfícies poliméricas em dois mecanismos. O primeiro refere-se às deformações cíclicas provocadas pelas asperezas do contra-corpo. O outro mecanismo é chamado de *macroscopic polymer*

2.4.5 Fadiga

O mecanismo de abrasão pode ser uma decorrência de outros mecanismos que, ao produzirem partículas de desgaste, fornecem um terceiro corpo. Com o deslizamento, as partículas de desgaste movem-se para a região de contato (BARTENEV, LAVRANTEV, 1981) e, com isso, deformam as superfícies, provocam trincas no filme e por vezes formam fibras. Existem evidências sugerindo que durante o deslizamento, as deformações provocadas pelas asperezas do contra-corpo não são suficientes para atingir o limite de escoamento e que as partículas se destacam pela ação de mecanismos de fadiga (LANCASTER, 1990).

A idéia principal da relação RATNER-LANCASTER é que existe uma deformação crítica na região de contato que deve ser superada antes que o material seja arrancado, e que essa energia crítica de deformação é proporcional à energia de ruptura do material. No trabalho desenvolvido por esses autores, a energia necessária para a criação das novas superfícies durante o processo de destacamento de material não é considerada.

Figura 24. Correlação de RATNER-LANCASTER para desgaste de polímeros em condições predominantemente abrasivas (BRISCOE, 1981 *apud* HUTCHINGS, 1992).



asperit wear process (BRISCOE, 1990) e é descrito pela remoção de material, quando o mesmo sofre altas deformações devido à concentração de tensão superficial e sub-superficial; geradas pelas altas asperezas da superfície do polímero (TANAKA, 1982)

A fadiga foi associada com :

- baixa severidade, formando um filme não contínuo (LANCASTER, 1990);
- deformações residuais de cisalhamento em planos perpendiculares à direção de deslizamento;
- deformação de uma superfície nominalmente plana, pelas interações repetidas com as asperezas microscópicas do contra-corpo (TANAKA, 1982).

2.4.6 Adesão

A adesão também tem sido identificada como um mecanismo de desgaste atuante no contato deslizante dos plásticos (ZHANG, 1998; BARTENEVEV, LAVRANTEV, 1981; ZUM-GAHR, 1987; HUTCHINGS, 1992).

A transferência de um polímero para uma superfície metálica começa devido à adesão entre ambos os materiais e, durante o deslizamento, esta adesão contribui para o escoamento na região abaixo da superfície (BAHADUR, 2000). Diferentes mecanismos de adesão têm sido propostos, os quais estão baseados nas forças eletrostáticas de Coulomb, nas forças de Van der Waals e em ligações devido a reações químicas. Um mecanismo adesivo proposto para o desgaste de PTFE está associado à formação de ligações entre as camadas superficiais do polímero e os radicais livres da superfície metálica do contra-corpo (MCNICOL *et al.*, 1995).

A Figura 25 (BAHADUR, 2000) mostra um filme de PEEK formado na superfície de um disco de aço, como resultado do arrancamento gerado inicialmente pela adesão entre as superfícies.

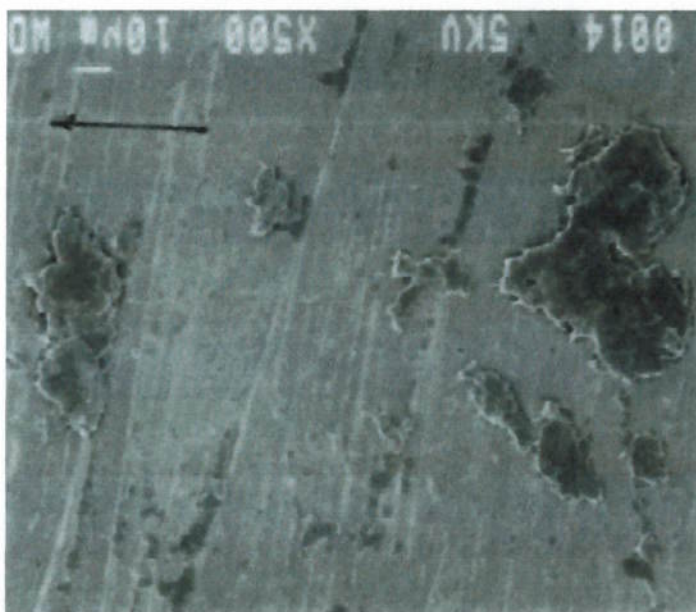
Na realidade, sabe-se que as propriedades mecânicas do material polimérico na região de contato dependem da temperatura atingida no processo de desgaste. Entretanto, ainda é necessária uma discussão mais profunda de como os processos de relaxação em combinação com a temperatura afetam as propriedades dinâmico-mecânicas dos polímeros.

Para compreender este tipo de relação, a temperatura na região de contato destes materiais passa a ser um parâmetro de extrema importância, pois possui influência decisiva no comportamento mecânico dos polímeros.

Mesmo com a evidente influência das propriedades viscoelásticas no coeficiente de atrito e no comportamento quanto ao desgaste dos materiais poliméricos, pouco se tem feito na tentativa de correlacionar, diretamente, propriedades dinâmico-mecânicas com propriedades tribológicas.

2.5 Relação entre propriedades dinâmico-mecânicas e comportamento tribológico dos termoplásticos .

Figura 25. Filme transferido de PEEK a uma superfície de aço (BAHADUR, 2000).



O trabalho clássico de LUDÉMA, TABOR (1966) conseguiu mostrar (Figura 26) uma correlação muito importante entre o coeficiente de atrito por rolamento, o qual basicamente representa a parcela do atrito referente a deformação na região próxima à região do contato, e a capacidade de amortecimento do polímero, representado pela $\tan \delta$ (Equação 9).

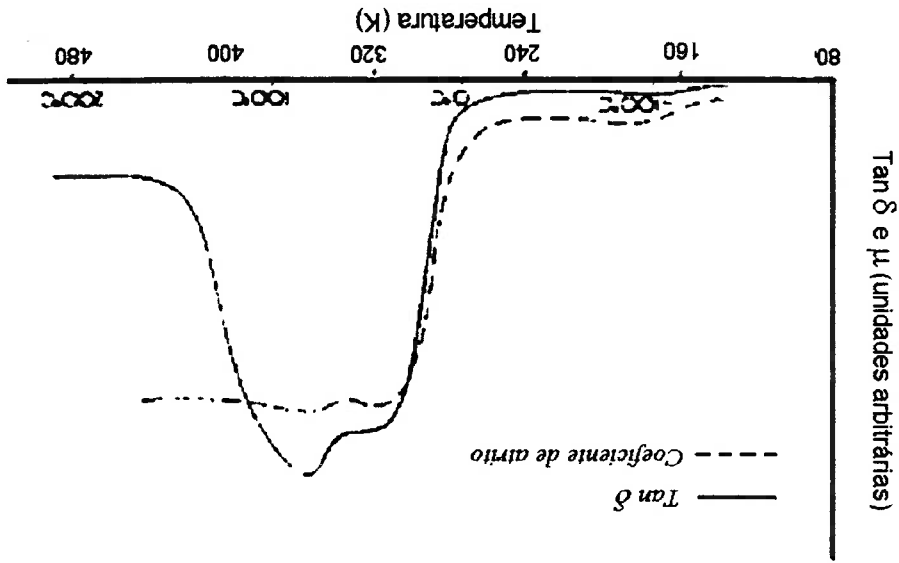


Figura 26 – Coeficiente de atrito por rolamento e $\tan \delta$ do PTFE com 92% de cristalinidade, em função da temperatura (LUDÉMA, TABOR(1966))

Pode-se concluir que a energia específica absorvida, utilizada para a movimentação de moléculas do polímero, possui uma correlação direta com a componente de deformação do coeficiente de atrito dinâmico.

Trabalhos como o desenvolvido por WEICK, BRUSHAN (1995) estão preocupados em compreender o comportamento dinâmico-mecânico de materiais poliméricos utilizados na fabricação de fitas magnéticas. Além de se tornar uma ferramenta na seleção de materiais para estas fitas, a análise dinâmico-mecânica fornece informações sobre desgaste do cabeçote e coeficiente de atrito dos pares fita-cabeçote e fita-fita.

Com o estudo de cinco tipos de polímeros diferentes: Poli (tereftalato de etileno) (PET), poli(etileno-naftalato) (PEN), ARAMIDA (uma poliamida aromática), poli-imida (PI) e poli(benzoxazola) (PBO), os quais apresentaram rugosidades diferentes após a fase de fabricação, foi possível observar que o PEN e ARAMIDA apresentaram as melhores propriedades dinâmico-mecânicas. Entretanto o PET continua com os menores valores de coeficiente de atrito, indicando, assim, a necessidade de se contrabalançar os efeitos de atrito e desgaste na escolha de materiais para aplicações práticas.

Segundo DA SILVA (2001), a capacidade de dano de mecanismos como micro-fadiga e micro-corte devem se alterar à medida em que a relação entre módulo de perda e de armazenamento é modificada. Entretanto, até o momento, não foi possível chegar a conclusões definitivas sobre como modificações físico-químicas, provocadas pela variação na temperatura de contato, alteram as propriedades tribológicas destes materiais.

A solução para o entendimento destes fenômenos passa, principalmente, por um maior entendimento de como a frequência e a forma de carregamento influenciam a medição das propriedades dinâmico-mecânicas.

2.6 Influência dos parâmetros do sistema no comportamento tribológico dos termoplásticos

2.6.1 Velocidade de deslizamento

Devido à natureza viscoelástica dos polímeros, uma variação na velocidade de deslizamento poderá provocar mudanças significativas nos mecanismos de atrito e desgaste, principalmente pela sua importância na temperatura desenvolvida na região de contato (BARTNEV, LAVENTEV, 1981).

LUDEMA; TABOR (1966) verificaram que o aumento da velocidade de deslizamento provoca um aumento na tensão de cisalhamento na região próxima à superfície de contato. Além disto, da análise do contato entre superfícies rugosas proposta por GREENWOOD; WILLIAMSON (1966), sabe-se que a área de contato é proporcional a $E^{2/3}$ (E = módulo de elasticidade) e que ela diminui com o aumento da velocidade.

A Figura 27 apresenta a análise proposta por LUDEMA; TABOR (1966), que utilizaram a hipótese de BOWDEN; TABOR (1948) para a força de atrito. Segundo estes últimos, a força de atrito é expressa pelo produto da tensão de cisalhamento na superfície aplicada e da área real de contato ($F = \tau \cdot A$).

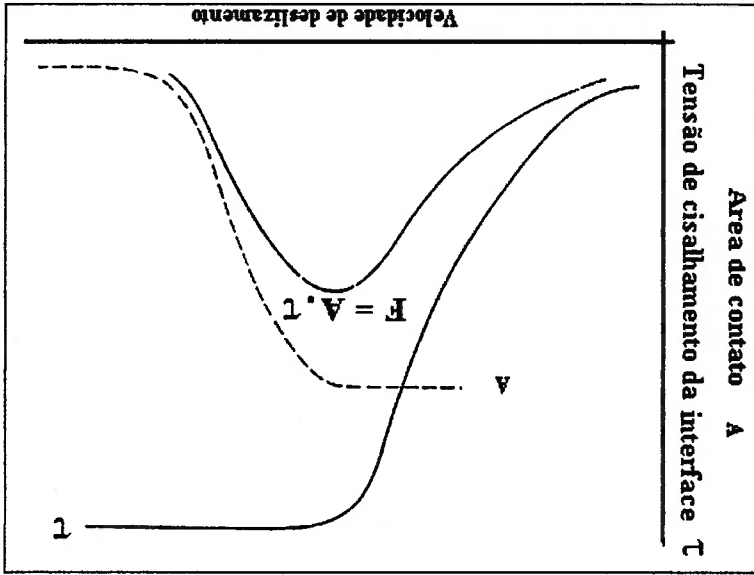


Figura 27 - Comportamento da área real e da tensão de cisalhamento em função da velocidade de deslizamento (LUDEMA; TABOR, 1966).

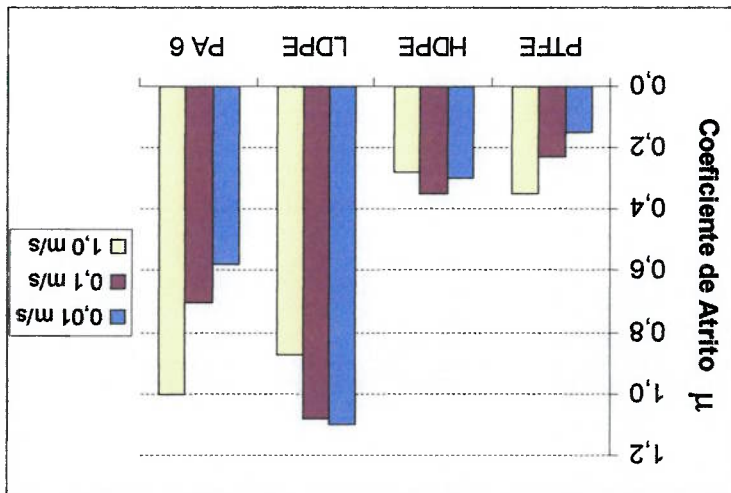
Como exemplo de um resultado de influência da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito, a Figura 28 mostra o comportamento do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento do polietileno de alta e baixa densidade, do politetrafluoretileno (PTFE) e da poliamida 6 (PA6), obtido por TANAKA; YAMADA (1999).

O estudo do comportamento tribológico dos polímeros em função da carga aplicada tem sido foco de estudo de muitos pesquisadores. SANTNER, CZICHOS (1989); BRENTNALL, LANCASTER (1989) e CLERICO (1969) observaram que o coeficiente de atrito dinâmico de polímeros, quando atritados contra metais, diminui à medida em que se eleva a carga. Exatamente opostos foram os resultados obtidos

2.6.2 Carga aplicada

A Figura 28 indica que, dependendo da velocidade de deslizamento, e dos materiais em contato, o coeficiente de atrito dinâmico será inversa ou diretamente proporcional ao aumento da velocidade de deslizamento, ou terá um máximo relativo, dependendo da faixa de velocidade estudada (MCLAREN, TABOR, 1965; BELLOW, VISWANATH, 1993). Uma possível explicação é que a velocidade de deslizamento, por si só, não constitui de uma maneira clara um parâmetro que determine o comportamento do coeficiente de atrito. É necessário considerar também o tipo de ensaio, a carga aplicada e a faixa de temperaturas que o material atinge (RHEE, LUDEMA, 1978). THORP (1982) verificou que a presença de lubrificante diminui, mas não elimina, a influência da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito.

Figura 28- Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento para alguns termoplásticos (TANAKA; YAMADA 1999).



por VINOGRADOV *et al* (1965) e DA SILVA *et al* (1999). Uma possível explicação para esta contradição pode ser obtida no trabalho de YAMAGUCHI (1990) que, para o deslizamento entre poliamida e aço, mostrou que o coeficiente de atrito dinâmico apresenta uma região de máximo com a variação carga aplicada. Com isto, pode-se supor que os resultados onde o coeficiente de atrito é inversamente proporcional à carga aplicada foram realizados em regiões particulares, que não estabelecem uma generalidade. O mesmo raciocínio pode ser feito para os resultados exatamente opostos.

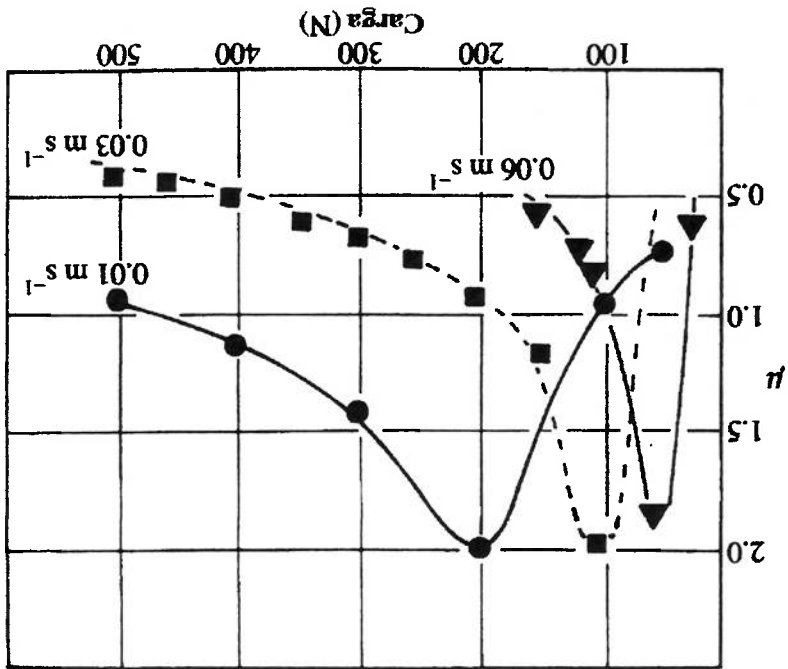


Figura 29. Relação entre coeficiente de atrito dinâmico e carga para várias cargas aplicadas para um sistema poliamida e aço (YAMAGUCHI, 1990).

A Figura 30 apresenta os resultados obtidos para o PTFE puro e composto (DU), onde o coeficiente de atrito, no eixo z, é influenciado tanto pela carga aplicada como pela velocidade de deslizamento. Tal fato nos sugere que o binômio PV (carga-velocidade) controla os níveis de atrito em sistemas tribológicos poliméricos.

MALAY, BAHADUR (1982), em seu trabalho de investigação da influência da temperatura em sistemas tribológicos, mostraram que, para o PEAD deslizando

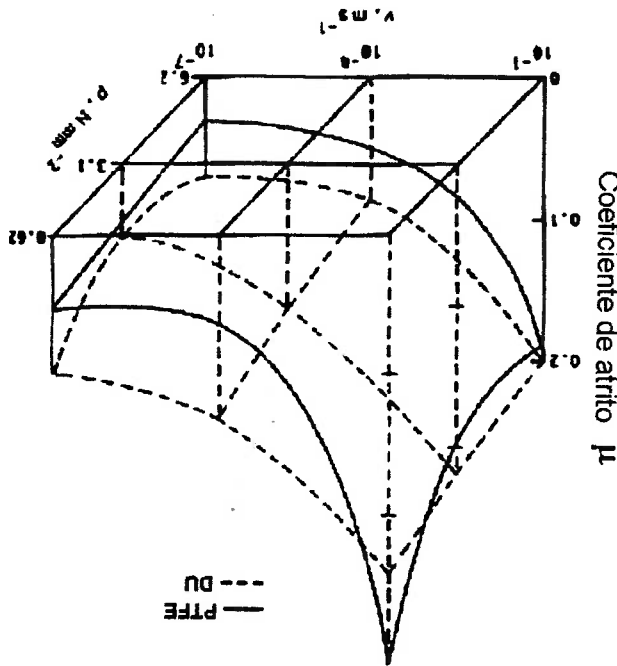
utilização destes materiais em aplicações especiais (SHIGLEY, MISCHE, 2001).
sua aplicação em mancais, sua característica de auto-lubrificação a seco permite a materiais poliméricos apresentarem baixa condutividade térmica, o que dificultaria esforços na região de contato e limita a utilização dos materiais. Apesar dos importância é a condição PV. Esta condição representa o grau de severidade dos Na seleção de mancais de rolamento ou deslizamento, um fator de grande

temperatura.

um aquecimento na região de contato e, conseqüentemente, um aumento na aumento, tanto da carga aplicada como da velocidade de deslizamento, irá provocar Em aplicações onde o sistema tribológico não está sendo refrigerado, o

2.6.3 Temperatura de contato

Figura 30. Atrito em função da carga e da velocidade para o PTFE puro e composto deslizando contra aço AISI 52100 (VINOGRADOV *et al*, 1965).



contra aço, o aumento da temperatura provoca um crescimento no coeficiente de atrito e que a temperatura na região de contato possui uma dependência com a condição PV (pressão-velocidade) do sistema tribológico.

WANG *et al* (1995) mostraram que para o polietileno (66,8% cristalino) em ensaio de deslizamento alternado contra uma superfície de aço inoxidável, o coeficiente de atrito possui uma dependência com a condição PV (Figura 31) que pensa-se estar associada ao aumento com a temperatura com a condição PV.

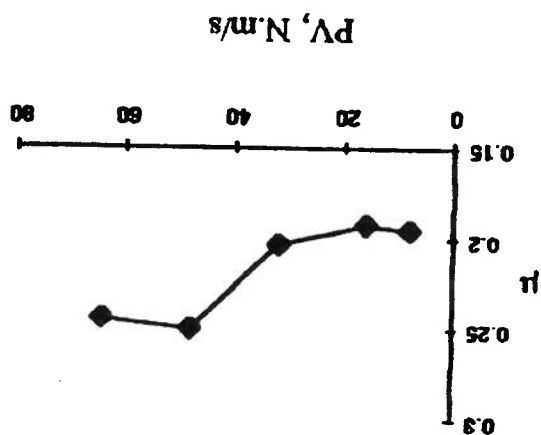
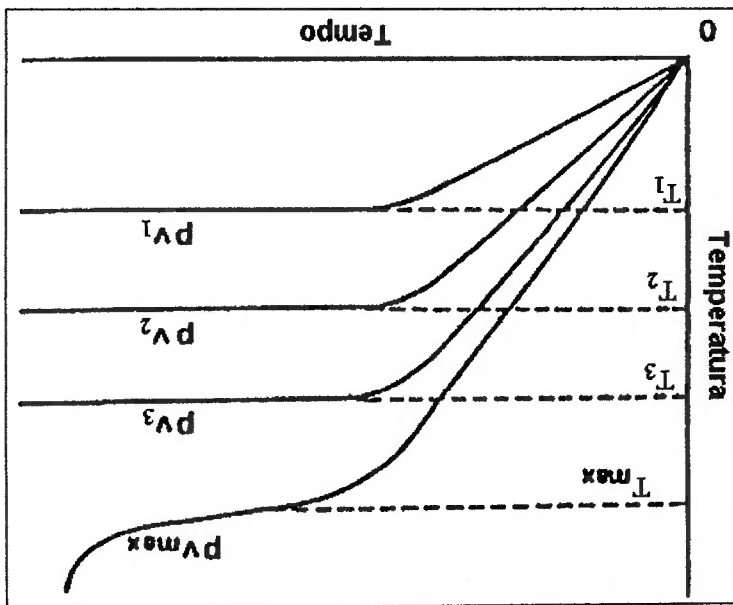


Figura 31 – Efeito da condição PV no atrito do polietileno deslizando contra aço inoxidável (WANG *et al*, 1995).

A Figura 32 mostra que a temperatura no contato estabilizará em patamares cada vez mais elevados quanto mais severas forem as condições PV. A condição PV^{max} representa a condição em que, tanto a temperatura no contato, quanto o coeficiente de atrito, não se estabilizarão e o material atingirá temperaturas elevadíssimas, fundindo ou provocando uma intensa oxidação na região de contato.

Figura 32 - Curva de temperatura no contato (T) pelo tempo para condições PV cada vez mais elevadas (BARTENEV, LAVENTEV, 1981).



Um exemplo de determinação da condição $P_{V_{LIMITE}}$ foi obtido com o aumento da velocidade para o deslizamento de polietileno contra aço inoxidável realizado por Wang *et al* (1995). A Figura 33 mostra o efeito da velocidade de rotação na temperatura de contato a medida em que o ensaio de desgaste se desenvolvia. Observa-se que para a rotação de 250 rpm, a temperatura no contato já não se estabiliza em um patamar.

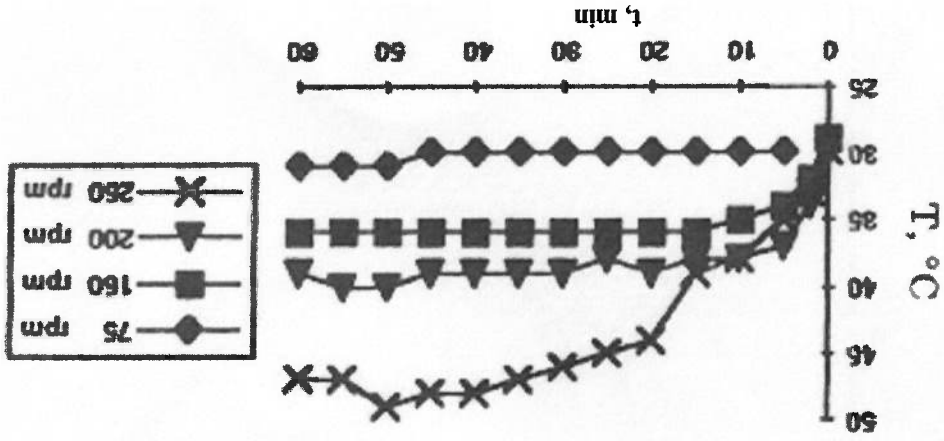


Figura 33 - Efeito da velocidade de rotação na temperatura de contato de PE contra aço inoxidável (DA SILVA *et al*, 1999).

Um outro exemplo do efeito do aquecimento na região de contato na taxa de desgaste é apresentado na Figura 34, onde é mostrada a variação da taxa de desgaste em função da velocidade de deslizamento para o PA 6.6 em contato com um contracorpo de aço com 0,4 %C (LANCASTER, 1979 *apud* HUTCHINGS, 1992). É observado como a taxa de desgaste aumentou quando a velocidade de deslizamento provocou um aumento na temperatura.

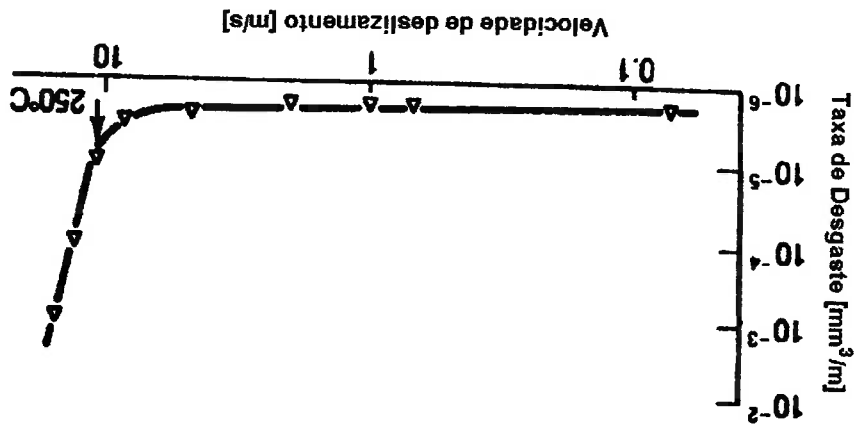


Figura 34. Variação da taxa de desgaste com a velocidade para PA 6.6 deslizando a seco contra aço com 0,4 %C ((LANCASTER, 1979 *apud* HUTCHINGS, 1992)

O aquecimento da região de contato, provocado tanto pelo aumento da carga aplicada como da velocidade de deslizamento, deve ser um dos principais parâmetros que determinam a resposta tribológica do material, pela dependência das propriedades mecânicas e físico-químicas dos termoplásticos com a temperatura.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é contribuir à otimização do uso dos termoplásticos como materiais para engenharia. Para isso, foram escolhidos valores de carga e velocidade que permitam estudar várias condições de solicitação termomecânica, tentando abranger diversas condições de uso dos materiais testados.

Fez-se uma comparação do efeito da carga aplicada e da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito e no desgaste de três materiais termoplásticos deslizando sobre aço inoxidável.

3.2 Objetivos Específicos

1. Verificar a aplicabilidade de algumas teorias desenvolvidas a respeito do desgaste e coeficiente de atrito dos termoplásticos.

2. Comparar o comportamento tribológico de um material com temperatura de transição vítrea acima da temperatura ambiente, como é o caso do PA, com o comportamento de materiais com T_g sub-zero, como o UHMWPE e o POM.

3. Estabelecer um método experimental para ensaios tribológicos com materiais termoplásticos em equipamentos com monitoramento de perda de altura, que considere o efeito do comportamento termo-mecânico deste tipo de material nos dados fornecidos pelo sistema de aquisição de dados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo contém uma descrição dos materiais empregados, indica a maneira como foram preparados os corpos-de-prova, os métodos utilizados para caracterizar os materiais, as principais considerações sobre o ensaio tribológico usado e uma explicação do método empregado para a estimativa da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito nos ensaios.

4.1 Materiais

4.1.1 Discos de Aço Inoxidável com Nitrogênio

Dando continuidade ao trabalho de DA SILVA (2001), como contra-corpo metálico em ensaio pino-contra-disco (descrito no item 4.3) foi escolhido o aço inoxidável duplex nitrogenado, que vem sendo estudado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PMT – EPUSP (TORO, 2002; GARZON, 2001; TSCHIPPITSCHIN *et al*, 1999). O interesse destes estudos é o fato deste material estar sendo usado em próteses ortopédicas (ZHANG, 2000), onde é comum o contato com peças fabricadas em POM e UHMWPE. Fica clara a importância de se conhecer o melhor possível o comportamento tribológico de um sistema contendo estes termoplásticos e o aço inoxidável descritos.

Utilizaram-se discos de aço inoxidável nas mesmas condições que DA SILVA (2001). O processo de fabricação e preparação dos discos de aço inoxidável com nitrogênio pode ser descrito na seguinte forma:

1) Fundição pelo Laboratório de Fundição da Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT;

2) Corte dos lingotes no formato de discos com espessura de 20 mm;

3) Forjamento uniaxial em um martelo de forja hidráulico com capacidade de 4.000 kgf, pertencente à empresa CAMACAN S.A. Durante o forjamento, os discos foram aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 1200°C, para eliminar a estrutura bruta de fundição, e a operação de conformação resultou em redução até 50% da espessura inicial;

4) Tratamento Térmico de austenitização e têmpera em óleo, realizada em um forno tipo mufla do Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS/PME/EPUSP. O tratamento teve como objetivo a obtenção de uma matriz austenítica isenta de carbonetos e/ou nitretos. As condições da austenitização foram: temperatura de 950°C, tempo de 3 horas e taxa de aquecimento de 20°C/min. A têmpera em óleo, sem agitação, foi realizada ao término da 3ª hora.

5) Torneamento das amostras na forma de discos, com as dimensões finais de 60 mm de diâmetro e 8 mm de espessura. Também foi torneado um furo para a fixação mediante parafuso de cada disco no dispositivo de ensaio que será descrito posteriormente.

6) Lixamento unidirecional com papel abrasivo de Al₂O₃ para obtenção dos acabamentos desejados. Observou-se que a Lixa 180 produzia o valor de rugosidade Ra procurado, que é de $0,3 < Ra < 0,6 \mu\text{m}$, e que corresponde a um valor de Ra comum nas próteses ortopédicas (ZHANG, 2000).

4.1.2 Termoplásticos utilizados

Os materiais termoplásticos utilizados nesta pesquisa são: polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE), poli(óxido de metileno) (POM) e poliamida 6.6 (PA6.6). Considera-se que estes três materiais são representativos para o estudo, pela grande aplicabilidade em elementos mecânicos, possibilitando, assim, que os resultados obtidos sejam de interesse para aplicações práticas. DA SILVA (2001) está concluindo, simultaneamente com este estudo, uma tese de Doutorado onde analisa o POM e o UHMWPE, formando assim um conjunto de resultados que permite fornecer mais critérios para discutir o trabalho aqui descrito.

Um aspecto importante para se destacar é a utilização do POM e do UHMWPE como biomateriais, isto é, seu uso em componentes biomecânicos como próteses ortopédicas, instrumentos cirúrgicos e implantes ósseos; situação que estabelece uma motivação a mais para se estudar o comportamento destes materiais. O PA6.6 não tem esta aplicação, mas é muito utilizado como material para anéis, engrenagens de cargas moderadas e guias. Diferentemente do POM e do UHMWPE, o PA6.6 tem uma temperatura de transição vítrea acima da temperatura ambiente. Sendo assim, as análises permitirão a comparação dos resultados obtidos com dois materiais que à temperatura ambiente encontram-se em estado predominantemente viscoelástico (POM e UHMWPE) e um material em estado predominantemente vítreo (PA 6.6).

Os materiais termoplásticos foram comprados na forma de barras circulares de 10 mm de diâmetro. Para adquirirem a forma final, foram torneados nas dimensões mostradas na Figura 35.

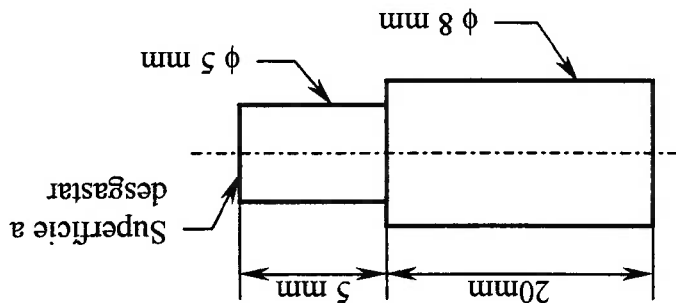


Figura 35 - Geometria dos pinos poliméricos testados

As principais propriedades dos materiais termoplásticos, segundo os fabricantes, são apresentadas na Tabela 3.

Tabla 3- Propriedades dos termoplásticos testados segundo fabricantes (PLASTECNO, 2002; TECHNYL, 2002; CORMATEC, 2002)

MATERIAL			
	Polietileno	Poliacetil	Poliamida
Nomenclatura	UHMWPE	POM	PA 6.6
Densidade (Kg/m ³)	930	1410	1140
Temperatura de fusão T _m (°C)	140	175	245
Temp. transição vítrea T _g (°C)	-90	-38	50
Temper. Min. e Máx. em uso contínuo (°C)	-40 até 90	-30 até 100	-30 até 110
Calor específico a 23 °C (J/K.g)	1,7	1,5	1,7
Condutividade térmica a 23 °C (W/K.m)	0,35	0,30	0,23
Tensão de escoamento à tração a aprox. 25 °C (MPa)	20	69	90
Alongamento na ruptura a aprox. 25 °C (%)	350	40	50
Módulo elástico (MPa)	725	3100	3300
Resist. impacto Izod, com entalhe(J/cm)	9.8	4	0.3
Dureza Rockwell R	60	120	115

Com o intuito de posicionar estes materiais dentro o grupo de termoplásticos, a seguir são apresentadas outras informações importantes de cada material.

4.1.2.1 UHMWPE

A unidade monomérica deste material é o etileno, uma ligação dupla entre átomos de carbono (H₂C=CH₂), e o material obtido com base nas cadeias formadas por esta unidade monomérica é chamado de polietileno (PE).

Com base na densidade, os polietilenos são classificados assim:

- Baixa densidade (LDPE): 910-925 Kg/m³
- Média densidade (MDPE): 926-940 Kg/m³

- Alta densidade (HDPE): 941-959 Kg/m³
- Muito alta densidade (VHDPE): 959 Kg/m³ ou maior.

O UHMWPE é um tipo de polietileno que se caracteriza por ter um peso molecular⁴¹ de 3 a 5 milhões, e é usado em aplicações industriais onde propriedades de resistência ao desgaste são desejadas (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999). Este material tem uma moldabilidade limitada, o que faz com que seja aproveitado a partir de formas já extrudadas.

O UHMWPE apresenta propriedades mecânicas inferiores às apresentadas pelo HDPE em termos de módulo elástico, resistência à tração, dureza e limite elástico (BRASKEM, 2003). Os valores de tenacidade e ductilidade são comparáveis aos apresentados por outros tipos de polietilenos como o HDPE e o MDPE. As vantagens do UHMWPE com respeito aos outros tipos de polietilenos são (MATWEB, 2003):

- Menor absorção de umidade
- Menor coeficiente de atrito
- Maior temperatura de fusão
- Melhor comportamento frente ao desgaste

O polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) usado nos testes foi fornecido pela empresa CORMATEC e termoformado a temperatura de 210°C, com pressão de 80 kgf/cm² durante 6 horas, utilizando como matéria-prima a resina UTTEC-6540 de fabricação POLLALDEN.

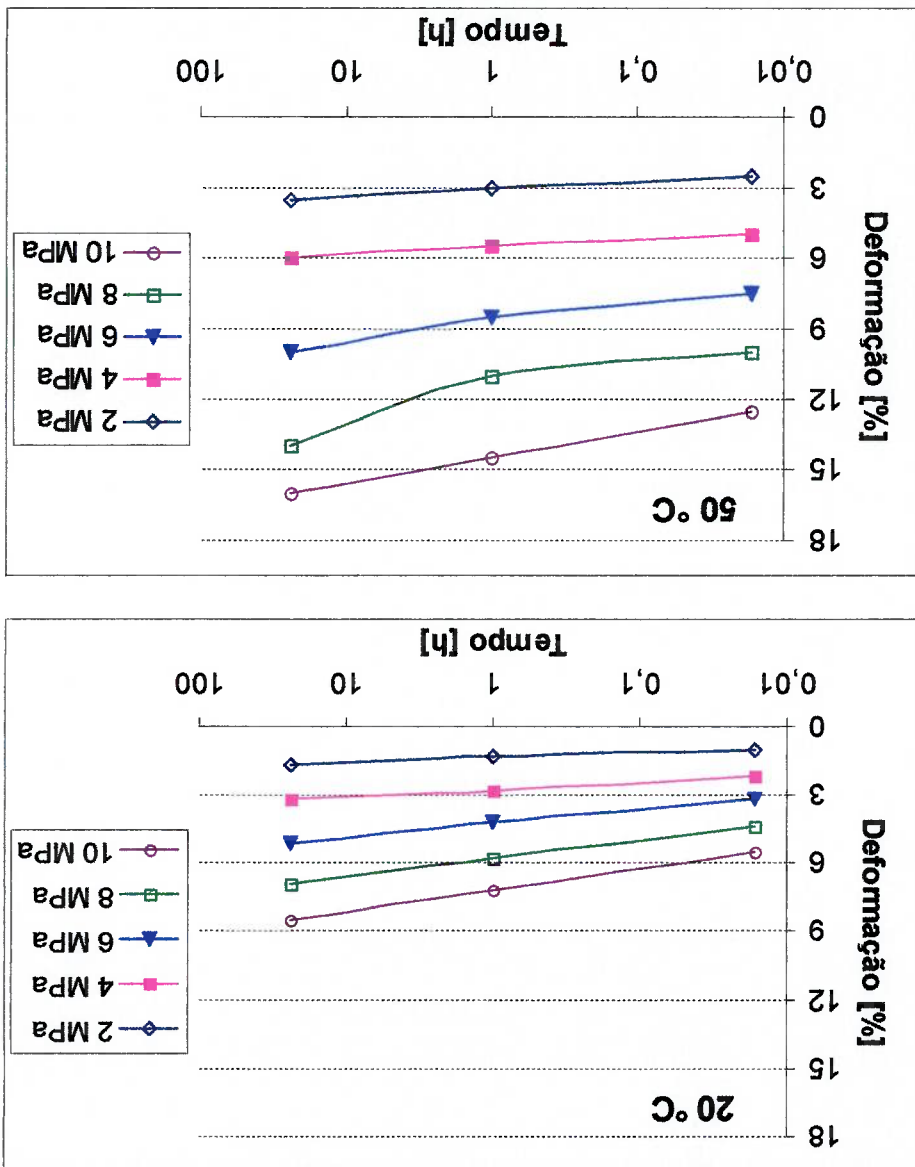
Com o intuito de analisar o comportamento mecânico do UHMWPE sob compressão, a Figura 36 mostra como varia a deformação do UHMWPE em função do tempo para esforços compressivos entre 2 e 10 MPa, aplicados a 20 °C e 50 °C.

⁴¹ O peso molecular é definido como o número de unidades monoméricas que formam uma cadeia polimérica de um material. Nos textos técnicos o termo peso molecular corresponde na realidade à média do peso molecular de todas as cadeias do material (CALLISTER, 2000).

4.1.2.2 POM

O poli(óxido de metileno), polioximetileno acetato ou poliacetal é um material diferente de muitos outros polímeros quanto à configuração das suas cadeias: no POM, as moléculas poliméricas apresentam ligações carbono-oxigênio em vez das típicas ligações carbono-carbono.

Figura 36. Deformação por Compressão do UHMWPE a 20 °C e 50 °C (BRASKEM, 2003)



A unidade monomérica deste material é o formaldeído, com grupos nos

extremos, como apresentado na Figura 37.

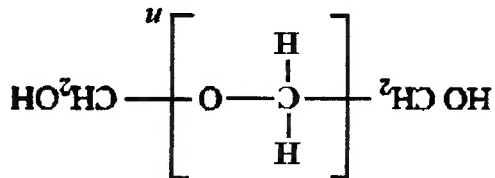


Figura 37. Esquema da estrutura do POM (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999).

O POM é geralmente comercializado em forma de homopolímero ou copolímero (com trioxano). O POM homopolímero tem uma resistência maior que o POM copolímero, mas este último apresenta temperatura de fusão maior. Ambos tipos são altamente cristalinos, com propriedades mecânicas comparáveis com as das poliamidas (PA). Uma vantagem do POM com respeito à PA é a menor absorção de umidade apresentada pelo POM. Devido às suas propriedades mecânicas, que são consideradas ótimas dentre os materiais termoplásticos mais comercializados, o POM é muito usado em projeto de máquinas e componentes estruturais (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999).

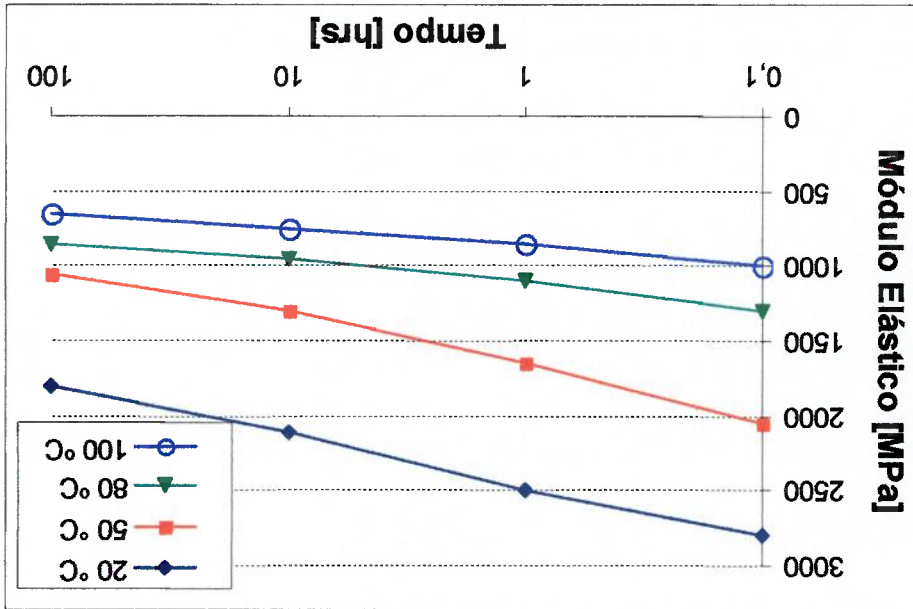
O poli(óxido de metileno) copolímero (POM) que foi escolhido para este estudo foi extrudado pela empresa MGS, com matéria-prima CELCON, de fabricação TICONA e foi doado pela empresa PLASTECON.

Nas Figuras 38, 39, 40 e 41 é mostrado o comportamento mecânico do POM marca Hostalform (HOECHST, 2003) em função do tempo, esforço aplicado e temperatura.

Na Figura 38 é mostrado o módulo elástico em função do tempo, para o caso de corpos-de-prova submetidos a esforços trativos entre 3 e 30 MPa.

Na Figura 40 é mostrada a deformação em função do tempo e do esforço aplicado, para corpos-de-prova submetidos a esforços trativos entre 5 e 20 MPa.

Figura 39. Variação do Módulo elástico do POM Hostaform com o tempo e a temperatura, com esforço trativo de 10 MPa (HOECHST, 2003).



Na Figura 39 é mostrado o módulo elástico em função do tempo e da temperatura para corpos-de-prova submetidos a esforços trativos de 10 MPa.

Figura 38. Variação do Módulo elástico do POM Hostaform com o tempo e o esforço aplicado (HOECHST, 2003).

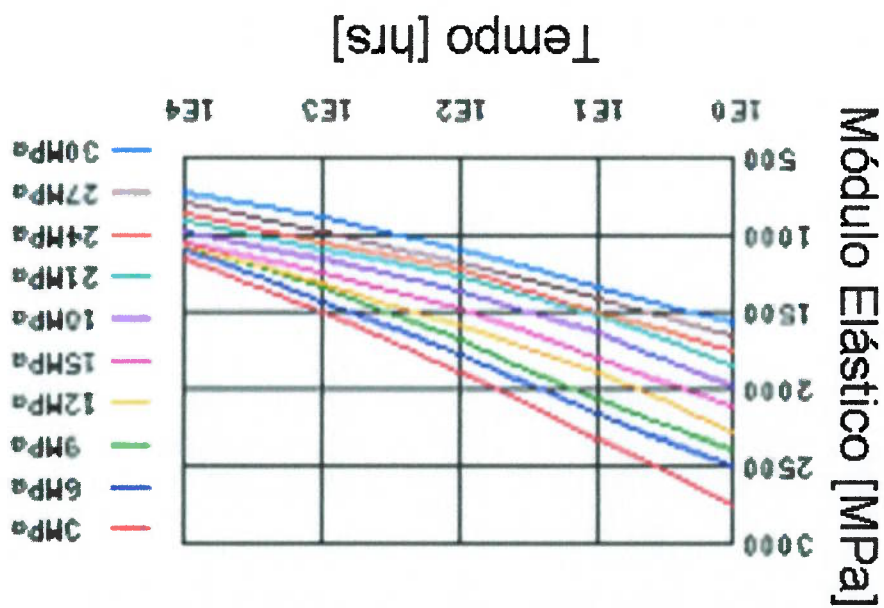
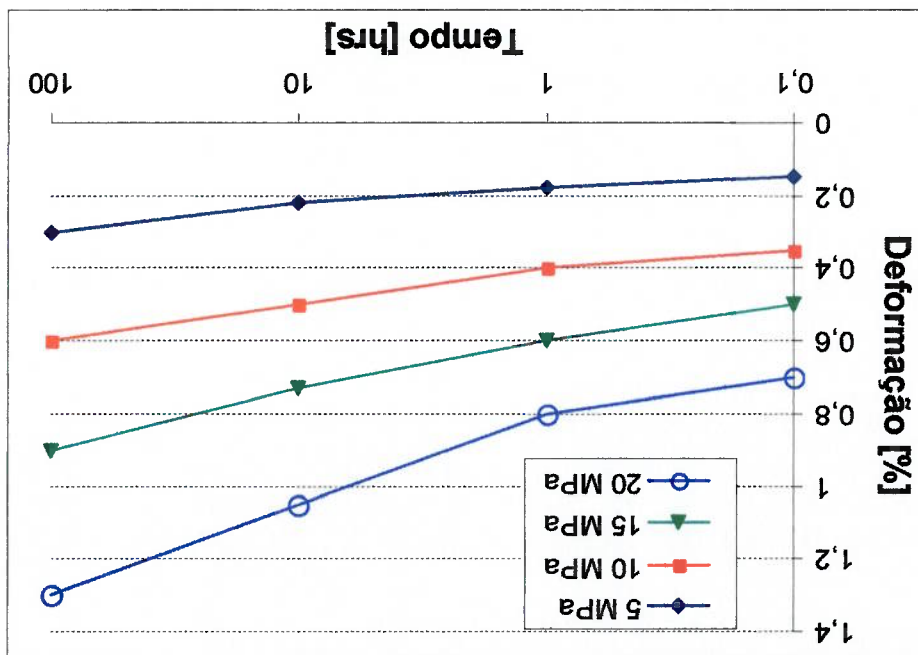


Figura 40. Deformação do POM Hostaforn em função do tempo e do esforço
trativo aplicado (HOECHST, 2003).



Na Figura 41 é mostrada a deformação em função do tempo e da temperatura para corpos-de-prova submetidos a esforços trativos de 10 MPa.

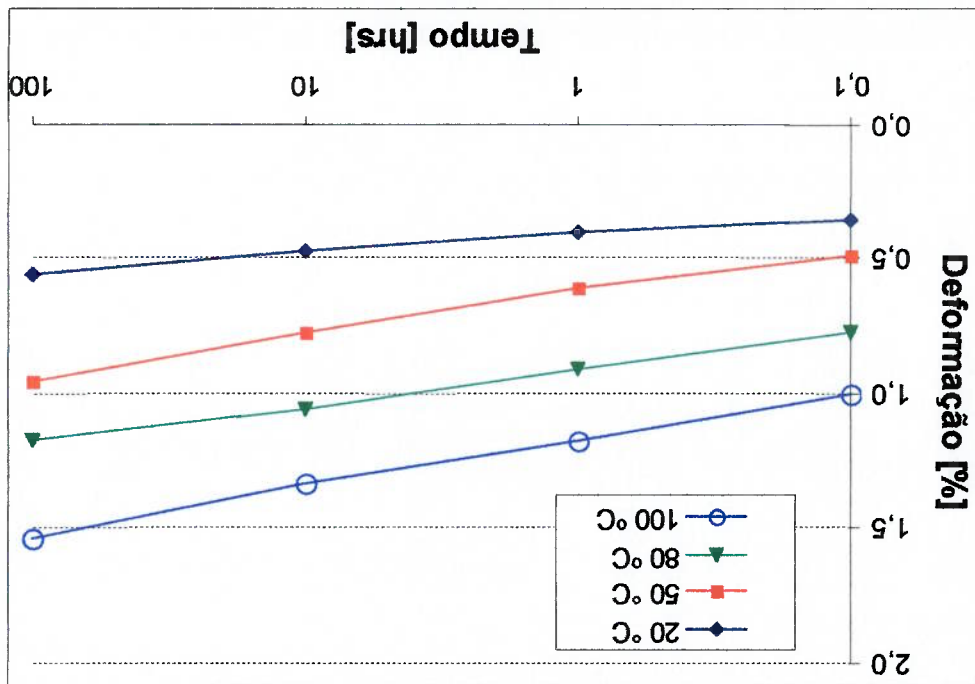


Figura 41. Deformação do POM Hostaforn em função do tempo e da temperatura (HOECHST, 2003).

As poliamidas (PA) são polímeros formados pela condensação de um ácido e uma amina. Essa reação produz um grupo amida (CO-NH), como mostrado na

Figura 42.

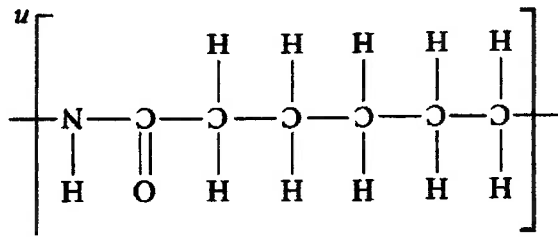


Figura 42. Esquema da estrutura do PA6 (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999).

Há uma grande variedade de poliamidas, sendo as mais comuns a PA6, PA6.6, PA6.10, PA6.12, PA11 e PA 12. Os números representam o número de átomos de carbono presentes na unidade polimérica. As PA com um número só correspondem a homopolímeros, enquanto que os sufixos com dois números correspondem a copolímeros. Por exemplo, o PA6.12 é um copolímero de PA6 com PA12.

O termo poliamida é o verdadeiro nome genérico para este tipo de material, mas o termo nylon tem sido tão usado que perdeu sua categoria de marca registrada e passou a ser comumente usado para se referir a este tipo de material (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999). Neste trabalho, o termo usado será poliamida (PA).

As PA são termoplásticos altamente cristalinos com boas propriedades mecânicas e boa moldabilidade. As propriedades mecânicas deste tipo de material são as maiores dentre os plásticos de engenharia mais comercializados. Uma outra vantagem sobre os outros termoplásticos é sua temperatura de fusão, na faixa dos

120-140 °C. Devido a estas razões, a PA é usada para engrenagens, guias e cames (BUDINSKI, G.B.; BUDINSKI, M.K. 1999).

O material da poliamida 6.6 (PA6.6) que foi escolhido para este trabalho é extrudado e distribuído pela empresa MGS, e é processado com matéria prima TECHNYL.

Na Figura 43 é mostrada a curva esforço-deformação da PA6.6 fabricada pela TICONA a temperaturas entre 23 °C e 150 °C.

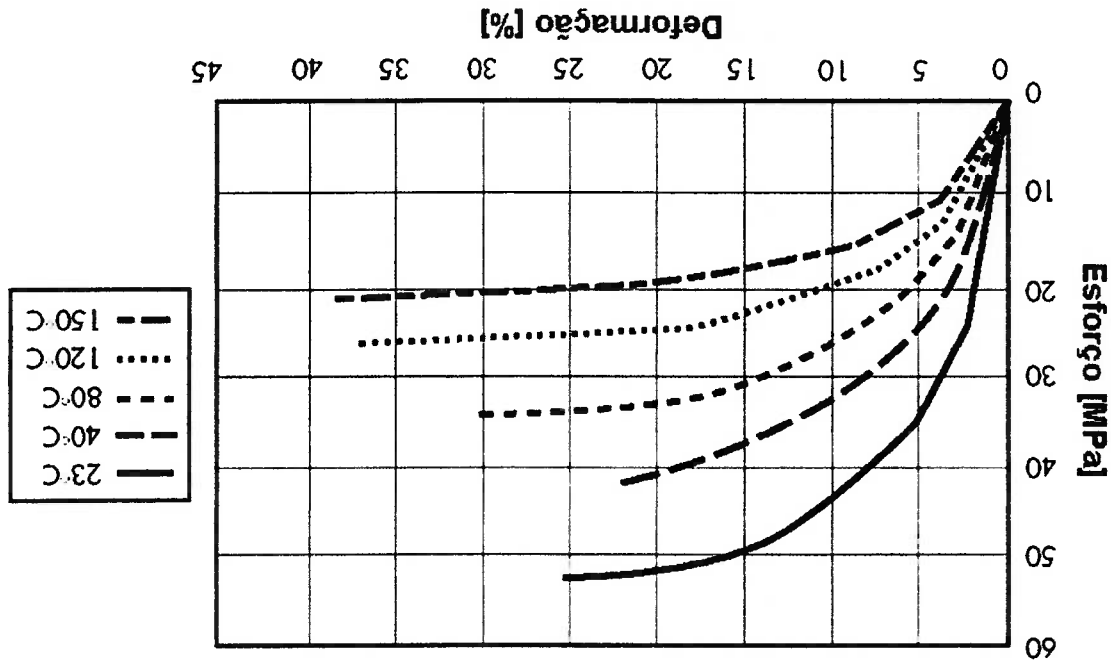


Figura 43. Ensaio de tração para o PA 6.6 com 50% de umidade relativa (TICONA,2002)

4.2 Caracterização dos corpos-de-prova

Como já foi explicado, o aço inoxidável, o UHMWPE e o POM são os mesmos utilizados por DA SILVA (2001) no seu trabalho de doutorado, e parte do trabalho de caracterização dos materiais assim como parte dos resultados foram desenvolvidos em conjunto. No texto serão diferenciados os dados extraídos desse estudo e os que foram obtidos independentemente.

4.2.1 Rugosidade

Para a caracterização da superfície do disco, foi utilizado um rugosímetro SURTRONIC 3+, de fabricação RANK TAYLOR ROBSON com filtro Resistivo-Capacitivo (RC).

Foram obtidos 15 perfis de rugosidade para o disco, utilizando os seguintes parâmetros de medição:

- método de medição: 5 perfis a cada 120°, como mostrado na Figura 44; o parâmetro de Ra usado será a média das 15 medições. O uso da média justifica-se pelo fato do disco girar durante o contato, não existindo, então, uma direção diferenciada
- comprimento de medição (Lm) de 4 mm e comprimento de corte (Lc) de 0,8 mm; estes valores correspondem aos recomendados pela DIN 4768 para medição de rugosidade, na faixa pretendida de Ra de $0,3 > Ra > 0,6 \mu\text{m}$
- parâmetros de rugosidade = Ra, Rq, Sm, Rz .

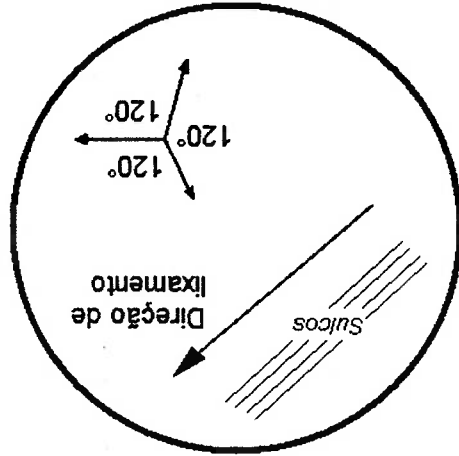


Figura 44. Esquema que ilustra o método usado para medição da rugosidade do disco de aço inoxidável nitrogênio.

4.2.2 Microdureza Instrumentada

Para a determinação da microdureza plástica e universal e do módulo de elasticidade foi utilizado um microdurômetro Modelo Fischerscope HC-100V de fabricação FISCHER no Laboratório de Fenômenos de Superfície-LFS do PME-EPUSP.

Na utilização da técnica de dureza instrumentada (PINTAUDE, SINATORA, 2000), o módulo de elasticidade é obtido a partir de um ciclo completo de aplicação e alívio de cargas. As profundidades relativas aos estágios de carregamento e descarregamento são mostradas de forma esquemática na Figura 45.

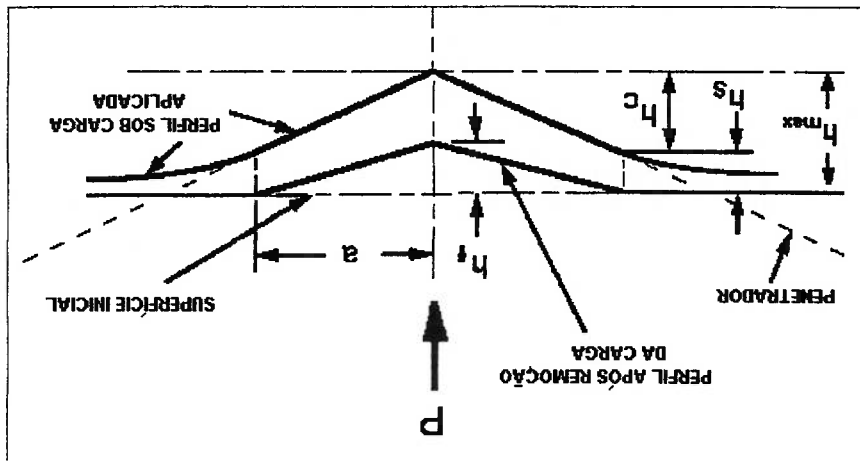
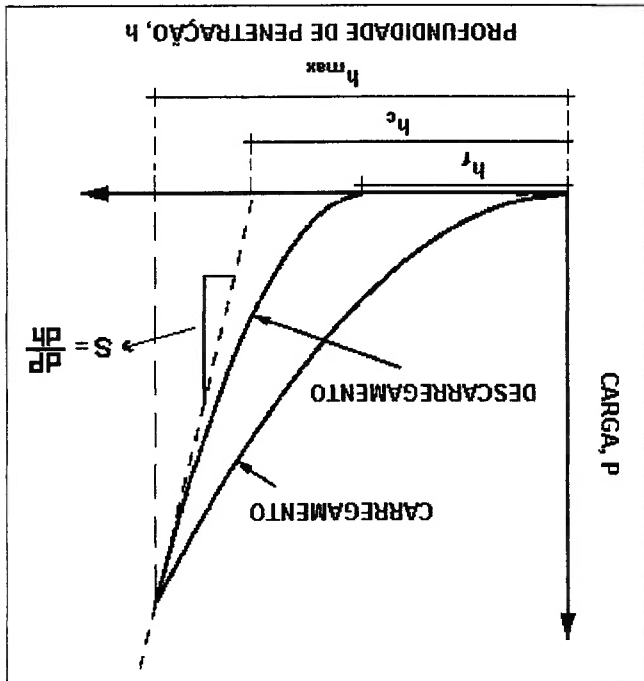


Figura 45 - Indicação esquemática dos parâmetros utilizados para cálculo de dureza dinâmica (STILWELL; TABOR, 1961 *apud* PINTAUDE, 2000).

Como resultado deste tipo de ensaio, obtém-se uma curva de carga aplicada em função da profundidade de penetração, como mostra a Figura 46.

Figura 46 - Curva típica de dureza dinâmica (PINTAUDE, SINATORA, 2000).



Os parâmetros definidos na Figura 46 são:

h_r = Profundidade final

h_c = Interseção da tangente da curva de descarregamento, na

profundidade máxima, com o eixo das abcissas

h_{max} = Profundidade máxima

S = Rigidez de contato [N/mm]

Considerando o conceito de módulo de sistema ou módulo reduzido, tem-se:

$$(10) \quad \frac{1}{E_r} = \frac{E}{1 - \nu^2} + \frac{E_0}{1 - \nu_0^2}$$

onde:

E_r é o módulo do sistema ou módulo reduzido [GPa];

E_0 é o módulo elástico do penetrador (1.140 GPa);

ν_0 é o coeficiente de Poisson do penetrador (0,07);

E é o módulo elástico do material ensaiado [GPa] e;

ν é o coeficiente de Poisson do material ensaiado [GPa]

A determinação da dureza Vickers foi realizada no Laboratório de Fenômenos de superfície LFS-PME-EPUSP com um durômetro Vickers de fabricação BUEHLER, modelo VMT7.

4.2.3 Dureza Vickers

Os valores de dureza plástica e módulo elástico serão calculados como as médias de 10 medições.

- Carga máxima aplicada: 1000 mN
- Carregamento realizado com 60 passos durante 60 segundos
- A carga máxima é mantida durante 30 segundos
- O descarregamento é realizado em 60 passos.
- Penetrador Vickers

medição:

Para os materiais termoplásticos definiram-se as seguintes condições de

Combinando então as Equações (10) e (11), conhecendo o módulo elástico do penetrador e usando a curva esquematizada na Figura 46, é possível determinar o módulo elástico (E) do material.

S é a rigidez de contato indicada na Figura 46.

apud PINTAUDE, 2002);

β é um fator geométrico (=1,142 para penetrador Vickers: KING, 1987

A_p é a área projetada [mm^2] (=24,5. h_c^2 para penetrador Vickers);

onde:

$$E_r = \frac{\beta \sqrt{A_p}}{S} \quad (11)$$

Uma expressão para o cálculo do módulo elástico do sistema é:

Os valores de E_0 e v_0 foram adotados pela ISO/FDIS 14577-1 (ISO, 2002).

- 1) promover a limpeza dos corpos de prova antes de cada ensaio;
- 2) perpendicularidade entre o eixo do pino e a superfície do disco inferior a 1°;
- 3) paralelismo entre a superfície de contato do pino com o plano do disco;
- 4) iniciar o ensaio com o pino em contato com o disco;
- 5) os ensaios devem ser repetidos com amostras adicionais.

Para a realização dos ensaios de desgaste foram observadas as recomendações da Norma ASTM G-99 (ASTM, 1992). Os requisitos mais importantes desta Norma são:

Para se determinar o comportamento tribológico dos materiais termoplásticos deslizando sobre a superfície de aço inoxidável, utilizou-se um tribômetro tipo pino-contra-disco, modelo TE-67 de fabricação PLINT & PARTNERS LTD, localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (LFS-PME-EPUSP).

4.3 Ensaio Tribológico

- HV = Dureza Vickers [Kg/mm²];
- C = carga aplicada [Kg];
- d = é a média do comprimento das diagonais da impressão [mm].

onde:

$$HV = 1,8544 \frac{C}{d^2} \quad (14)$$

O valor da dureza é calculado segundo a equação:

Segundo a norma ISO 2039-1 (ISO, 1997), que define as condições de medição de dureza por penetração para termoplásticos, definiu-se a carga aplicada para os polímeros em 5 kg. Na amostra de aço, a carga aplicada foi de 10 kg, para facilitar a medição óptica das diagonais da impressão. A dureza do material foi calculada como a média de 7 medições.

O procedimento utilizado para os testes está descrito a seguir:

1. Preparação da superfície do disco de aço inoxidável usando Lixa 320 de Al_2O_3 . Procurou-se manter a mesma direção de lixamento.
2. Limpeza do disco de aço inoxidável com Alcool Isopropílico em equipamento de lavagem com ultrassom.
3. Os pinos foram armazenados numa câmara de vidro, hermética, para evitar o máximo possível o contato com o ambiente.
4. O disco e o pino foram colocados no equipamento para o teste
5. Após o ensaio, o pino foi retirado e guardado na câmara. O disco foi preparado novamente com o processo de lixamento e lavagem.

tribômetro usado.

A Figura 47 mostra esquematicamente os principais componentes do

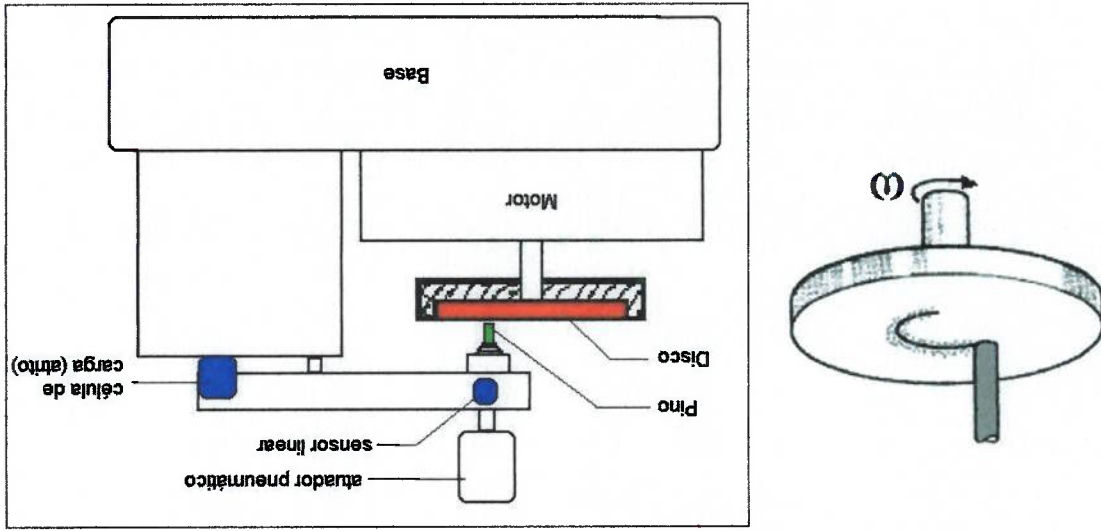
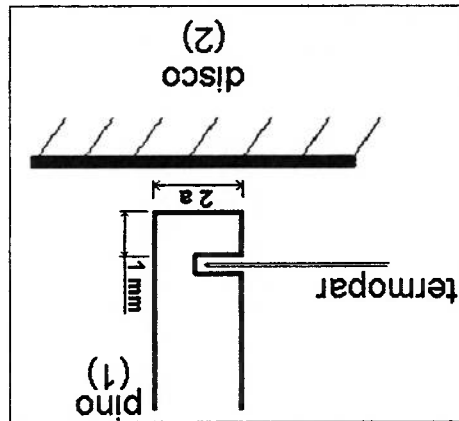


Figura 47 - Esquema do sistema pino-contra-disco.

O equipamento de desgaste fornece diversos dados sobre os parâmetros do ensaio, mediante uma placa de aquisição de dados adaptada a um computador. Nesta pesquisa foram monitorados os seguintes parâmetros:

- Força de arrito;
- Carga normal aplicada;
- Altura do pino;

Figura 48 - Esquema mostrando termopar, pino e disco (DA SILVA, 1998).



(corpo 1) e uma superfície plana, que neste caso é o disco (corpo 2).

A Figura 48 apresenta, de uma forma esquemática, o contato entre um pino

formulação apresentada a seguir.

conduzindo de calor em corpos em movimento, obtendo como resultado a continuidade de trabalho de ARCHARD considerando teorias de um plano. JOHNSON (1985) e BARBER (1991) *and* WILLIAMS (1996) ARCHARD (1959) para o contato entre uma superfície circular deslizando contra A correção dos valores de temperatura foi feita mediante a formulação de

desgaste, juntamente com um termopar do tipo k (cromel-alumel).

ensaios de desgaste foi utilizado um medidor de temperatura interno à máquina de Para o cálculo da temperatura média da superfície dos pinos durante os

4.3.1 Estimativa da temperatura no contato

parâmetros:

A seguir serão apresentados maiores detalhes sobre o monitoramento destes

- Distância percorrida e tempo de ensaio;
- Temperatura do pino;
- Velocidade de deslizamento.

Continuando com a formulação de ARCHARD, para o cálculo da temperatura T_m de cada material é necessário usar um parâmetro denominado número de PECLLET (Pe). O número de PECLLET é um adimensional que representa a energia térmica transportada e é representado por:

- $T_c =$ Temperatura média no contato
- $T_b =$ Temperatura do material a uma distância $h = 1\text{mm}$ da superfície de contato
- $T_m =$ Temperatura média do volume próximo à região de contato. No caso de pinos cilíndricos, esse volume é igual a $\pi \cdot a^2 \cdot h$.

onde:

$$T_c = T_b + T_m \quad (15)$$

Essa proposta é expressada como:

Segundo o trabalho de ARCHARD (1959), a temperatura a uma dada distância da superfície de contato pode ser estimada considerando que o fluxo de calor deve passar através de um volume de material conhecido, com propriedades térmicas conhecidas. Assim, é necessário calcular a temperatura média dessa massa de material na região de contato.

- D_i - difusividade térmica de cada corpo, dada por $D_i = \frac{k_i}{c_i \cdot \rho_i}$
 - c_i - calor específico
 - ρ_i - densidade do material
 - k_i - condutividade térmica
 - μ - coeficiente de atrito
 - a - raio da área de contato = 2,5 mm
 - v - velocidade de deslizamento
 - P - carga aplicada
 - (2) Fonte de calor em movimento = disco
 - (1) Fonte de calor estacionária = pino
- Os parâmetros utilizados nos cálculos de temperatura de contato foram:

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de ensaio, os quais foram combinados para compreender o comportamento tribológicos dos polímeros em diversas condições PV. Logicamente foram respeitadas as limitações do equipamento, juntamente com a integridade físico-mecânica dos corpos-de-prova.

4.3.2 Condições de ensaio

Com o valor calculado de T_{me} , é possível calcular a temperatura no contato T_c medindo a temperatura T_b a uma distância $h = 1$ mm.

($T_{me1} =$ Temperatura média do corpo 1; $T_{me2} =$ Temperatura média do corpo 2)

$$(19) \quad \frac{T_{me}}{1} = \frac{T_{me1}}{1} + \frac{T_{me2}}{1}$$

Para o cálculo da temperatura T_{me} tem-se que:

$$(18) \quad T_{me} = \frac{\mu_{P.V}}{h.k} \cdot 0,31 \sqrt{\frac{D}{v.a}}$$

• Para $Pe > 5$

$$(17) \quad T_{me} = \frac{4.a.k}{\mu_{P.V}}$$

região de contato é

estática, com um calor gerado $H = \mu_{P.V}$. Assim, a temperatura na

• Para $Pe < 0,1$ a situação é assumida como tendo uma fonte de calor

sendo que:

$$(16) \quad Pe = \frac{v.a}{2.D}$$

As taxas de aquisição dos dados obtidos no equipamento de desgaste foram de um dado a cada metro de deslizamento, ou seja, 1 Hz nos ensaios com velocidade de 1 m/s, 0,5 Hz para a velocidade de 0,5 m/s e 0,1 Hz para 0,1 m/s. A distância total de deslizamento foi de 3.500 metros em todos os ensaios.

Carga	Velocidade	Condição PV
[N]	[m/s]	[kW/m ²]
50	0,1	255
50	0,5	1274
50	1,0	2548
100	0,1	510
100	0,5	2548
100	1,0	5096
200	0,1	1019
200	0,5	5096

Tabela 5 – Valores de condição PV para os diversos níveis de carga e velocidade de deslizamento.

Durante a realização de ensaios preliminares, verificou-se que as condições de ensaio com carga de 200 N e velocidade de 1 m/s apresentaram-se extremamente severas para os materiais em questão, pois, não houve estabilização da temperatura no contato e os pinos dos materiais poliméricos apresentaram fusão para estes níveis de condição PV (pressão-velocidade) e acabamento superficial. A Tabela 5 apresenta os valores de condição PV efetivamente usados nos testes.

Carga aplicada	Pressão Aplicada*	Velocidade de deslizamento
[N]	[MPa]	[m/s]
50	2,6	0,1
100	5,1	0,5
200	10,2	1,0

* A região de contato entre o pino e o disco apresenta um diâmetro de 5 mm. A pressão foi calculada usando a área aparente correspondente a este diâmetro.

Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios de desgaste

Um fator importante a se considerar é frequência de contato do pino com uma mesma região do disco. Na Tabela 6 são mostrados os parâmetros escolhidos para obter as velocidades de deslizamento requeridas, juntamente com o valor de frequência de contato em cada caso.

Tabela 6. Raio de pista e velocidade de rotação dos testes.

Velocidade de deslizamento [m/s]	Velocidade de Rotação [R.P.M.]	Raio da Pista [mm]	Frequência de contato [Hz]
0,1	58	16,5	0,97
0,5	213	22,4	3,55
1,0	427	22,4	7,10

A umidade relativa da sala em que o equipamento de desgaste se encontrava foi mantida em $50 \pm 5\%$ com o uso de dois desumidificadores de ar modelo 200/110 BR de fabricação ARSEC.

Para todos os ensaios de desgaste realizados, foram feitas ao menos três repetições. Ocasionalmente os testes apresentavam algum tipo de problema, de forma que a metodologia seguida para cada um dos pares aço inoxidável-termostático foi a seguinte:

1. Realização de três repetições para cada condição de carga e velocidade
2. Obtenção das curvas de desgaste e coeficiente de atrito. Se alguma curva tiver problemas nos dados (ensaio com taxa de desgaste e/ou coeficiente de atrito não definidos, inadequada fixação do pino no equipamento, problemas com a energia elétrica no prédio, etc.) o ensaio é repetido usando um novo pino.
3. Se num teste o pino apresentar fuso, o resultado é guardado com o intuito de analisar a relação entre coeficiente de atrito e taxa de desgaste com a temperatura atingida no ensaio. Os valores obtidos não são considerados para os cálculos das médias, servindo, apenas, para referência.

Assim, este método é usado até conseguir três repetições estatisticamente representativas do experimento para cada condição de material, carga e velocidade (Tabela 5).

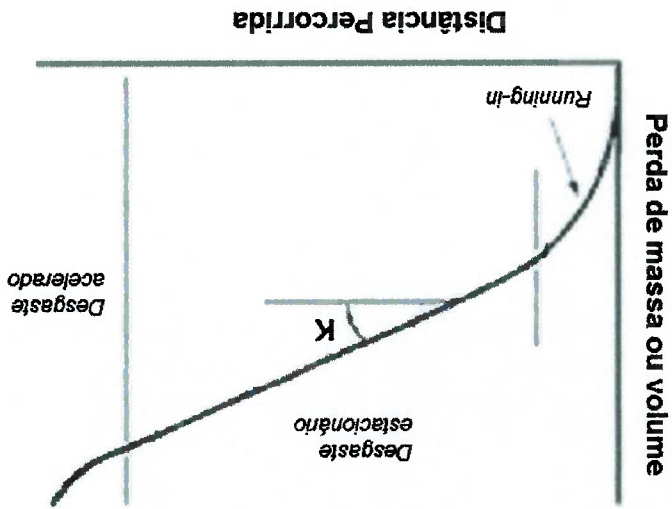
4.3.3 Coeficiente de atrito dinâmico e taxa de desgaste.

A taxa de desgaste em cada ensaio foi avaliada em μm por metro de distância percorrida pelo pino sobre o disco. O monitoramento da altura dos pinos durante os ensaios, em μm , foi determinada com a utilização de um sensor linear de posição (LVDT), instalado no próprio equipamento pino-contra-disco e indicado na Figura 47.

Os valores de coeficiente de atrito dinâmico foram determinados mediante a medição da força de atrito entre pino e disco, dividida pela carga normal aplicada. Para a medição das cargas normais e de atrito, utilizaram-se células de carga (*strain-gages*) instaladas no equipamento (Figura 47).

Os valores de coeficiente de atrito e taxa de desgaste foram determinados após a estabilização dos valores em função da distância percorrida. O período anterior à estabilização dos dados é denominado de *running-in*, como mostrado na Figura 49. Para se determinar o ponto do ensaio em que os dados começam a estabilização usa-se um teste de hipótese para verificar o intervalo de distância no qual as inclinações das curvas de perda de massa ou volume são estatisticamente estáveis.

Figura 49 - Variação da perda de massa em função da distância de deslizamento [HUTCHINGS, 1992].



As curvas obtidas no equipamento descrito apresentam um comportamento semelhante ao mostrado na Figura 50, onde o coeficiente de atrito e perda de altura do pino são plotados em função da distância percorrida.

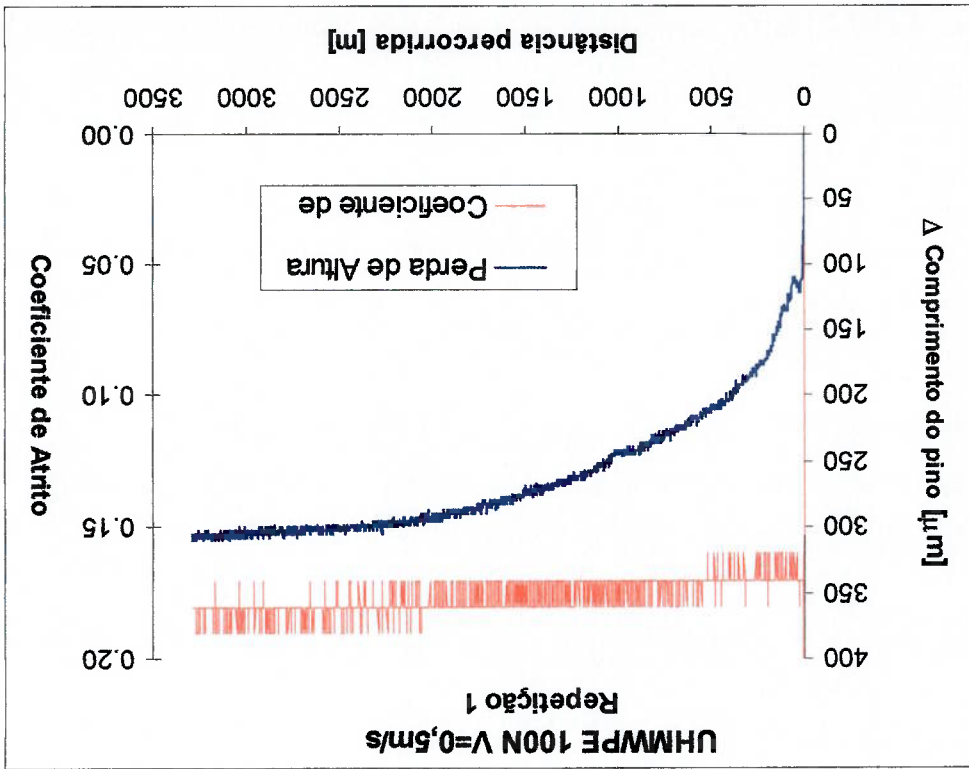


Figura 50. Curva típica obtida no testes no equipamento pino-contra-disco.

A perda de altura do pino de material termoplástico é determinada pelo sensor LVDT, mas, devido ao fenômeno de fluência, característico dos termoplásticos, a mudança de comprimento do pino pode ser inicialmente separada em duas componentes:

1. Uma componente devida à deformação associada com a fluência do material, pela aplicação de um esforço de compressão e o aquecimento do sistema durante o contato.
2. A componente devida à perda de material pelo contato com o contra-corpo. Esta perda de volume é detectada pelo sistema como uma perda de altura do pino. Geralmente o desgaste é medido como perda de massa ou volumétrica, mas, neste caso, pelo fato da área transversal ser constante durante o ensaio, considera-se que essa perda de altura pode ser tomada como parâmetro para estimar o desgaste.

Esta separação da perda de altura em parcelas pode ser resumida assim:

$$\Delta h = \rho_{Fluência} + \Delta h_{Desgaste} \quad (12)$$

onde

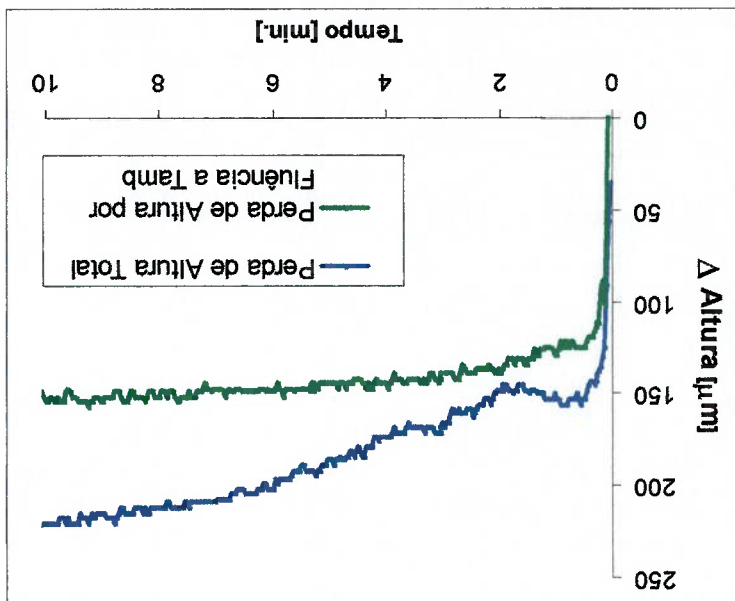
Δh : perda de altura do pino detectada pelo sensor LVDT;
 $\rho_{Fluência}$: deformação do pino sob compressão. Composta por uma parcela constante, que é a deformação instantânea, e uma parcela que varia com o tempo, devida à fluência;
 $\Delta h_{Desgaste}$: Perda de altura do pino pelo desgaste do material

Visando estimar a componente devida à fluência a temperatura ambiente, foram realizados testes para determinar a deformação dos pinos sob a aplicação das cargas de 50, 100 e 200 N durante 10 horas. No caso que foi tomado como exemplo, para o UHMWPE com 100 N de carga aplicada e 0,5 m/s de velocidade (Figura 50), a deformação devida à fluência a temperatura ambiente é mostrada na Figura 51.

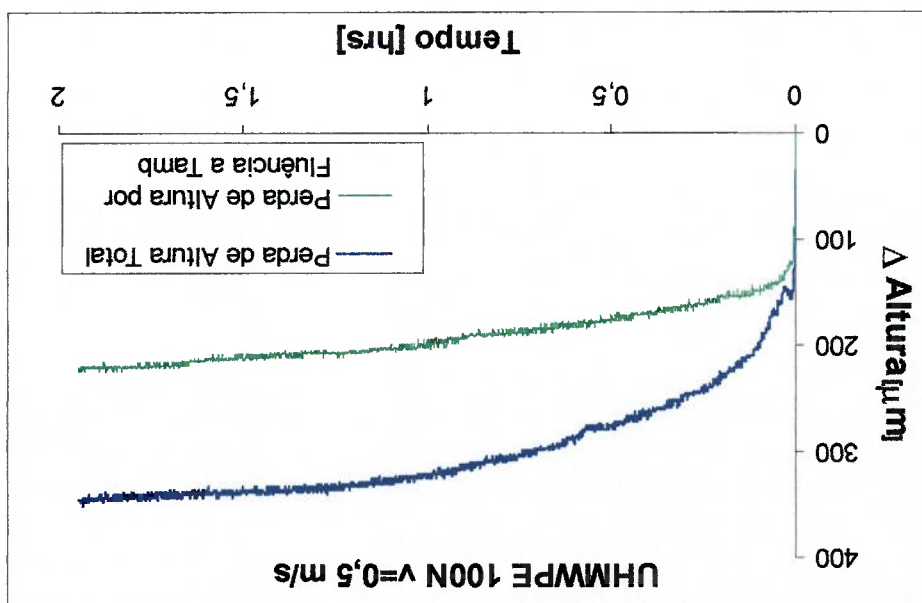
Na Figura 51a, observa-se que a curva de perda de altura total do pino em função da distância percorrida apresenta uma região de comportamento quase linear, o que é assumido como uma consequência da estabilidade da estabuldade que o sistema alcança. Este período será usado para estimar a inclinação da curva, como explicado a seguir.

Figura 51. Deformação devida à fluência a temperatura ambiente. Material: UHMWPE. Carga aplicada: 100 N; Velocidade: 0,5 m/s.

b). Deformação devida à fluência. 10 minutos iniciais.



a) Perda de altura e componente devida à fluência a temperatura ambiente.



Considera-se que os valores mais representativos para o projeto mecânico são os de taxa de desgaste e coeficiente de atrito na região de desgaste estacionário, mas o problema é determinar o instante no qual o sistema começa esse comportamento. Para estimar esse ponto foi utilizado o procedimento descrito a seguir:

1. Divide-se o ensaio em intervalos de 250m. Como a distância de deslizamento é de 3500 m, obtêm-se 14 intervalos.

2. Calcula-se a inclinação da curva e o coeficiente de atrito para cada intervalo de distâncias. Em cada intervalo calcula-se a inclinação da curva mediante um ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados.

3. Realizam-se testes de hipótese para determinar se as inclinações das curvas entre os intervalos são estatisticamente iguais. Começa-se pelo intervalo final (3250-3500 m), e continua-se com os intervalos precedentes. A razão é que geralmente os últimos intervalos já apresentam um comportamento linear.

4. Quando um intervalo apresenta uma inclinação com média diferente às anteriormente calculadas, fica determinado o intervalo no qual começa o período de desgaste estacionário.

Continuando com o exemplo, na Figura 52 são mostrados os resultados de inclinação da curva e coeficiente de atrito para os intervalos do ensaio apresentado nas Figuras 50 e 51.

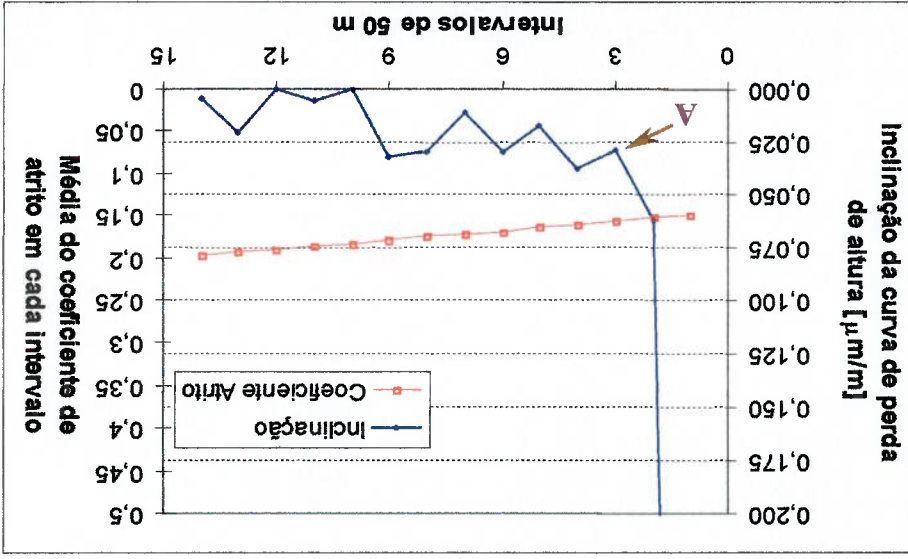


Figura 52. Determinação da inclinação da curva e coeficiente de atrito para os intervalos de 250 m. Termoplástico: PA 6.6/6. Carga: 50 N. Velocidade: 0,5 m/s

Fazendo o teste de hipótese para os dados da Figura 52 encontra-se que no intervalo indicado com a seta e a letra A, que corresponde ao intervalo 750-1000 m, começa o período de *running-in*. Sendo assim, os valores de inclinação da curva de perda de altura do pino e de coeficiente de atrito são calculados como as médias entre os intervalos 3 a 14, ou seja, os dados tomados para os cálculos serão os adquiridos entre as distâncias percorridas de 750 e 3500 m.

Finalmente, da inclinação calculada subtrai-se a componente da deformação devida à fluência a temperatura ambiente e a deformação devida ao efeito da temperatura, estimando assim um valor de taxa de desgaste, em $\mu\text{m}/\text{m}$. Deve ser considerado que a parcela de fluência a temperatura de teste não pode ser determinada experimentalmente para este estudo, pela necessidade de realizar uma grande quantidade de testes simulando o comportamento térmico dos pinos para cada condição de ensaio. A solução foi calcular a fluência devida à temperatura com base nos dados dos fabricantes mostrados nas seções 4.1.2.1 a 4.1.2.3. A seguir, apresenta-se o raciocínio seguido para calcular estas deformações devidas à temperatura.

1. A fonte de calor é a interface de contato. A temperatura do pino diminui em função da distância a região de contato.
2. O material usado para a exemplificar estimativa será o UHMWPE, por apresentar o menor módulo de elasticidade e , portanto, por apresentar as maiores deformações sob a aplicação de um esforço compressivo. Isto garante que a deformação estimada será a maior dentre as deformações dos três materiais.
3. Para a carga de 100 N e pela geometria dos pinos, o esforço aplicado é de 5,1 MPa (Tabela 4). Nos cálculos será utilizado o valor de 6 MPa para considerar os parâmetros usados na Figura 36
4. Na Figura 36 é observado que para a temperatura de 50 °C e esforço aplicado de 6 MPa, o UHMWPE é deformado em 1,0 % na primeira hora, e 1,5% nas 23 horas seguintes.

5. O ensaio com 0,5 m/s de velocidade de deslizamento tem uma duração de 7000 s, equivalentes a 1 hora, 56 minutos e 40 segundos. Nesse tempo de ensaio, 2 horas aproximadamente, a deformação é estimada em 1,1%, e a distância percorrida é 3500 m. A taxa de deformação, calculada por metro percorrido é, então:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{0,01}{2,6 \times 10^{-6}} = \frac{3500 \text{ m}}{\text{m percorrido}}$$

onde $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação unitária.

6. Sabendo que o pino tem um comprimento de 25 mm, e assumindo que os primeiros 10 mm do pino adquirem a temperatura de 50 °C durante o ensaio de desgaste, a taxa de deformação total esta dada por:

$$\Delta L = \dot{\varepsilon} L_0 = \frac{2,6 \times 10^{-6}}{\text{m percorrido}} \times 10 \text{ mm} = 0,026 \mu\text{m} / \text{m percorrido}$$

Posteriormente, quando compara-se este valor com os de perda de altura, será verificado se a fluência considerando a temperatura difere da fluência a temperatura ambiente, determinando assim se ela é significativa ou não para calcular a taxa de desgaste.

A Tabela 7 resume o processo de determinação da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito para o ensaio tomado como exemplo.

Tabela 7. Determinação da taxa de desgaste e o coeficiente de atrito para o PA6.6. Carga = 50 N. Velocidade = 0,5 m/s

Processo	Resultado	Valor
Ensaio pino-contra-disco	Perda de altura do pino e coeficiente de atrito em função do tempo	-----
Divisão dos dados em 14 intervalos de 250 m	Determinação do período estacionário e de <i>running-in</i>	-----
Média das inclinações da curva perda de altura em função da distância	Inclinação média da curva perda de altura em função da distância no período estacionário	A=0,029 $\mu\text{m}/\text{m}$
Ensaio de fluência com carga de 100 N durante 10 horas	Curva de deformação devida à fluência à temperatura ambiente em função do tempo.	B=0,025 $\mu\text{m}/\text{m}$
Cálculo da deformação por fluência a 50 °C	Taxa de deformação por fluência	C=0,026 $\mu\text{m}/\text{m}$
Cálculo da deformação devida à temperatura	Valor aproximado da deformação devida à temperatura	Taxa de deformação devida à temperatura C-B=0,001 $\mu\text{m}/\text{m}$ *
Subtrair valores de perda total de altura do pino e deformação por fluência a temperatura ambiente	Taxa de desgaste estimada	Taxa de desgaste = A-B = 0,003 $\mu\text{m}/\text{m}$
Média dos coeficientes de atrito dos intervalos no período estacionário	Coeficiente de atrito médio	Coeficiente de atrito: 0,173 \pm 0,036

*Como este valor é desprezível, não é considerado na estimativa de taxa de desgaste. Assim, o processo para estimar a taxa de desgaste é igual para todas as condições de ensaio.

4.3.4 Perda de massa

A taxa de desgaste no período estacionário será determinada pela perda de altura em função da distância percorrida, mas também pode ser de ajuda para a análise do desgaste a perda de massa dos corpos-de-prova durante o ensaio.

4.3.5 Observação das Superfícies Desgastadas

A massa de cada pino antes e após do ensaio de desgaste será medida numa balança eletrônica SURTRONIC. Antes da pesagem, cada pino foi mantido numa câmara de vidro hermética durante pelo menos 24 h, tanto antes como depois da realização de cada ensaio.

Para a determinação dos mecanismos de desgaste presentes nos sistemas tribológicos ensaiados, foi realizado o exame das superfícies de desgaste dos pinos e discos mediante a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento STEREOSCAN 240, marca CAMBRIDGE, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP (PMT-EPUSP).

Devido a característica de não-condutividade dos materiais poliméricos, as superfícies dos pinos precisaram de um recobrimento com material condutor, em um procedimento conhecido como metalização. A técnica utilizada foi a deposição de átomos de ouro por *sputtering* em atmosfera de argônio, em um equipamento modelo SCD 050 *Sputter Coater*, marca BALZERS.

As condições de deposição utilizadas foram:

- fluxo de argônio de 8 litros/min;
- pressão de 0,06 mbar;
- corrente de 60 mA;
- tempo de exposição de 60 segundos.

5 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos na realização deste trabalho, analisando e discutindo brevemente cada um deles para, posteriormente, elaborar uma discussão geral.

5.1 Caracterização dos corpos-de-prova

Nesta seção são apresentados os resultados deste trabalho, incluindo aqueles realizados em conjunto com DA SILVA (2002). Os valores apresentados serão usados para determinar propriedades dos corpos-de-prova, que podem influenciar o comportamento tribológico do tribossistema pino de termoplástico – disco de aço inoxidável com nitrogênio.

5.1.1 Disco de aço inoxidável com nitrogênio

DA SILVA (2001) caracterizou o disco de aço inoxidável com nitrogênio. Nas seções a seguir são apresentadas os resultados obtidos.

5.1.1.1 Composição química

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise de composição química dos discos.

Tabela 8 – Composição química do aço inoxidável austenítico nitrogenado (DA SILVA, 2002).

Elemento	Teor [%]
C	0,024
Mn	11,9
Si	0,5
S	0,01
Cr	19,1
O	17 ppm
N	2735 ppm

Com o teor encontrado de aproximadamente 3×10^{-3} % de nitrogênio em massa, espera-se encontrar as fases austenita (γ) e ferrita (α) na temperatura ambiente segundo o diagrama de fases determinado com ajuda do software THERMOCALC (GARZON, 2001).

5.1.1.2 Análise metalográfica

Após o resfriamento, observou-se que as fases presentes no aço inoxidável são ferrita e austenita. A Figura 53 apresenta a microestrutura do aço inoxidável, onde a fase clara é a ferrita e a mais escura a austenita. O reagente químico utilizado para revelar a microestrutura foi o Vilela.

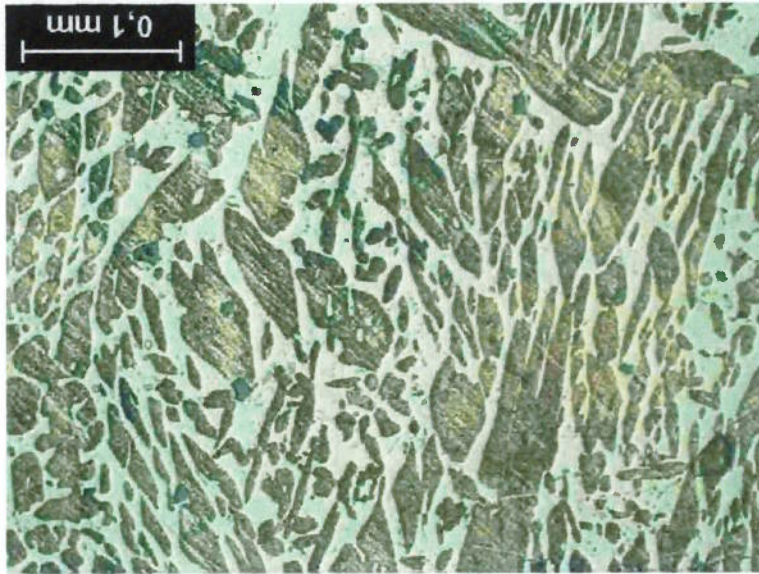


Figura 53 - Microestrutura do aço inoxidável mostrando as microestruturas presentes - ferrita (clara) e austenita (escura) (DA SILVA, 2002).

Com a utilização do LEICA QWIN, um software de análise de imagem, calcula-se a proporção entre austenita e ferrita no aço, obtendo-se 58% de austenita e 42% de ferrita.

5.1.1.3 Dureza Vickers

A Tabela 9 apresenta os resultados da medição da dureza do aço inoxidável duplex com aplicação de carga de 10 kg.

Devido à rotação do disco durante o contato com o pino, considera-se que a média dos 15 valores é representativa de cada parâmetro de rugosidade, sem diferenciar entre direções de medição. Além disso, nenhuma das medições deu como resultado um valor de Ra fora da faixa pretendida de $0,3 < Ra < 0,6 \mu\text{m}$.

Direção		Ra	Rq	Ry	RzDIN	Sm
		[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
0°		0,38	0,48	3,8	3,0	37
		0,40	0,52	3,7	3,2	31
		0,36	0,48	4,1	3,1	36
		0,46	0,66	6,9	4,2	33
		0,34	0,44	3,3	2,7	32
		0,34	0,44	3,3	2,7	32
120°		0,34	0,42	3,3	2,7	35
		0,46	0,62	4,8	3,4	34
		0,30	0,38	3,3	2,4	31
		0,42	0,54	3,5	3,3	32
		0,32	0,44	3,2	2,5	49
		0,46	0,58	4,4	3,7	44
240°		0,42	0,60	7,6	4,3	33
		0,34	0,44	3,3	2,8	35
		0,50	0,66	4,4	4,0	29
		0,52	0,68	7,4	4,1	33
		0,40	0,53	4,5	3,3	35
		0,07	0,10	1,5	0,6	5
Média		0,40	0,53	4,5	3,3	35
D. Padrão		0,07	0,10	1,5	0,6	5

Tabela 10 - Aço Inoxidável com Nitrogênio - Ra desejada $0,3 < Ra < 0,6 \mu\text{m}$.

5.1.1.4 Rugosidade

A Tabela 10 apresenta os resultados da determinação da rugosidade do disco de aço inoxidável.

A dureza medida no disco de aço inoxidável com nitrogênio está na faixa dos valores de dureza esperados para este material (TORO, 2001; GARZÓN, 2001).

Medidas	1	2	3	4	5	6	7	Média D. Padrão	9
Dureza [HV]	251	232	239	239	255	254	240	244	9

Tabela 9 - Dureza Vickers do aço inoxidável nitrogenado (DA SILVA, 2002)

5.1.2 Caracterização dos materiais termoplásticos

5.1.2.1 Dureza Vickers

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de dureza Vickers com carga de 5 Kg para os três termoplásticos.

Tabela 11. Dureza Vickers dos termoplásticos testados

MATERIAL	D. Padrão	Média	7	6	5	4	3	2	1	Medidas
UHMWPE	0,4	7	7	7	6	7	7	7	7	7
POM	1	19	19	19	21	19	18	19	18	18
PA6.6	2	15	13	15	14	15	16	13	16	16

Observa-se que o POM e o PA6.6 apresentam durezas semelhantes, enquanto o UHMWPE tem uma dureza menor que a dos outros dois materiais.

5.1.2.2 Ensaio Instrumentado de Microdureza

Nas Tabelas 12, 13 e 14 são mostrados os resultados dos ensaios de microdureza instrumentada para os materiais termoplásticos.

Tabela 12. Resultados do ensaio instrumentado de microdureza para o UHMWPE

Medida	HU	HP	E
1	51,8	77	1.29
2	49,5	74	1.23
3	50,1	76	1.22
4	48,8	74	1.19
5	51,7	77	1.28
6	50,8	76	1.26
7	48,6	73	1.20
Média	50,186	75	1.24
D. Padrão	1,299	2	0.04

Material	[HV]	[N/mm ²]	15	147	196	PA6.6
			19	186	223	POM
Rockwell R (Tabela 3)	Dureza Vickers	[N/mm ²]	7	69	75	UHMWPE
			60	60	60	

Tabela 15. Comparação entre durezas medidas e dos fabricantes para os termoplásticos estudados.

Na Tabela 15 e Figuras 48 e 49, são comparados os resultados dos ensaios instrumentados de dureza, os resultados de dureza Vickers e os valores fornecidos pelos fabricantes (Tabela 3).

Medida	HU	HP	F
1	102,2	188	2,95
2	96,4	195	2,87
3	101,3	187	2,93
4	97,4	194	3,02
5	92,3	189	2,98
6	95,5	198	2,86
7	102,3	201	2,91
Média	98	196	2,92
D. Padrão	3	7	0,08

Tabela 14. Resultados do ensaio instrumentado de microdureza para o PA6.6

Medida	HU	HP	F
1	112,4	216	2,07
2	113,7	214	2,14
3	117,3	227	2,15
4	117,5	225	2,18
5	122,2	239	2,23
6	115,5	222	2,13
7	112,9	218	2,07
Média	116	223	2,14
D. Padrão	4	11	0,06

Tabela 13. Resultados do ensaio instrumentado de microdureza para o POM

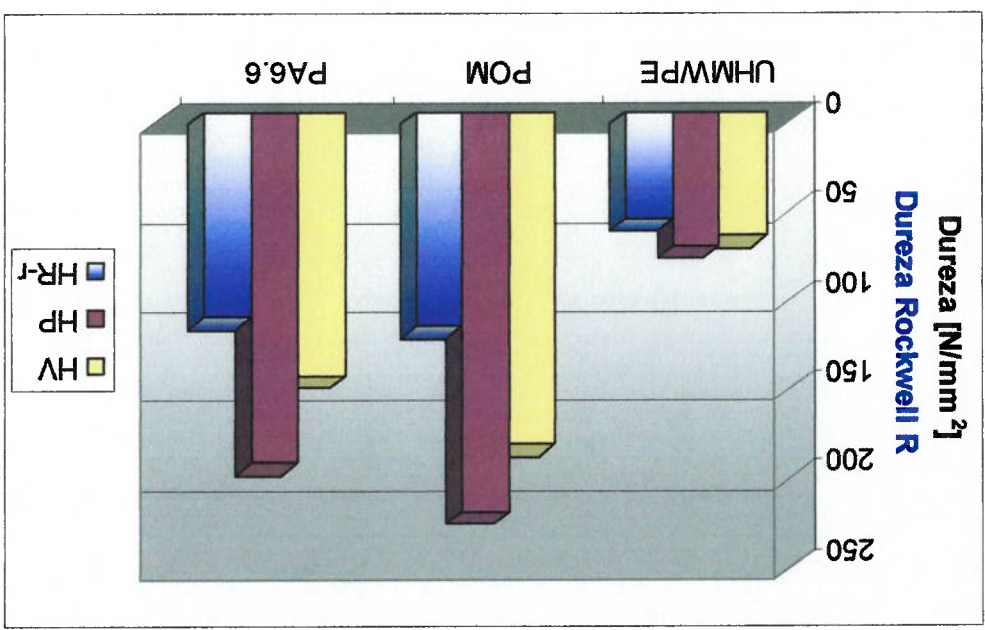
• Não têm sido divulgados estudos dedicados a estabelecer a influência das propriedades dos materiais termoplásticos nos ensaios de dureza, pelo que não é possível explicar as diferenças observadas com base nos mecanismos de deformação plástica e/ou viscoplástica deste grupo de

- Os valores medidos permitem ordenar os materiais pela sua dureza, seguindo os valores fornecidos pelos fabricantes.
- Comparando a dureza dos termoplásticos, a ordem em sentido crescente é $H_{UHMPPE} > H_{PA\ 66/6} > H_{POM}$. As durezas do POM e do PA 66/6 são semelhantes em magnitude, enquanto a dureza do UHMWPE é menor que a dureza dos outros dois materiais. Este resultado foi observado nos valores obtidos pelos três métodos apresentados.

A partir dos resultados mostrados nas Tabelas 12 a 15 e na Figura 54, é possível observar que:

Na Figura 54 é observado como o método de medição de dureza afeta a relação entre durezas dos termoplásticos, mostrando a sensibilidade do material ao método de medição de dureza.

Figura 54. Durezas dos materiais termoplásticos usando diferentes métodos.



matérias. Mesmo assim, para efeitos de comparação, pode-se afirmar que tanto a dureza Vickers como as durezas plásticas medidas nos materiais são válidas e permitem comparar as propriedades dos materiais.

Na Tabela 16 e Figura 55 são mostrados os resultados obtidos para os módulos elásticos dos materiais; esses valores também são comparados com os fornecidos pelos fabricantes. Os catálogos dos fabricantes não indicam o método usado para determinar os módulos elásticos, mas de acordo com os valores de resistência à tração, limite elástico e deformação na ruptura que acompanham os valores de módulo elástico nesses catálogos, aparentemente todos eles foram determinados em ensaio de tração segundo a norma ASTM D-648M.

Tabela 16. Comparação entre módulo elástico medido e do fabricante para os termoplásticos estudados.

Material	Módulo Elástico [GPa]	
	Microdureza Instrumentada	Fabricante (Tabela 3)
UHMWPE	1,24	0,725
POM	2,14	3,1
PA6.6	2,92	3,3

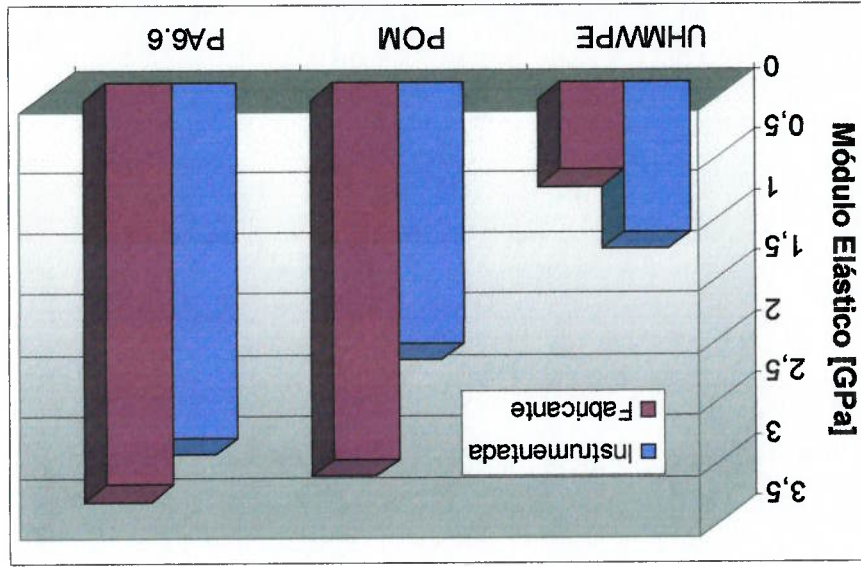


Figura 55. Comparação entre os Módulos Elásticos medidos dos termoplásticos testados e os valores fornecidos pelos fabricantes.

Segundo os valores apresentados, usando dados medidos e do fabricante, UHMWPE apresenta o menor módulo de elasticidade dentre os três materiais, seguido pelo POM. O PA6.6 apresenta o maior valor de módulo de elasticidade dentre os três materiais.

Para o POM e o PA 6.6 observou-se que os módulos de elasticidade medidos nos ensaios de microdureza foram menores que o referenciado pelos fabricantes, mas no UHMWPE o resultado foi contrário. Assume-se que os valores medidos representam o comportamento dos materiais, e proporcionam uma idéia de como os materiais respondem às sollicitações mecânicas. Um parâmetro que influi no resultado obtido e a taxa de aplicação da carga, mas este aspecto não foi estudado experimentalmente neste trabalho.

5.1.2.3 Ensaios de Comportamento Dinâmico-Mecânico

Na Figura 56 é mostrado o resultado do ensaio de comportamento dinâmico mecânico para o UHMWPE.

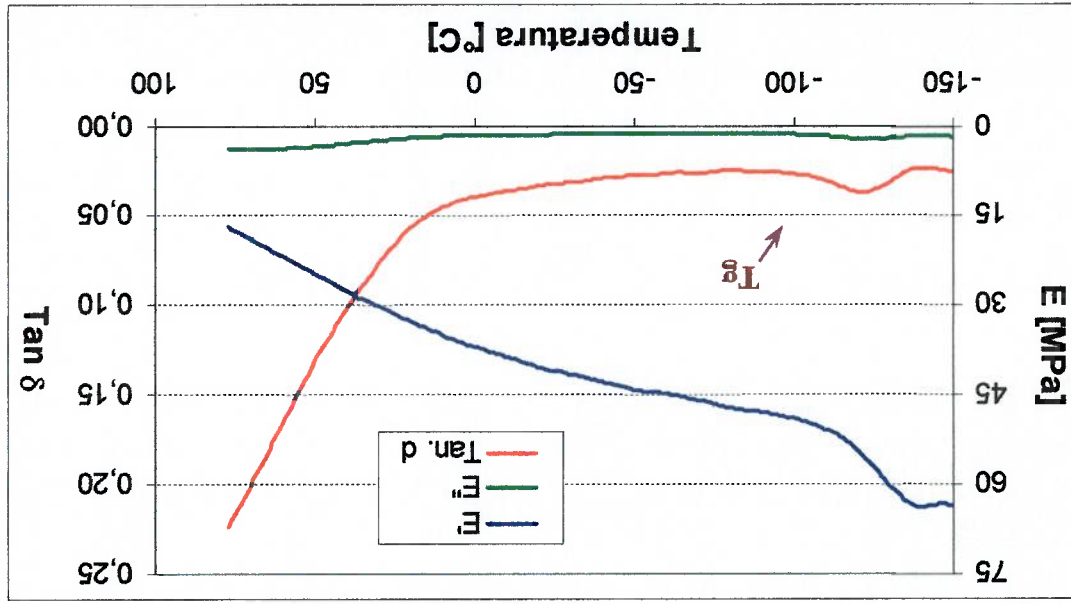


Figura 56. Resultados do ensaio DMA para o UHMWPE

O UHMWPE apresentou um pico de $\tan \delta$ numa temperatura de -119°C , indicado na Figura 56 com uma seta, que é associado à temperatura de transição vítrea T_g (CANEVAROLO, 1991). Este valor diverge da informação fornecida pelo fabricante (Tabela 3); segundo CORMATEC (2002) este material tem uma T_g de 90°C . A diferença pode estar associada ao fato do material ter sido processado e usado, modificando o comportamento dinâmico-mecânico de modo a diminuir o módulo de armazenamento (LANCASTER, 1990). Também é observado como o módulo de armazenamento vai diminuindo com a temperatura, o que indica como o material perde rigidez com o aquecimento.

Na Figura 57 detalha-se o resultado do ensaio DMA na faixa de temperaturas acima da temperatura ambiente.

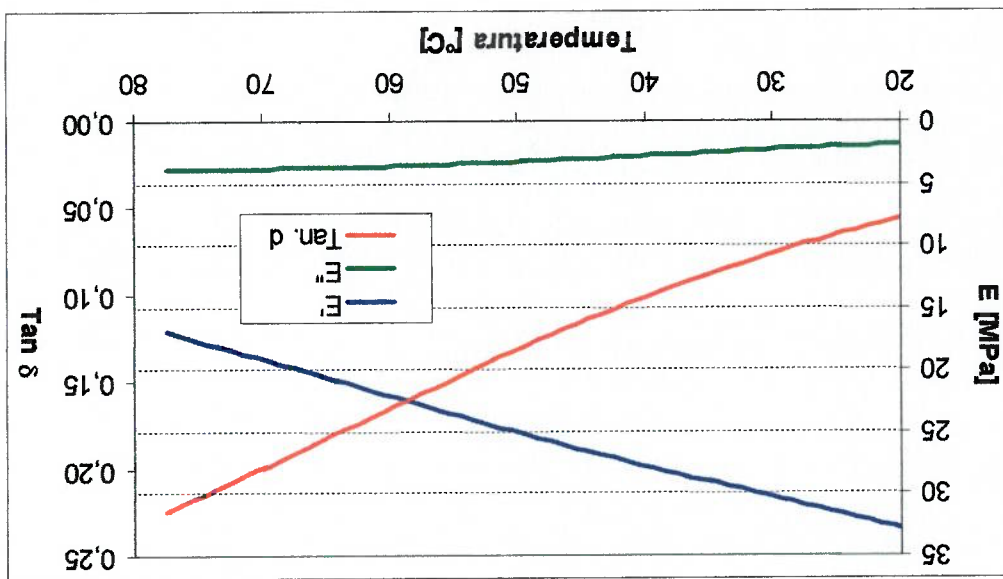


Figura 57. Resultados do ensaio DMA para o UHMWPE acima da temperatura ambiente.

O aumento do módulo de perda E'' acima da temperatura ambiente, de aproximadamente 2 MPa a 20°C para 4 MPa a 75°C , indica que está aumentando a região viscosa no material. Este comportamento deverá influenciar os resultados de taxa de desgaste e coeficiente de atrito nos ensaios realizados.

Na Figura 58 é mostrado o resultado do ensaio de comportamento dinâmico mecânico para o POM. Observa-se um vale marcado para uma temperatura de -31°C , indicado na Figura 58 com uma seta, que é associado à temperatura de transição vítrea T_g (CANEVAROLO, 1991). Este valor diverge da informação fornecida pelo fabricante (Tabela 3); segundo PLASTECNO (2002), este material tem uma T_g de -38°C . A diferença é menor que a observada no UHMWPE, e para tentar explicá-la pode ser usado o mesmo raciocínio usado para o UHMWPE.

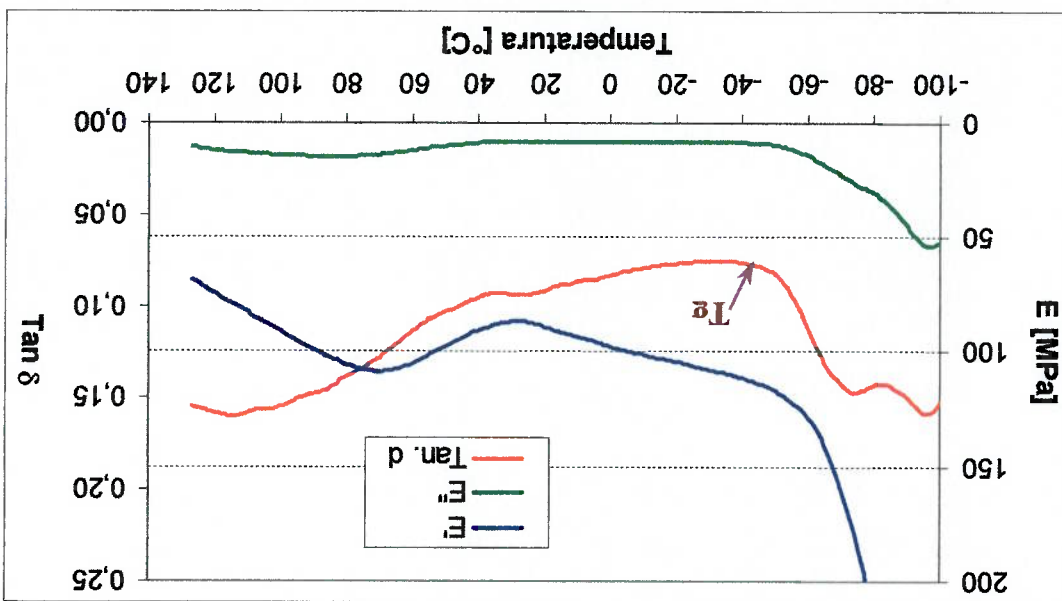


Figura 58. Resultados do ensaio DMA para o POM

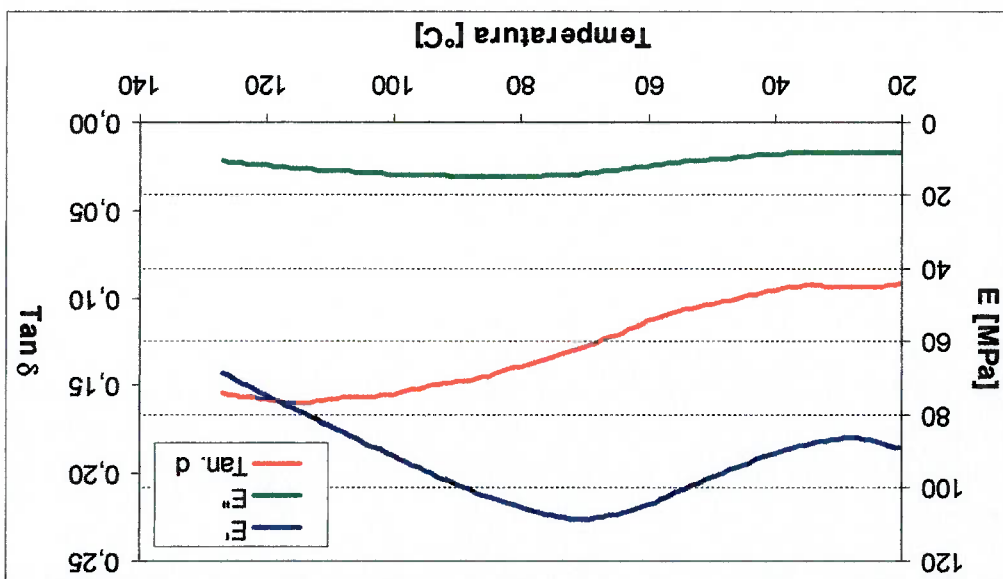
Na Figura 59 concentra-se o resultado do ensaio DMA na faixa de temperaturas acima da temperatura ambiente.

Na Figura 60 é mostrado o resultado do teste de análise dinâmico-mecânica para o PA6.6.

O aumento do módulo de perda E'' acima da temperatura ambiente, de aproximadamente 10 MPa a 20 °C para 15 MPa a 80 °C, indica que esta aumentando a região viscosa no material. Este comportamento deverá influenciar os resultados de taxa de desgaste e coeficiente de atrito nos ensaios realizados.

É observado como o módulo de armazenamento que estava diminuindo com a temperatura até aproximadamente 30 °C, começa aumentar até aproximadamente 70°C. Nesta faixa de temperaturas o material aumenta sua rigidez, possivelmente devido à plastificação de algumas regiões (YOUNG; LOVELL, 1991). Com o posterior aquecimento, o módulo de armazenamento cai, talvez pela impossibilidade das regiões plastificadas subsistirem, fazendo com que o material perca rigidez com a temperatura.

Figura 59. Resultados do ensaio DMA para o POM acima da temperatura ambiente.



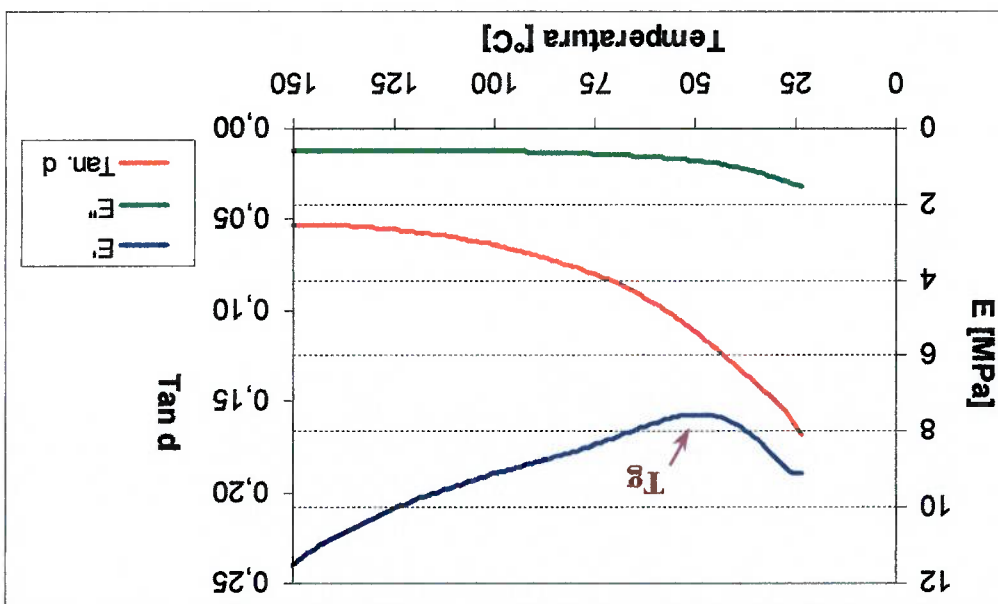
realizados. A seguir serão apresentados os resultados de temperatura na região próxima ao contato, coeficiente de atrito e taxa de desgaste, obtidos dos ensaios de desgaste

de deslizamento os corpos-de-prova fundiam ou apresentavam flexão. verificou-se que para a condição de 200 N de carga aplicada e 1 m/s de velocidade desgaste para cada material polimérico. No entanto, como explicado na seção 4.3.1, com 3 repetições para cada condição; perfazendo, assim, um total 27 ensaios de ensaio diferentes (3 níveis de cargas combinados a 3 velocidades de deslizamento) Inicialmente, para cada sistema tribológico seriam realizadas 9 condições de

5.2 Ensaios de desgaste

No caso do PA6.6 há um vale no módulo de armazenamento, numa temperatura de 51 °C que parece ser um efeito da temperatura de transição vítrea. Neste caso há uma boa aproximação com o dado fornecido pelo fabricante (Tabela 3), que indica uma Tg de 50 °C.

Figura 60. Resultados do ensaio DMA para o PA6.6



5.2.1 Temperatura no pino durante os ensaios

A Figura 61 mostra uma curva de temperatura em função da distância percorrida, para um pino de POM com 100 N de carga aplicada e uma velocidade de deslizamento de 1 m/s.

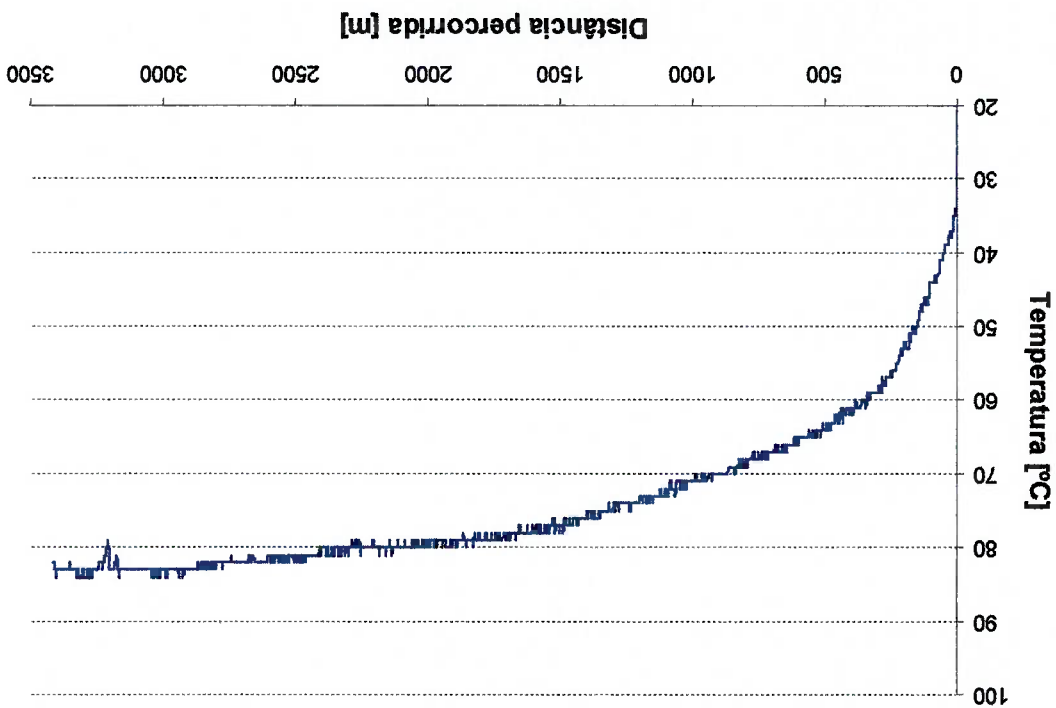


Figura 61. Temperatura na região próxima à superfície de contato em função da distância percorrida. Material: POM; P = 100 N; V = 1,0 m/s.

Como pode ser visto nesta figura, o ponto de monitoramento da temperatura (Figura 48) aquece progressivamente com a distância percorrida. Nos primeiros 500 m sua temperatura aumenta em 40 °C, enquanto que nos últimos 1000 m não há um aumento sensível. A temperatura que será usada para a análise neste trabalho será a medida na parte final do ensaio que, neste caso, corresponde a 83 °C.

A Tabela 17 apresenta os valores de temperatura média medida pelo termopar no ponto de monitoramento durante os últimos 1000 m de ensaio para os maiores valores de carga aplicada. Segundo os testes realizados com UHMWPE e

POM no trabalho de DA SILVA (2001), nas outras condições de carga e velocidade a temperatura era inferior aos valores apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Temperatura próxima à superfície de contato para os termoplásticos estudados nos maiores valores de carga aplicada.

Carga	Velocidade	Condição PV	[N]	[m/s]	[kW/m ²]	UHMWPE	POM	PA 66/6	Temperatura [°C]		
200	0,1	1020	42,4 ± 0,5	54,4 ± 1,0	84,2 ± 2,6	100	0,5	2550	53,8 ± 1,0	56,7 ± 0,8	76,5 ± 1,5
100	1,0	5100	78,3 ± 2,7	82,5 ± 0,8	117,0 ± 7,8	100	1,0	5100	78,3 ± 2,7	82,5 ± 0,8	117,0 ± 7,8
200	0,5	5100	81,9 ± 0,7	83,0 ± 0,9	113,3 ± 7,8	100	0,5	5100	81,9 ± 0,7	83,0 ± 0,9	113,3 ± 7,8

Como pode se observar na Tabela 17, no PA6.6 observou-se a maior temperatura dentre os termoplásticos testados, mesmo com a menor condição PV, de 1020 kW/m². Com o intuito de realizar um monitoramento mais detalhado da temperatura atingida nos ensaios com este material, foram realizados testes adicionais com medição de temperatura em outras condições PV; os resultados são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18. Temperatura próxima à superfície de contato de pinos de PA6.6 em função da condição PV.

Carga	Velocidade	Condição PV	[N]	[m/s]	[kW/m ²]	Temperatura [°C]
200	0,1	1020	42,4 ± 0,5	54,4 ± 1,0	84,2 ± 2,6	
100	1,0	5100	78,3 ± 2,7	82,5 ± 0,8	117,0 ± 7,8	
200	0,5	5100	81,9 ± 0,7	83,0 ± 0,9	113,3 ± 7,8	

Na Tabela 19 são mostrados os valores dos parâmetros envolvidos na estimativa da temperatura de contato em cada condição de ensaio e para cada

material (vide seção 4.3.1). Os parâmetros do aço inoxidável foram obtidos do site MATWEB (2003), e para os materiais termoplásticos usou-se a Tabela 3.

Tabela 19. Parâmetros usados na estimativa da temperatura no contato.

Parâmetros do sistema	
Cargas Aplicadas: 50, 100 e 200 N	Velocidades de deslizamento:
Raio da área de contato: 2,5 mm	
0,1; 0,5 e 1,0 m/s	
Parâmetros dos materiais	
Material	Parâmetro
Aço Inox.	k [W/K.m]
UHMWPE	k [W/K.m]
POM	k [W/K.m]
PA6.6	k [W/K.m]
	ρ [Kg/m ³]
	c [J/K.Kg]
	D [m ² /s]

Um outro parâmetro que deve ser considerado para cada condição de ensaio é o coeficiente de atrito. Na Tabela 20 são mostrados os valores de coeficiente de atrito medidos pelo equipamento pino-contra-disco nos testes realizados com monitoramento de temperatura.

Tabela 20. Valores de Coeficiente de Atrito para os testes com monitoramento da temperatura.

Material: UHMWPE	
Condição de Ensaio	Coefficiente de Atrito
100 N e 0,5 m/s	0,190 ± 0,006
100 N e 1,0 m/s	0,253 ± 0,007
200 N e 0,1 m/s	0,176 ± 0,005
200 N e 0,5 m/s	0,185 ± 0,005

Usando a Equação 16 pode-se calcular o número de PECLT para cada material em função da velocidade de deslizamento. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Números de PECLT para as condições de ensaio.

v = 0,1 m/s	v = 0,5 m/s	v = 1,0 m/s
UHMWPE		
1135,7	5678,6	11357,3
POM		
1784,7	8923,6	17847,1
PA6.6		
2082,1	10410,8	20821,7
AÇO INOXIDÁVEL		
80,6	403,2	806,5

Tabela 20. Valores de Coeficiente de Atrito para os testes com monitoramento da temperatura (continuação).

MATERIAL: POM	
Condição de Ensaio	Coeficiente de Atrito
100 N e 0,5 m/s	0,242 ± 0,007
100 N e 1,0 m/s	0,341 ± 0,009
200 N e 0,1 m/s	0,313 ± 0,005
200 N e 0,5 m/s	0,190 ± 0,002
MATERIAL: PA6.6	
Condição de Ensaio	Coeficiente de Atrito
50 N e 0,1 m/s	0,517 ± 0,009
100 N e 0,1 m/s	0,521 ± 0,007
200 N e 0,1 m/s	0,515 ± 0,008
50 N e 0,5 m/s	0,871 ± 0,029
50 N e 1,0 m/s	0,978 ± 0,042
100 N e 0,5 m/s	0,651 ± 0,024
100 N e 1,0 m/s	0,606 ± 0,048
200 N e 0,5 m/s	0,567 ± 0,011

De acordo com estes valores, todos com $Pe > 5$, deve-se usar a Equação 18 para calcular a temperatura média de cada corpo T_{me} . Usando os parâmetros da Tabela 19, os valores de coeficiente de atrito da Tabela 20 e tomando $h=1\text{mm}$, são calculados os valores de T_{me} e a temperatura de contato T_c , apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Valores de temperatura para os testes com monitoramento da temperatura.

Material: UHMWPE			
Condição de Ensaio	T_{me} [°C]	T_b [°C]	T_c [°C]
200 N e 0,1 m/s	9,8	42,4	52,2
100 N e 0,5 m/s	11,8	53,8	65,6
100 N e 1,0 m/s	22,2	78,3	100,5
200 N e 0,5 m/s	23,0	81,9	104,9
Material: POM			
Condição de Ensaio	T_{me} [°C]	T_b [°C]	T_c [°C]
200 N e 0,1 m/s	16,1	54,4	70,5
100 N e 0,5 m/s	13,9	56,7	71,6
100 N e 1,0 m/s	27,8	82,5	110,3
200 N e 0,5 m/s	21,9	83,0	114,9
Material: PA6.6			
Condição de Ensaio	T_{me} [°C]	T_b [°C]	T_c [°C]
50 N e 0,1 m/s	6,8	33,7	40,3
100 N e 0,1 m/s	25,5	51,7	77,2
200 N e 0,1 m/s	27,0	84,2	111,2
50 N e 0,5 m/s	40,5	96,8	137,3
50 N e 1,0 m/s	13,7	116,8	130,5
100 N e 0,5 m/s	38,2	76,5	114,7
100 N e 1,0 m/s	50,2	117,0	167,2
200 N e 0,5 m/s	66,5	113,3	179,8

As temperaturas de contato estimadas indicam que os materiais atingem, em algumas das condições mais severas, temperaturas superiores às recomendadas pelos fabricantes (vide temperaturas de uso contínuo apresentadas na Tabela 3).

Para a análise do efeito de alguns parâmetros na temperatura atingida pelos pinos durante os ensaios, decidiu-se usar as temperaturas medidas com o termopar por serem medidas diretamente no pino durante o ensaio e não os valores estimados de temperatura de contato apresentados na Tabela 22.

Na Figura 62 é mostrada a temperatura em função da condição PV, usando os resultados das Tabelas 17 e 18.

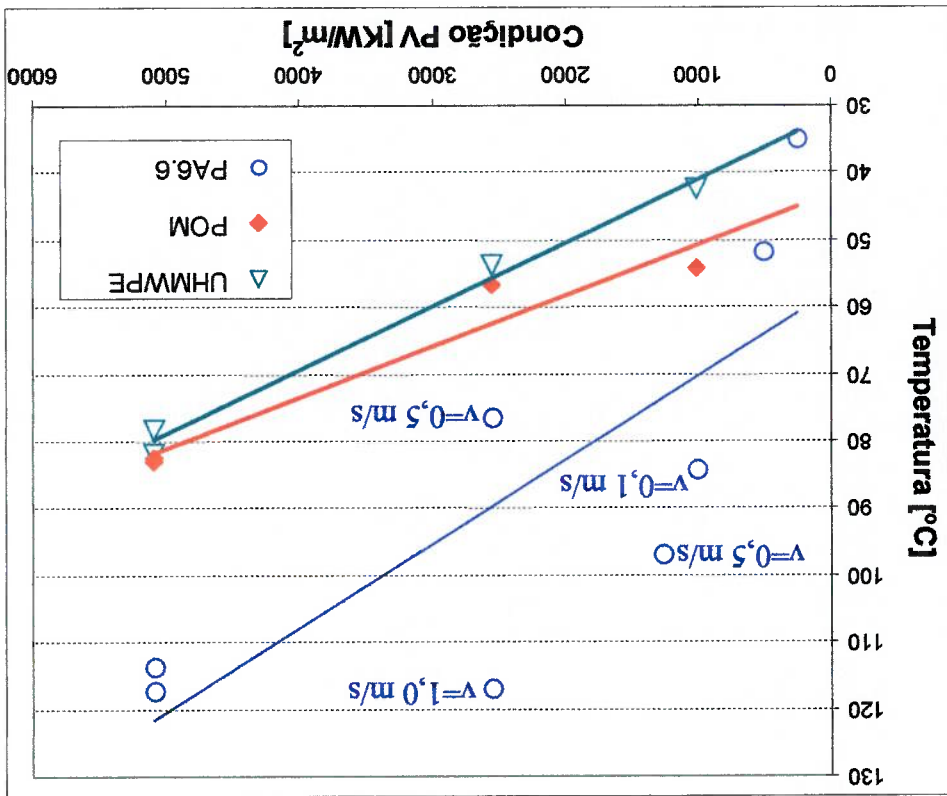


Figura 62. Temperatura próxima à superfície de contato para os termoplásticos estudados em função da condição PV.

Na Figura 62 é observado como a temperatura nos pinos de UHMWPE e POM são aproximadamente proporcionais à condição PV. Outro aspecto interessante

de se observar é que os resultados de ambos os materiais, nas condições PV superiores a 2000 KW/m², são semelhantes, sugerindo que é a condição PV que impõe a temperatura atingida durante o contato para estes materiais. Já as temperaturas medidas no PA6.6 apresentam um comportamento diferente, afastado da linearidade. Mesmo assim, é possível indicar para este material que os dois menores valores de condição PV produziram as duas menores temperaturas e que os dois maiores valores de condição PV produziram as maiores temperaturas.

Um fator que influencia o comportamento térmico dos materiais em contato é a condutividade térmica. Com base nos dados fornecidos pelos fabricantes, a ordem crescente é $k_{UHMWPE} > k_{POM} > k_{PA6.6}$. Pode ser observado como o material que mais facilmente transmite o calor, ou seja, o UHMWPE, é o material com as menores temperaturas. Também é interessante indicar que o material com a menor condutividade térmica, ou seja, o PA6.6, atingiu as maiores temperaturas para as mesmas condições de ensaio. Este comportamento deve influenciar os resultados de taxa de desgaste e coeficiente de atrito.

Em condições PV intermediárias, o parâmetro que parece influenciar mais a temperatura é a velocidade de deslizamento. Nas Figuras 63 e 64 é apresentada a temperatura na região próxima ao contato (Equação 15) em função da velocidade de deslizamento para os três materiais estudados.

Para diferenciar o efeito da carga aplicada na temperatura do UHMWPE e do POM, é apresentada a Figura 65.

É observado como a velocidade de deslizamento produz um incremento na temperatura de contato, para qualquer carga aplicada dada.

Figura 64. Temperatura próxima à superfície de contato para o PA6.6 em função da velocidade de deslizamento.

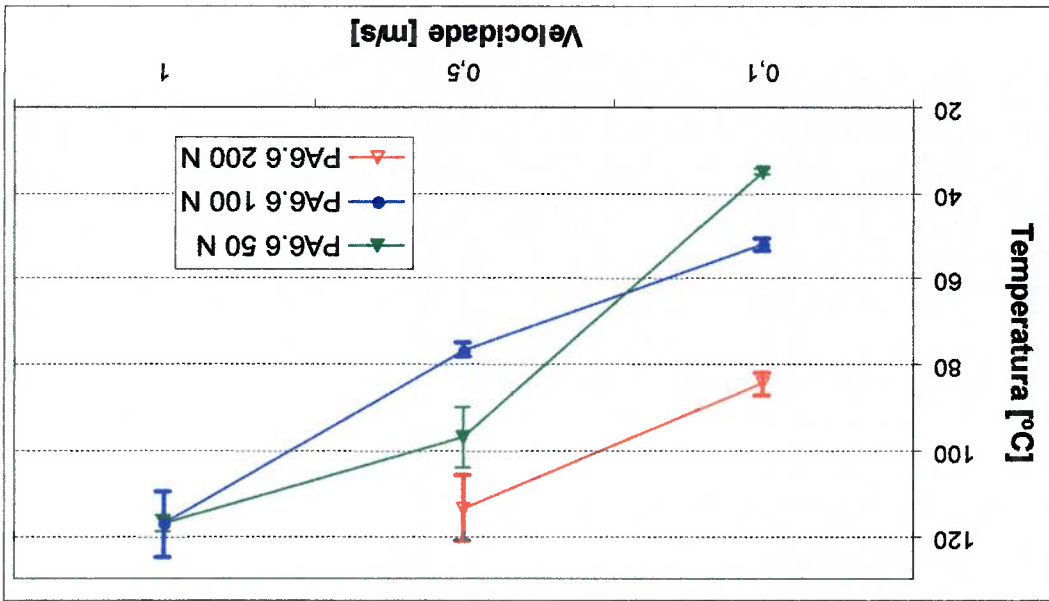
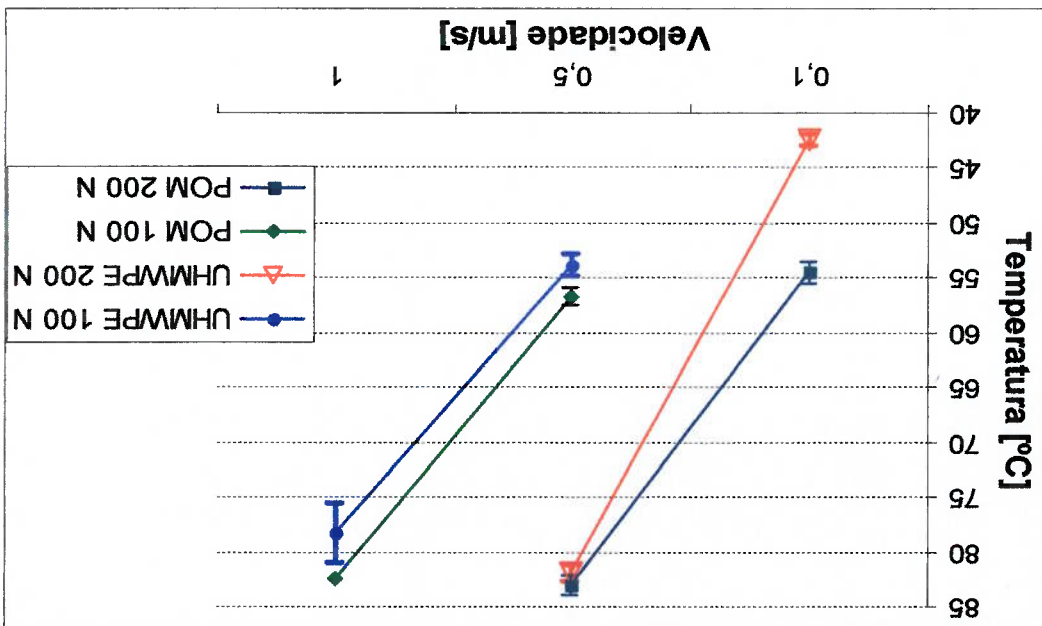


Figura 63. Temperatura próxima à superfície de contato para o UHMWPE e o POM em função da velocidade de deslizamento.



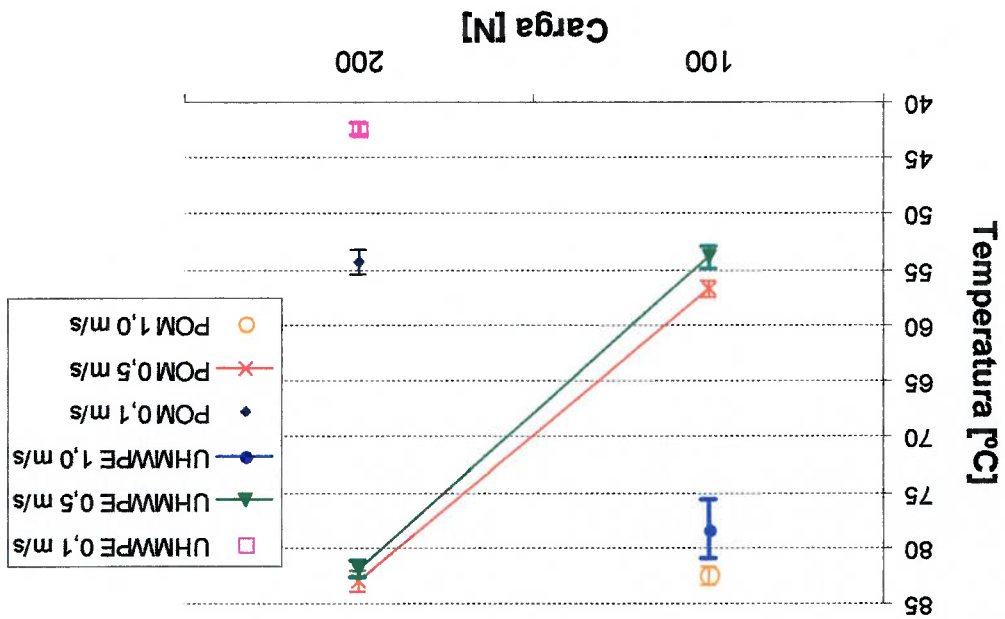


Figura 65. Temperatura próxima à superfície de contato para o UHMWPE e o POM em função da carga aplicada.

No caso do POM e do UHMWPE, não há ensaios suficientes para confirmar a hipótese de que a carga aplicada aumenta a temperatura na região de contato. O aumento de temperatura pode estar influenciado pela sinergia carga – velocidade de contato, ou condigão PV, e não só pela aplicação da carga. Uma ideia definitiva não pode ser emitida com base nestes dados porque, para a condigão PV, foram obtidos 3 dados para cada um destes materiais, enquanto que, para o efeito da carga, só existem duas linhas com dois dados cada, e esses dados são isolados.

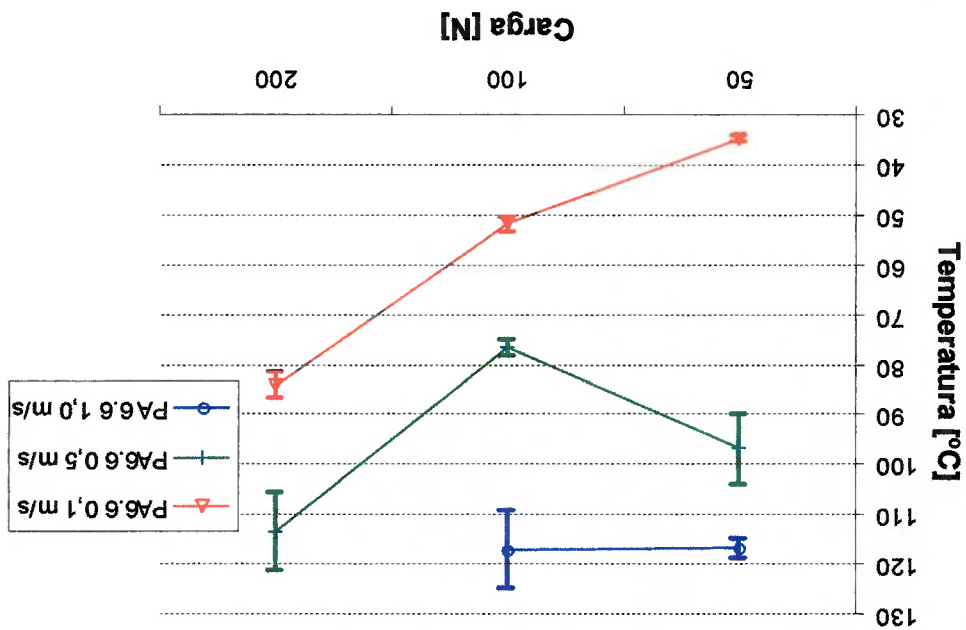
Na Figura 66 é apresentada a temperatura de contato em função da carga aplicada para o PA6.6.

O PA6.6, na região de contato, atingiu temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea, mas também não se aproximou da temperatura de fusão (Tabela 3). Sendo assim, do ponto de vista de comportamento mecânico em função da

Um aspecto que merece atenção é o fato de que o UHMWPE e o POM não atingiram a temperatura de fusão (Tabela 3), sugerindo que, durante o contato, o comportamento destes materiais é preferencialmente viscoelástico já que a temperatura de transição vítrea destes materiais é inferior à temperatura ambiente.

A temperatura na região de contato em função da carga, nos ensaios com o PA6.6, não apresenta um comportamento definido. Para a menor velocidade (0,1 m/s) a carga aplicada parece ter um efeito muito claro na temperatura, mas para a velocidade intermediária (0,5 m/s) este efeito não é observado, enquanto que para a carga aplicada a temperatura atingida é semelhante, enquanto que para a carga intermediária de 100 N há um mínimo no valor da temperatura. Já no caso da velocidade maior, não se observa influência da carga na temperatura atingida na região de contato.

Figura 66. Temperatura próxima à superfície de contato para o PA6.6 em função da carga aplicada.



temperatura, os resultados indicam que os três materiais mantiveram-se entre T_g e T_m , para não causar conflito com as temperaturas recomendadas pelo fabricante.

5.2.2 Coeficiente de atrito

Os resultados apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21 mostram a média e o desvio padrão de três repetições de coeficiente de atrito dos ensaios de desgaste nas 8 condições para os três termoplásticos, obtidos após o período de *running-in*, definido pelo procedimento já explicado no item 4.3.3.

Tabela 23 - Resultados de coeficiente de atrito UHMWPE contra Inox.

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Coeficiente de atrito
50	0,1	0,123 ± 0,049
50	0,5	0,092 ± 0,033
50	1,0	0,127 ± 0,004
100	0,1	0,156 ± 0,013
100	0,5	0,177 ± 0,003
100	1,0	0,185 ± 0,013
200	0,1	0,151 ± 0,019
200	0,5	0,180 ± 0,025

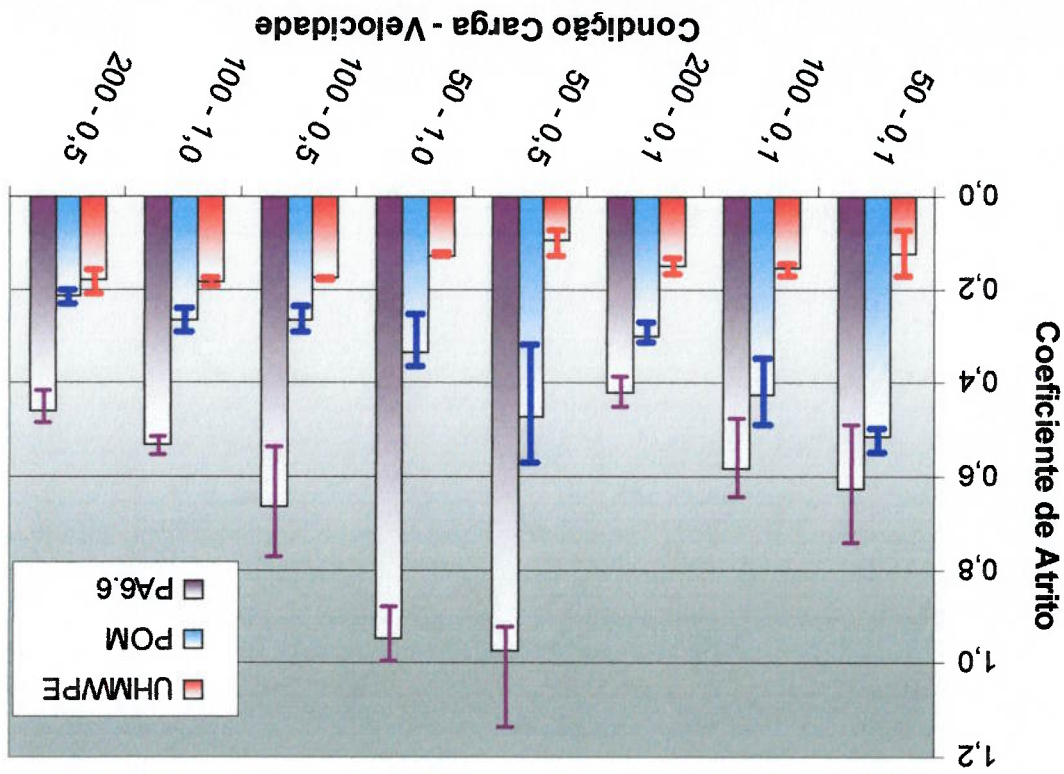
Tabela 24 – Resultados de coeficiente de atrito POM contra Inox

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Coeficiente de atrito
50	0,1	0,516 ± 0,029
50	0,5	0,471 ± 0,042
50	1,0	0,334 ± 0,011
100	0,1	0,425 ± 0,070
100	0,5	0,266 ± 0,013
100	1,0	0,266 ± 0,017
200	0,1	0,299 ± 0,025
200	0,5	0,216 ± 0,025

Tabela 25. Resultados de coeficiente de atrito dos ensaios PA6.6 contra Inox.

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Coeficiente de atrito
50	0,1	0,625 ± 0,127
50	0,5	0,974 ± 0,088
50	1,0	0,949 ± 0,062
100	0,1	0,582 ± 0,091
100	0,5	0,664 ± 0,119
100	1,0	0,533 ± 0,019
200	0,1	0,421 ± 0,034
200	0,5	0,458 ± 0,031

Na Figura 67 são mostrados os resultados de coeficiente de atrito para os três termoplásticos nas 8 condições de ensaio. As alturas das colunas representam a média das três repetições, e as barras indicam o maior e o menor dos valores obtidos nas três repetições.



Na Figura 67 observa-se que, em todas as 8 condições de ensaio, obtve-se o comportamento $\mu_{UHMPPE} < \mu_{POM} < \mu_{PA\ 66/6}$.

5.2.2.1 Efeito da carga aplicada no coeficiente de atrito

Na Figura 68 observa-se o efeito da carga no coeficiente de atrito para os três materiais.

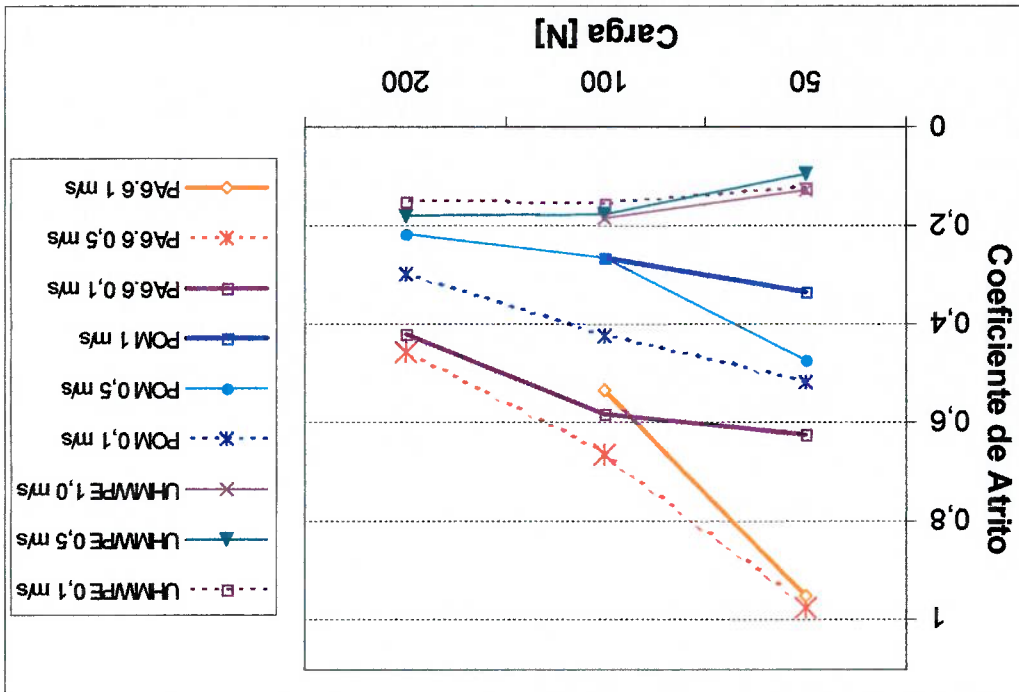


Figura 68. Efeito da carga aplicada no coeficiente de atrito.

Na Figura 68 observa-se que para o PA 66/6 e o POM o incremento na carga diminui o coeficiente de atrito para uma velocidade dada, enquanto que no caso do UHMWPE este efeito não acontece. No UHMWPE a carga parece não influir no coeficiente de atrito para uma velocidade dada, mas deve ser realizado um teste de hipótese para verificar esta afirmação.

Na Tabela 26 são mostrados os parâmetros usados nos testes de hipótese com o UHMWPE. A hipótese nula é que para uma condição de velocidade dada, a carga

não afeta o coeficiente de atrito, e é usada a distribuição t. Para todos os testes o nível de confiabilidade é $\alpha=10\%$, e o número de dados é $n=3$.

Tabela 26. Parâmetros dos testes de hipótese sobre o efeito da carga no coeficiente de atrito para o UHMWPE.

Velocidade	Parâmetros	t_0	v	$t_{\alpha, v}$	Conclusão
0,1 m/s	P=50 N; $\mu=0,123$; $s^2=0,049$; P=200 N; $\mu=0,151$; $s^2=0,019$;	3,90	8	1,860	A hipótese nula é rejeitada nos três casos.
0,5 m/s	P=50 N; $\mu=0,092$; $s^2=0,033$; P=200 N; $\mu=0,180$; $s^2=0,025$;	16,89	7	1,895	
1,0 m/s	P=50 N; $\mu=0,127$; $s^2=0,004$; P=100 N; $\mu=0,185$; $s^2=0,013$;	7,22	8	1,860	

Da Tabela 26 conclui-se, a partir dos valores do estatístico de prova t, que estatisticamente há evidência de que o coeficiente de atrito do UHMWPE varia com a carga aplicada. Segundo este resultado, e observando a Figura 68, o coeficiente de atrito do UHMWPE tende a aumentar com o incremento da carga aplicada, comportamento oposto ao apresentado pelo POM e o PA 66/6.

5.2.2.2 Efeito da velocidade no coeficiente de atrito

Na Figura 69 observa-se o efeito da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito para os três materiais termoplásticos.

Na Tabela 27 são mostrados os parâmetros usados nos testes de hipótese para o efeito da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito para o UHMWPE. A hipótese nula é que para uma condição de carga dada, a velocidade não afeta o coeficiente de atrito, usando a distribuição t. Para todos os testes o nível de confiabilidade é $\alpha=10\%$ e o número de dados é $n=3$ para todos os casos.

Na Figura 69 observa-se que não existe um comportamento padrão dos sistemas. O PA6.6 apresenta um máximo na velocidade de 0,5 m/s e no caso do POM, o coeficiente de atrito diminui com o incremento da carga aplicada.

Figura 69. Efeito da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito dos materiais testados.

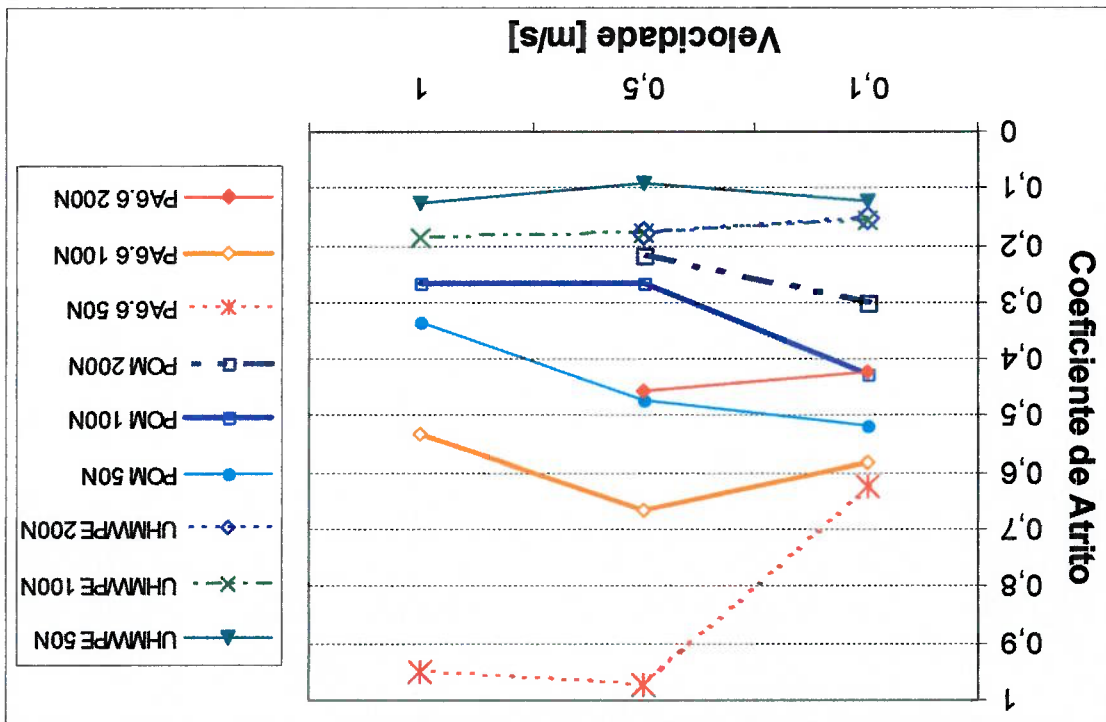


Tabela 27. Parâmetros dos testes de hipótese sobre o efeito da velocidade no coeficiente de atrito para o UHMWPE.

Carga	Parâmetros	t_0	v	$t_{\alpha v}$	Conclusão
50 N	$v=0,1$ m/s; $\mu=0,120$; $s^2=0,011$; $v=0,5$ m/s; $\mu=0,081$; $s^2=0,010$;	4,544	8	1,860	A hipótese nula é rejeitada.
50 N	$v=1,0$ m/s; $\mu=0,120$; $s^2=0,011$; $v=0,5$ m/s; $\mu=0,128$; $s^2=0,010$;	0,932	8	1,860	A hipótese nula é aceita
100 N	$v=0,1$ m/s; $\mu=0,144$; $s^2=0,010$; $v=0,5$ m/s; $\mu=0,174$; $s^2=0,010$;	3,674	8	1,860	A hipótese nula é rejeitada.
100 N	$v=1,0$ m/s; $\mu=0,190$; $s^2=0,011$; $v=0,5$ m/s; $\mu=0,174$; $s^2=0,010$;	1,864	8	1,860	Não pode-se afirmar nada
200 N	$v=0,1$ m/s; $\mu=0,152$; $s^2=0,019$; $v=0,5$ m/s; $\mu=0,200$; $s^2=0,007$;	4,106	6	1,943	A hipótese nula é rejeitada.

Da Tabela 27 conclui-se que estatisticamente há evidência de que o coeficiente de atrito do UHMWPE varia com a velocidade de deslizamento, pelo menos para três das cinco condições de ensaio. Usando este resultado e a Figura 69, o coeficiente de atrito do UHMWPE com carga de 50 N apresenta um mínimo com velocidade de deslizamento de 0,5 m/s, enquanto que com cargas de 100 N e 200 N tende a aumentar.

Finalmente, pode-se observar também que, com carga de 200 N, o coeficiente de atrito do PA 66/6 e do UHMWPE aumenta com a velocidade de deslizamento, enquanto que para o POM o coeficiente de atrito diminui com o incremento na velocidade para todos os valores de carga.

Adicionalmente ao efeito da carga aplicada e da velocidade de deslizamento, é conveniente analisar o efeito da sinergia de ambos os parâmetros. A seguir é apresentado o efeito da condição PV no coeficiente de atrito.

5.2.2.3 Efeito da condição PV no coeficiente de atrito

Na Figura 70 e na Tabela 28 observa-se o efeito da condição PV no coeficiente de atrito nos sistemas ensaiados.

Tabela 28. Efeito da condição PV no coeficiente de atrito para os termoplásticos

Condição PV [KW/m ²]	UHMWPE	POM	PA6.6
255	0,123 ± 0,049	0,516 ± 0,029	0,625 ± 0,127
510	0,156 ± 0,013	0,425 ± 0,070	0,582 ± 0,091
1019	0,151 ± 0,019	0,299 ± 0,025	0,421 ± 0,034
1274	0,092 ± 0,033	0,471 ± 0,042	0,974 ± 0,088
2548 (50 N, v=1 m/s)	0,127 ± 0,004	0,334 ± 0,011	0,949 ± 0,062
2548 (100 N, v=0,5m/s)	0,177 ± 0,003	0,266 ± 0,013	0,664 ± 0,119
5096 (100 N, v=1 m/s)	0,185 ± 0,013	0,266 ± 0,017	0,533 ± 0,019
5096 (200 N, v=0,5m/s)	0,180 ± 0,025	0,216 ± 0,030	0,458 ± 0,039

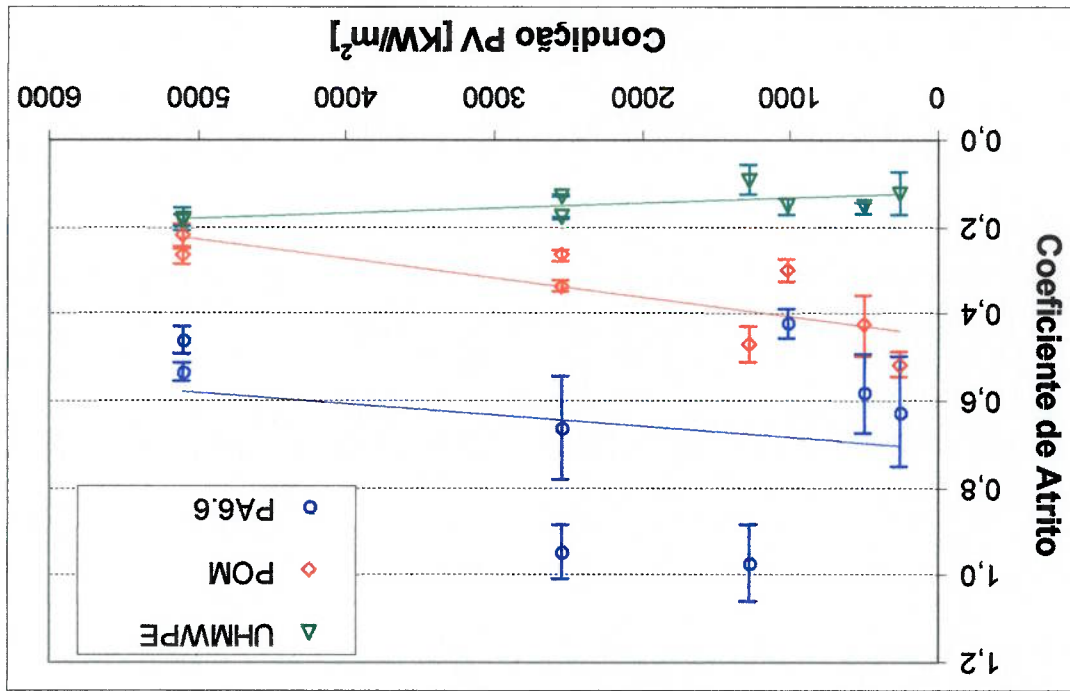


Figura 70. Efeito da condição PV no coeficiente de atrito.

Na Figura 70 observa-se que não existe um comportamento definido para o efeito da condição PV nos termoplásticos estudados. O coeficiente de atrito do UHMWPE tende a aumentar com o incremento da condição PV; para o POM a

tendência foi totalmente contrária, ou seja, o coeficiente de atrito diminuiu com o aumento da condição PV. Já no caso do PA 66/6, não é possível afirmar nada pela grande dispersão dos dados, o que é refletido no baixo coeficiente de correlação ($R^2=0.0733$), obtido quando tenta-se ajustar uma reta aos pontos experimentais. A conclusão é que os resultados não permitem afirmar se há uma relação única entre o coeficiente de atrito e a condição PV para os termoplásticos aqui estudados.

coeficiente de atrito e a condição PV para os termoplásticos aqui estudados.

5.2.3 Ensaios de Fluência à Temperatura ambiente -

5.2.3 Ensaios de Fluência à Temperatura ambiente

Nas Figuras 71, 72 e 73 são apresentados os resultados dos testes de fluência à temperatura ambiente para os três termoplásticos.

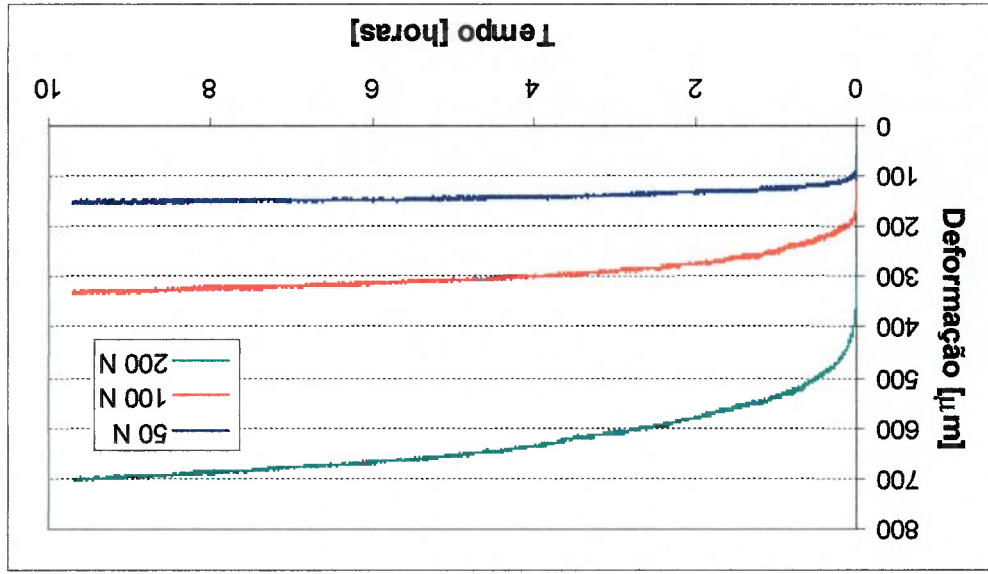


Figura 71. Ensaios de fluência à temperatura ambiente para o UHMWPE

Nas Figuras 74 e 75 são mostrados os resultados obtidos nos testes de fluência a temperatura ambiente com UHMWPE e POM, realizados no equipamento pino-contra-disco, com os dados fornecidos pelos fabricantes (vide Figuras 32 e 35).

Figura 73. Ensaios de fluência à temperatura ambiente para o PA6.6

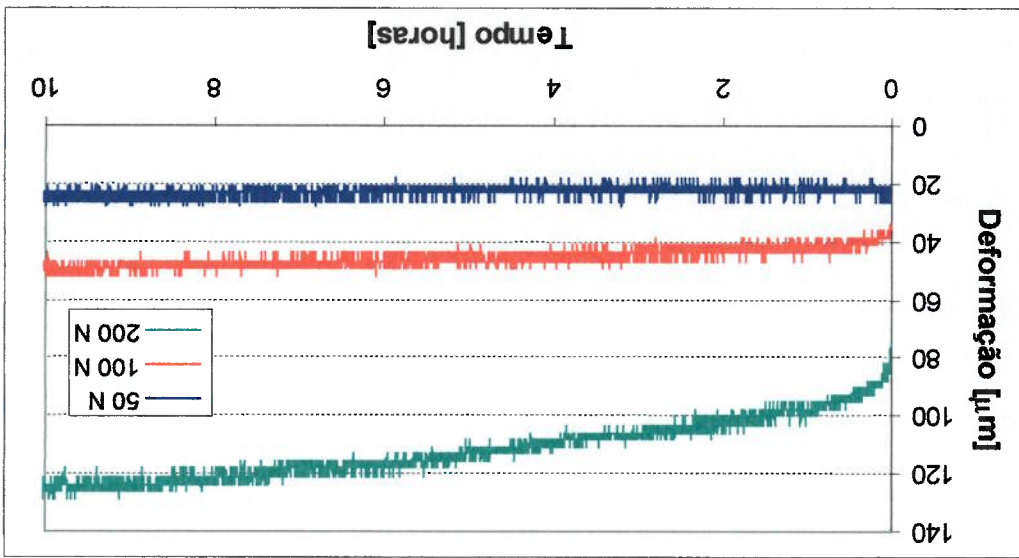
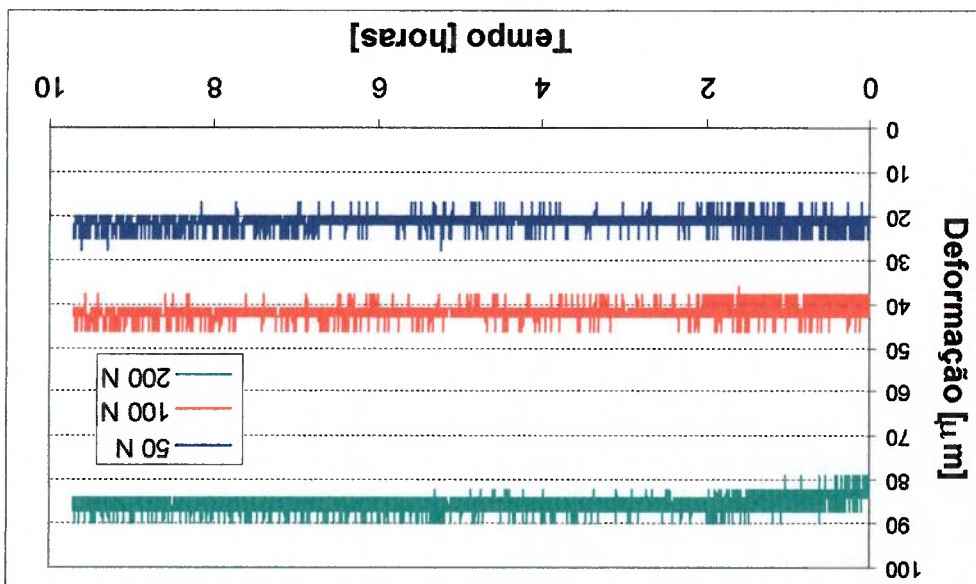


Figura 72. Ensaios de fluência à temperatura ambiente para o POM



Nas Figuras 75 e 76 é observado que os corpos-de-prova apresentaram menos deformação que a registrada pelos fabricantes. A taxa de deformação também foi inferior para ambos os materiais nas condições de esforço indicadas.

Figura 75. Comparação entre a deformação por fluência a temperatura ambiente do POM medida com os dados fornecidos pelo fabricante.

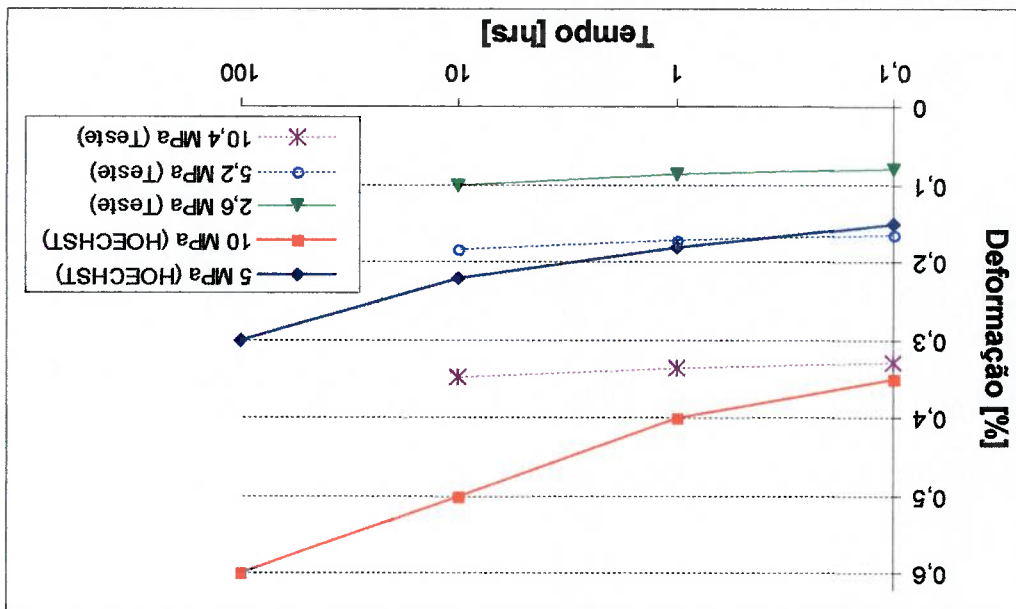
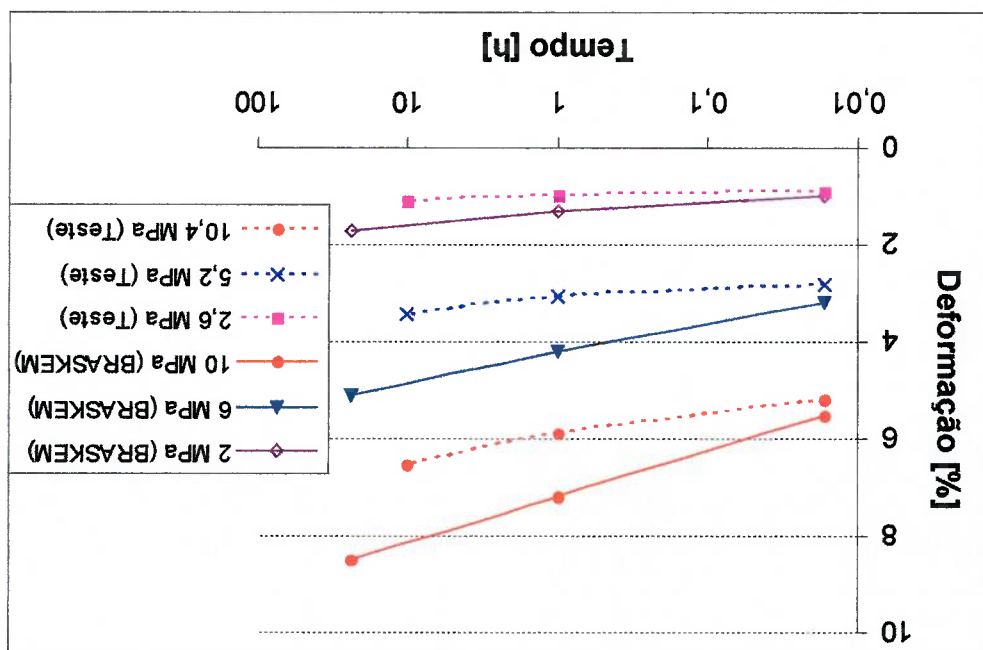


Figura 74. Comparação entre a deformação por fluência a temperatura ambiente do UHMWPE medida com os dados fornecidos pelo fabricante.



Como explicado na Tabela 7, realiza-se um ajuste linear para a deformação por fluência a temperatura ambiente com o intuito de se usar essa inclinação para determinar a taxa de desgaste com base na variação de altura dos pinos. Já que os ensaios são feitos com base na distância percorrida, ou seja, 3500 m, é necessário considerar as velocidades de deslizamento para que as inclinações das curvas de deformação por fluência tenham as mesmas unidades que as de perda de altura ($\mu\text{m}/\text{m}$). Na Tabela 29 são mostrados os parâmetros usados para os ajustes lineares.

Tabela 29. Parâmetros considerados para determinar os intervalos de ajuste linear para as deformações por fluência.

Velocidade [m/s]	Duração do ensaio [horas]	Intervalo para o ajuste	
		[horas]	[m]
0,1	9,72	3-9,72	1080-3500
0,5	1,94	0,6-1,94	
1,0	0,97	0,3-0,97	

Com base na Tabela 29 e nos resultados das Figuras 64, 65 e 66, os valores estimados de taxa de deformação devida à fluência a temperatura ambiente, segundo o ajuste linear, são apresentados na Tabela 30.

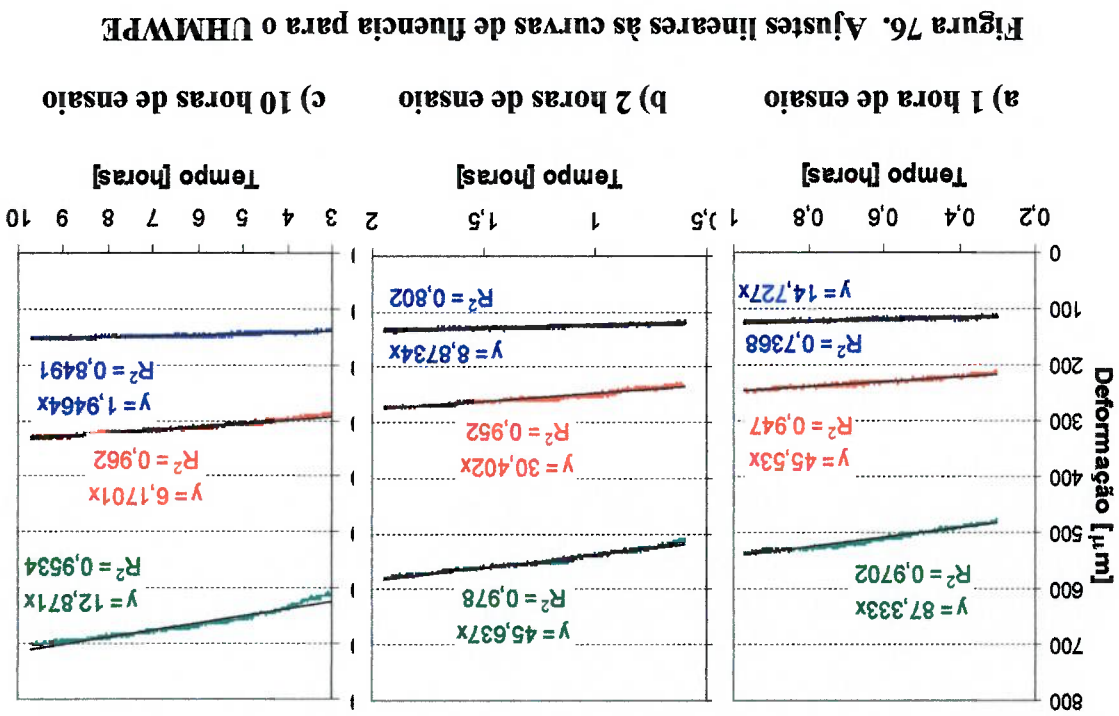
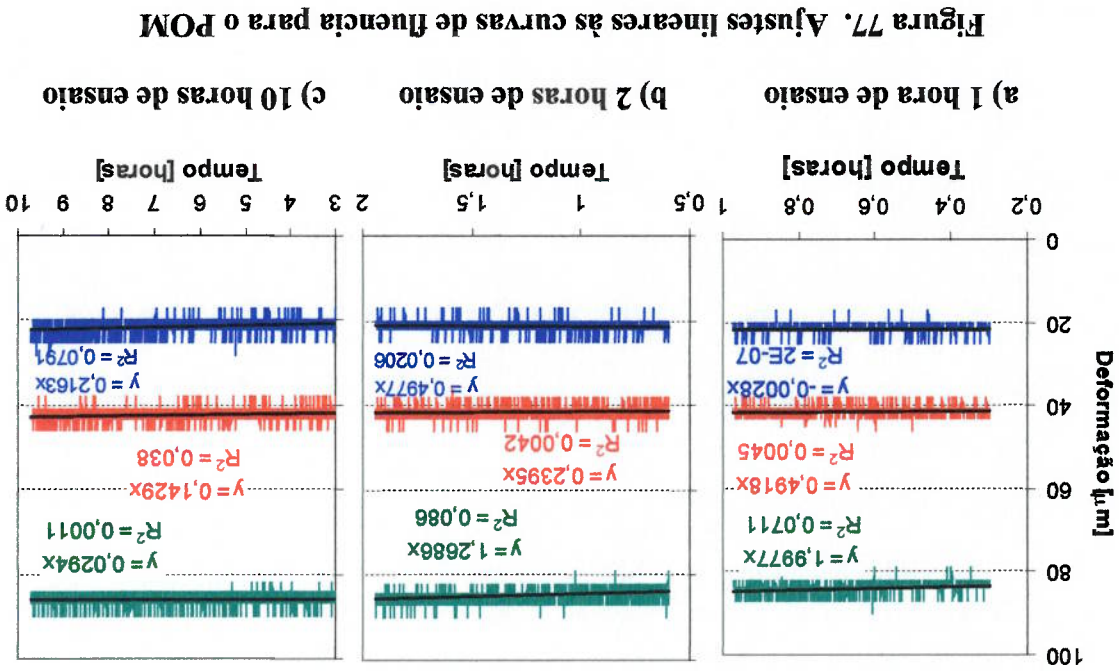
Tabela 30. Resultados do ajuste linear realizado para os ensaios de fluência

Material	Parâmetros	Inclinação estimada	Correlação R^2		
			Carga [N]	Velocidade [m/s]	
UHMWPE	200	0,1	12,871	0,0357	0,953
		0,5	45,637	0,0253	0,978
		1,0	6,170	0,0171	0,962
	100	0,1	30,402	0,0169	0,952
		0,5	45,530	0,0127	0,947
		1,0	1,946	0,0054	0,849
50	0,1	8,873	0,0049	0,802	
	0,5	14,727	0,0041	0,737	
	1,0				

Tabela 30 (continuação). Resultados do ajuste linear realizado para os ensaios de fluência.

Material	Parâmetros			Correlação R^2	
	Inclinação estimada	Velocidade	Carga		
	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{h}$]	[N]		
POM	200	0,1	0,029	0,000(*)	0,001
		0,5	1,268	0,0007	0,086
	100	0,1	1,998	0,0006	0,071
		0,5	0,143	0,0004	0,038
	50	0,1	0,239	0,0001	0,004
		0,5	0,492	0,0001	0,005
PA6.6	200	0,1	2,884	0,0080	0,903
		0,5	4,655	0,0026	0,519
	100	0,1	9,45	0,0026	0,600
		0,5	1,224	0,0007	0,072
	50	0,1	0,404	0,0011	0,207
		0,5	0(*)	0(*)	0,001
(*) Os primeiros quatro dígitos significativos são zero.					

Nas Figuras 67, 68 e 69 são mostrados os ajustes lineares associados aos dados mostrados nas Figuras 64, 65 e 66, e que são utilizados na Tabela 30. Nas três figuras são usadas a cor verde para a carga de 200 N, a cor vermelha para a carga de 100 N e a cor azul para a carga de 50 N.



apreciavelmente nos resultados de taxa de desgaste. indicando que a fluência a temperatura ambiente parece não influir

4. O POM apresenta uma deformação pequena durante o tempo de ensaio, a fluência.

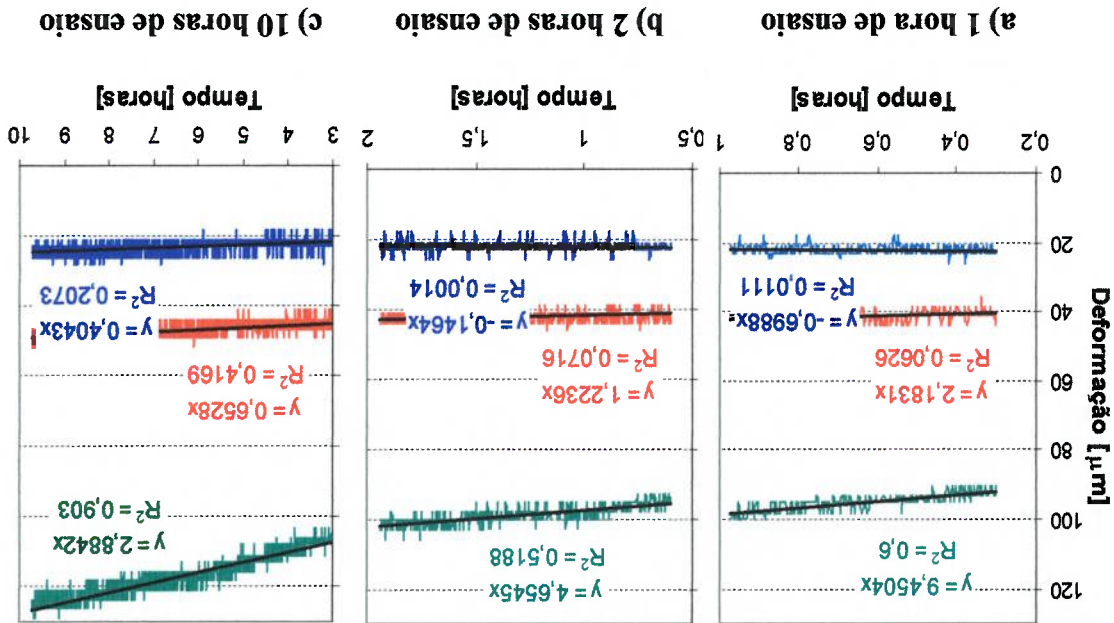
3. Na maioria dos ensaios, a correlação melhorou com o aumento no intervalo de tempo considerado. Isto significa que os testes com velocidades de 0,1 m/s e 0,5 m/s apresentaram um melhor ajuste linear para a fluência.

2. O aumento na carga aplicada incrementa a correlação para o ajuste linear.

1. Há uma grande dispersão nos dados, mas essa dispersão não influencia a linearidade do modelo. A falta de correlação não indica que o comportamento não seja linear, e sim que os dados estão igualmente dispersos com respeito à uma linha.

A respeito dos resultados dos testes de fluência, considera-se o seguinte:

Figura 78. Ajustes lineares às curvas de fluência para o PA6.6



5. O UHMWPE parece apresentar a maior deformação devida à fluência, seguido pelo PA6.6. Já no caso do POM, a deformação é comparativamente bastante inferior à dos outros dois materiais.

5.2.4 Taxa de desgaste

Os resultados apresentados nas Tabelas 27, 28 e 29 mostram os valores médios de inclinação da curva de perda de altura (Δh) dos pinos em função da distância. Estes valores foram obtidos após estimar o ponto de começo do período de desgaste estacionário, segundo o procedimento já explicado no item 4.1.4.

Tabela 31 – Resultados de perda de altura em função da distância - UHMWPE

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Perda de altura [$\mu\text{m}/\text{m}$]
50	0,1	0,011 \pm 0,003
50	0,5	0,005 \pm 0,006
50	1,0	0,004 \pm 0,003
100	0,1	0,006 \pm 0,007
100	0,5	0,022 \pm 0,004
100	1,0	0,016 \pm 0,005
200	0,1	0,043 \pm 0,002
200	0,5	0,206 \pm 0,127

Tabela 32 – Resultados de perda de altura em função da distância - POM.

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Perda de altura [$\mu\text{m}/\text{m}$]
50	0,1	0,015 \pm 0,003
50	0,5	0,053 \pm 0,010
50	1,0	0,047 \pm 0,019
100	0,1	0,011 \pm 0,005
100	0,5	0,052 \pm 0,015
100	1,0	0,029 \pm 0,006
200	0,1	0,105 \pm 0,058
200	0,5	0,050 \pm 0,011

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Perda de altura [$\mu\text{m}/\text{m}$]
50	0,1	0,036 \pm 0,007
50	0,5	0,059 \pm 0,015
50	1,0	0,238 \pm 0,123
100	0,1	0,045 \pm 0,021
100	0,5	0,266 \pm 0,174
100	1,0	0,221 \pm 0,136
200	0,1	0,131 \pm 0,007
200	0,5	0,321 \pm 0,183

Com base nos resultados de perda de altura e nas curvas de fluência, são calculados os valores de taxa de desgaste. Nos resultados dos ensaios realizados com pinos de UHMWPE observou-se que, em algumas das condições de ensaio, a taxa de deformação devida à fluência era maior do que a média das taxas de perda de altura determinadas nos ensaios de desgaste. Optou-se por apresentar as taxas de desgaste nessas condições como sendo iguais a zero, mas isso não significa que o pino não tenha perdido massa durante contato com o contra-corpo, só indica que a taxa de deformação devida à fluência confunde-se com a taxa de perda de altura na região estabelecida como de desgaste estacionário, sugerindo que a perda de massa nessa taxa foi tão baixa que não foi possível determiná-la pelo método aqui proposto.

Os resultados de taxa de desgaste são apresentados nas Tabelas 30, 31 e 32, para os três materiais termoplásticos. Os valores correspondem à média das taxas de desgaste para as três repetições, junto com um valor de desvio padrão que é o mesmo das taxas calculadas para a perda de altura. Optou-se por manter o desvio padrão das taxas de perda de altura já que não foi estabelecido um desvio padrão para as taxas de deformação por fluência.

Na Figura 79 são mostrados os resultados de taxa de desgaste para os três termoplásticos nas 8 condições de ensaio.

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Taxa de desgaste [$\mu\text{m}/\text{m}$]
50	0,1	0,035 \pm 0,007
50	0,5	0,059 \pm 0,015
50	1,0	0,238 \pm 0,123
100	0,1	0,043 \pm 0,021
100	0,5	0,265 \pm 0,174
100	1,0	0,220 \pm 0,136
200	0,1	0,123 \pm 0,007
200	0,5	0,318 \pm 0,183

Tabela 36– Resultados de taxa de desgaste dos ensaios com PA6.6

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Taxa de desgaste [$\mu\text{m}/\text{m}$]
50	0,1	0,014 \pm 0,003
50	0,5	0,053 \pm 0,010
50	1,0	0,047 \pm 0,019
100	0,1	0,011 \pm 0,005
100	0,5	0,052 \pm 0,015
100	1,0	0,029 \pm 0,006
200	0,1	0,105 \pm 0,058
200	0,5	0,049 \pm 0,011

Tabela 35– Resultados de taxa de desgaste dos ensaios com POM

Carga [N]	Velocidade [m/s]	Taxa de desgaste [$\mu\text{m}/\text{m}$]
50	0,1	0,005 \pm 0,003
50	0,5	0,002 \pm 0,002
50	1,0	0,001 \pm 0,001
100	0,1	0 \pm 0
100	0,5	0,005 \pm 0,004
100	1,0	0,003 \pm 0,003
200	0,1	0,007 \pm 0,002
200	0,5	0,181 \pm 0,127

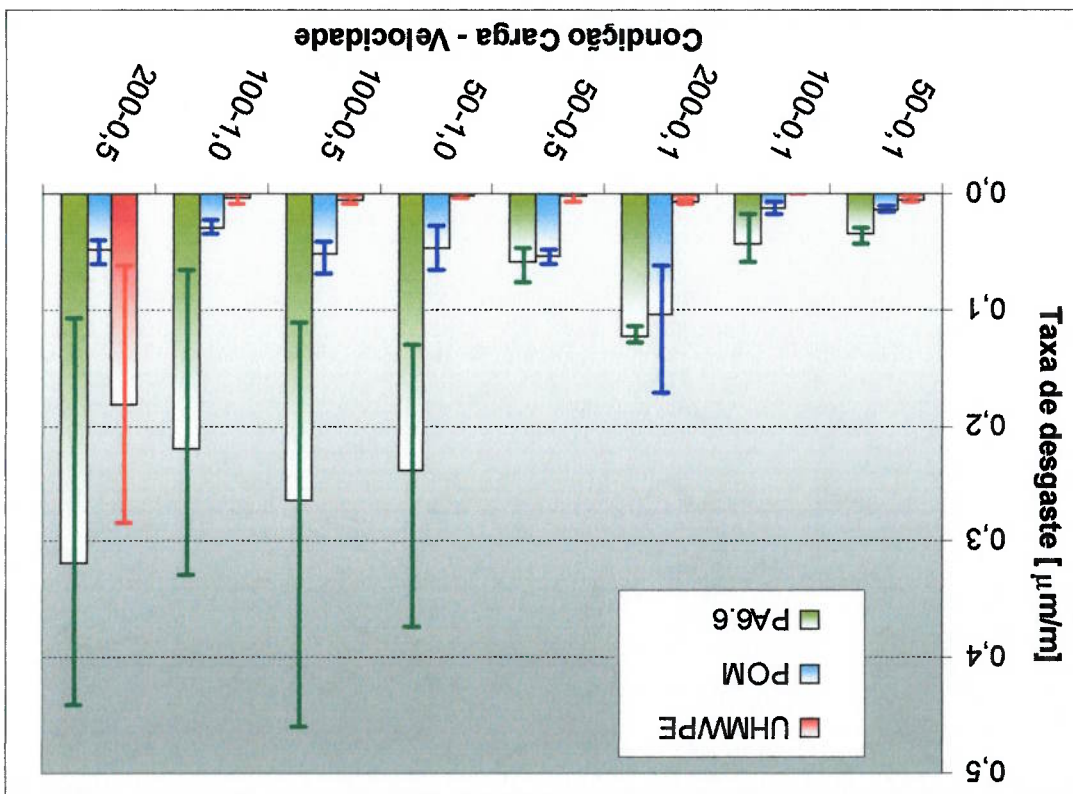
Tabela 34– Resultados de taxa de desgaste dos ensaios com UHMWPE

Na Figura 80 observa-se o efeito da carga na taxa de desgaste para o UHMWPE.

5.2.4.1 Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste

Na Figura 79 se observa que a taxa de desgaste do sistema UHMWPE deslizando contra aço inoxidável tende a ser a menor dentre os três pares de materiais, e como as taxas de desgaste para o PA6.6 foram as maiores dentre os tribosistemas estudados. Deve ser considerado que os resultados indicam só tendências, já que em algumas das condições de carga e velocidade a dispersão dos dados é tão grande que pode-se dizer que os resultados são estatisticamente iguais para dois materiais.

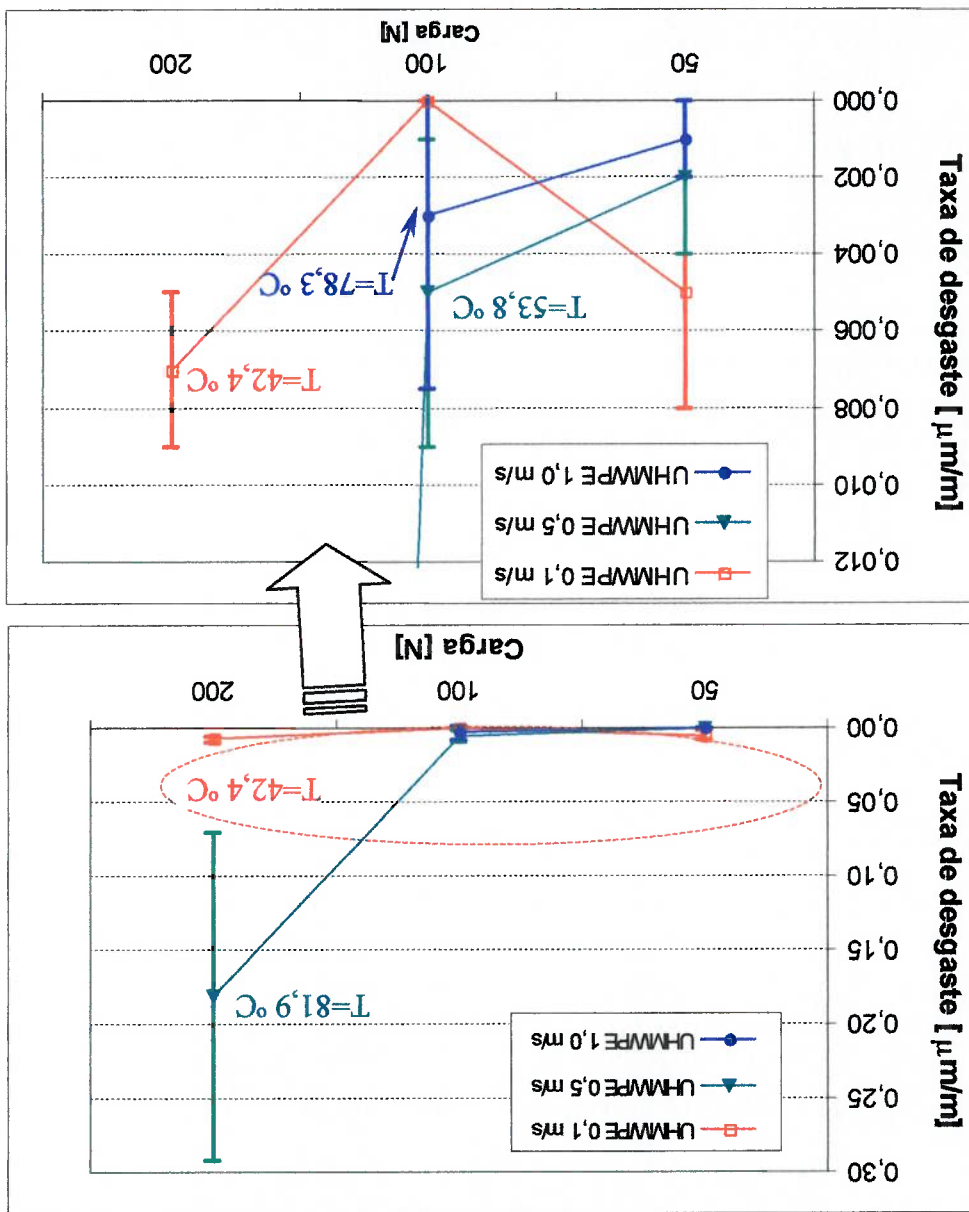
Figura 79 - Resultados de taxa de desgaste para os ensaios realizados



Nesta figura observa-se que para o UHMWPE não existe um comportamento padrão que defina a relação entre a taxa de desgaste e a carga aplicada. Pode-se observar que o resultado dos ensaios com 200 N e 0,5 m/s apresenta um valor muito superior aos outros resultados. Isolando os outros resultados observa-se:

- Para a velocidade de 0,1 m/s a taxa de desgaste tem um mínimo na carga de 100 N, levando em consideração que nessa condição o valor calculado para a taxa de desgaste é zero.

Figura 80. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste do UHMWPE. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.



- Nos ensaios com velocidades de 0,5 e 1,0 m/s, a taxa de desgaste aumentou com a carga aplicada.
- Não há diferença entre as taxas de desgaste obtidas para as velocidades de 0,5 m/s e 1 m/s nas cargas de 50 N e 100 N.

Na Figura 81 observa-se o efeito da carga na taxa de desgaste para o POM.

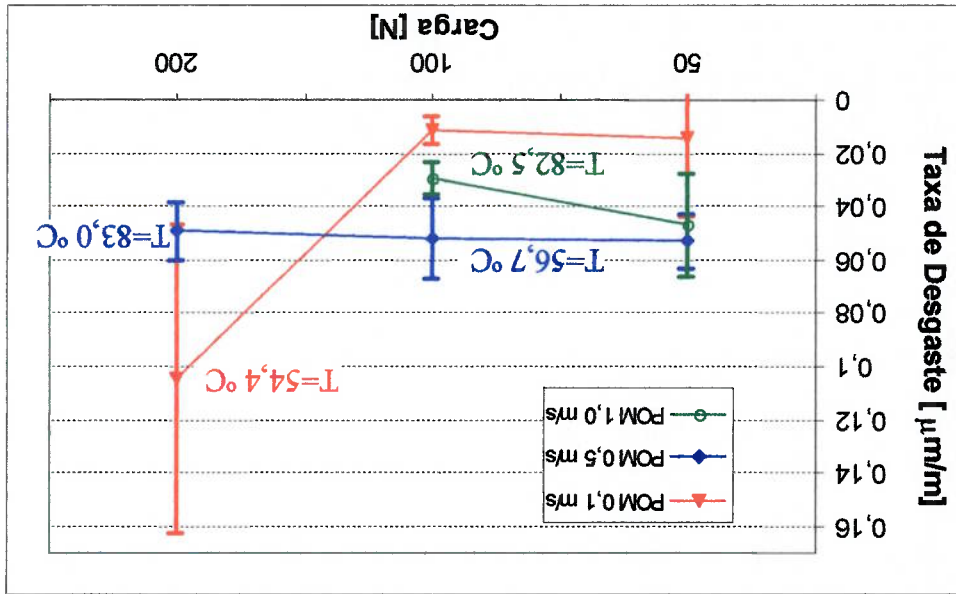


Figura 81. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste do POM. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.

Parece que as condições impostas ao sistema com a carga de 50 N não produzem efeitos na taxa de desgaste diferentes dos produzidos pela carga de 100 N, mas as condições impostas com a carga de 200 N produzem um aumento na taxa de desgaste para a menor velocidade (0,1 m/s).

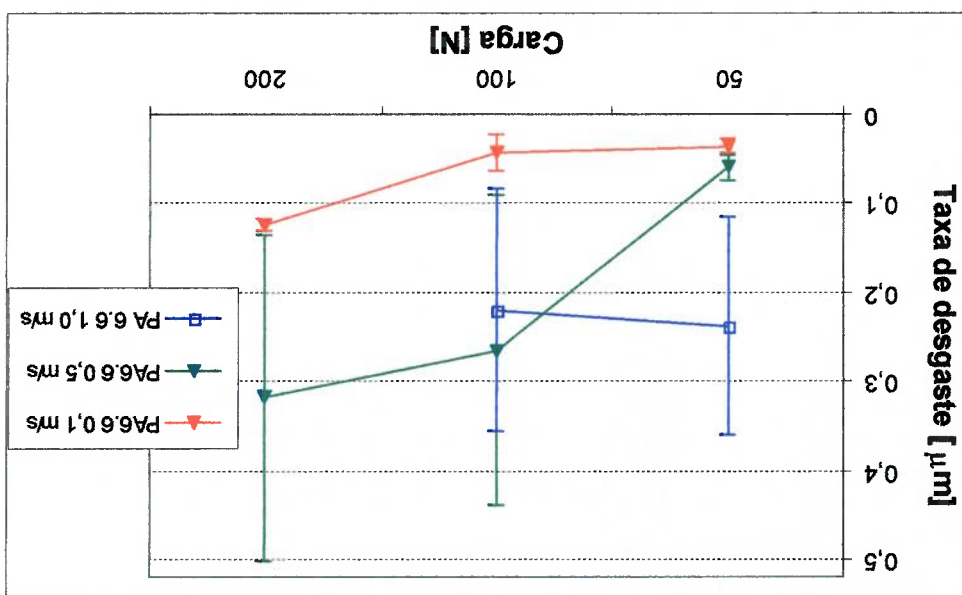
Na Figura 82 observa-se o efeito da carga na taxa de desgaste para o PA6.6.

Na Figura 83 observa-se o efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste para o UHMWPE.

5.2.4.2 Efeito da velocidade na taxa de desgaste

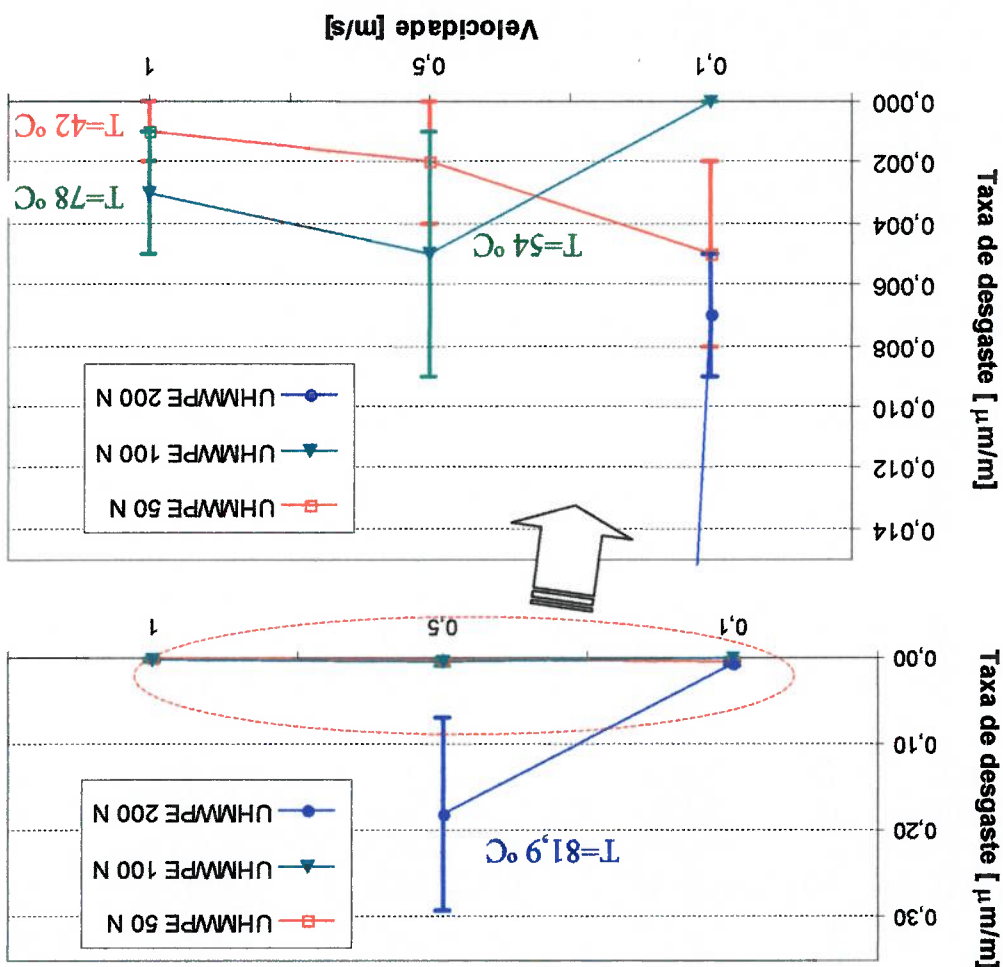
A grande dispersão dos dados para as velocidades de 0,5 e 1,0 m/s, observada na Figura 82, não permite discutir os resultados de uma maneira direta. Os resultados com velocidade de 0,1 m/s mostram que a taxa de desgaste aumentou com a carga de 200 N, embora não seja observada uma diferença sensível para as taxas obtidas com as cargas de 50 e 100 N. Já na velocidade de 0,5 m/s há um mínimo no resultado com carga de 50 N, e as taxas com 100 N e 200 N são superiores, e estatisticamente iguais entre si. Com a velocidade de 1,0 m/s não é observada alguma variação com a carga aplicada.

Figura 82. Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste do PA6.6.



Na Figura 83 observa-se que para a carga de 50 N a velocidade de deslizamento fez com que a taxa de desgaste caísse, mas a dispersão dos dados não permite confirmar plenamente esta afirmação. A carga de 100 N não produziu desgaste mensurável na velocidade de 0,1 m/s, e não foi observada diferença entre os resultados com velocidades de 0,5 e 1,0 m/s; mesmo com médias diferentes, as barras de erro mostram que não há uma diferença significativa entre os valores obtidos. A carga de 200 N fez com que um aumento na velocidade de deslizamento resultasse em um aumento na taxa de desgaste.

Figura 83. Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste do UHMWPE. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.



Na Figura 84 observa-se o efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste para o POM.

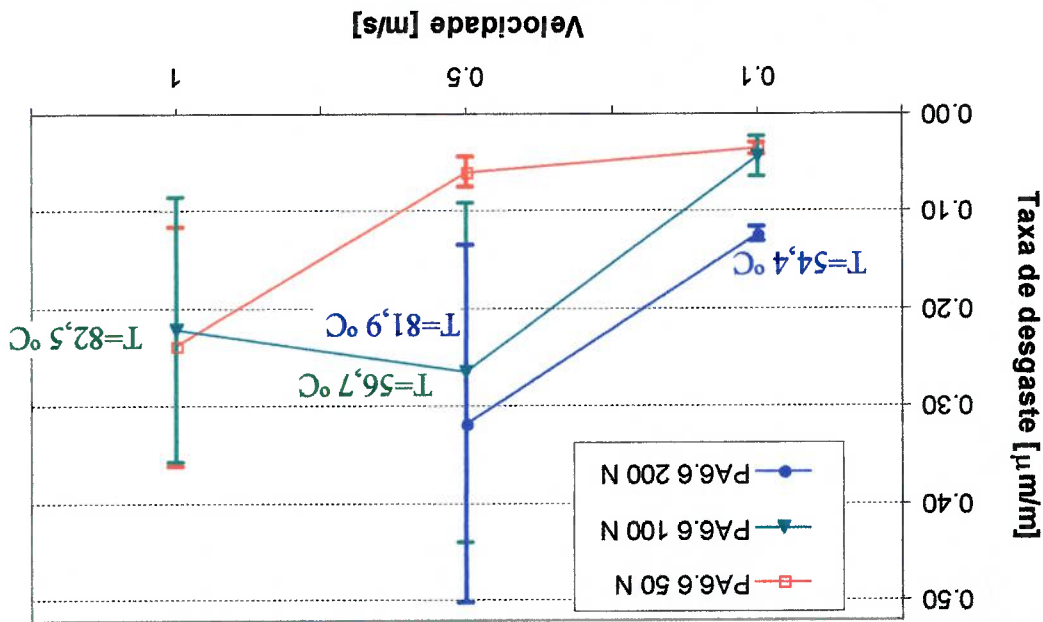


Figura 84. Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste do POM. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.

Observa-se que para as cargas de 50 e 100 N não há uma diferença significativa entre os valores de taxa de desgaste, mesmo com o aumento observado na temperatura atingida na região de contato, em função da velocidade. Para a carga de 200 N a velocidade de deslizamento diminui o valor de taxa de desgaste, mas as amplitudes das barras de erro impedem fazer uma afirmação com respaldo nos resultados. Observando os resultados do POM, pode-se afirmar que a velocidade de deslizamento parece não influenciar sensivelmente a taxa de desgaste nas cargas aplicadas.

Na Figura 85 observa-se o efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste para o PA6.6.

Na Figura 73 é mostrado o efeito da condição PV na taxa de desgaste para os três materiais estudados.

5.2.4.3 Efeito da condição PV na taxa de desgaste

A análise do efeito da condição PV possibilita ajudar a se obter uma relação mais clara entre a velocidade de deslizamento e a taxa de desgaste.

Observa-se que para as cargas de 50 N não há uma diferença significativa entre os valores de taxa de desgaste nas velocidades de 0,1 m/s e 0,5 m/s, mesmo com o aumento observado na temperatura atingida na região de contato em função da velocidade. Para a carga de 100 N a velocidade de deslizamento resultou em um aumento no valor de taxa de desgaste, que pareceu atingir um patamar nas velocidades de 0,5 e 1,0 m/s. No entanto, as amplitudes das barras de erro impedem fazer uma afirmação com respaldo nos resultados.

Figura 85. Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste do PA6.6. São indicadas as temperaturas medidas na região próxima ao contato.

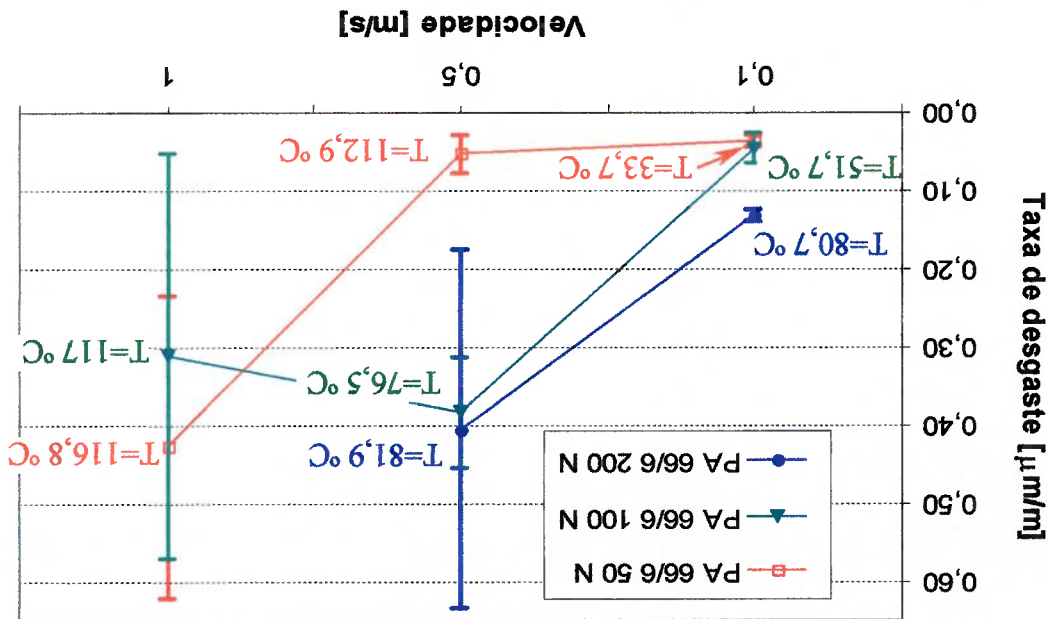
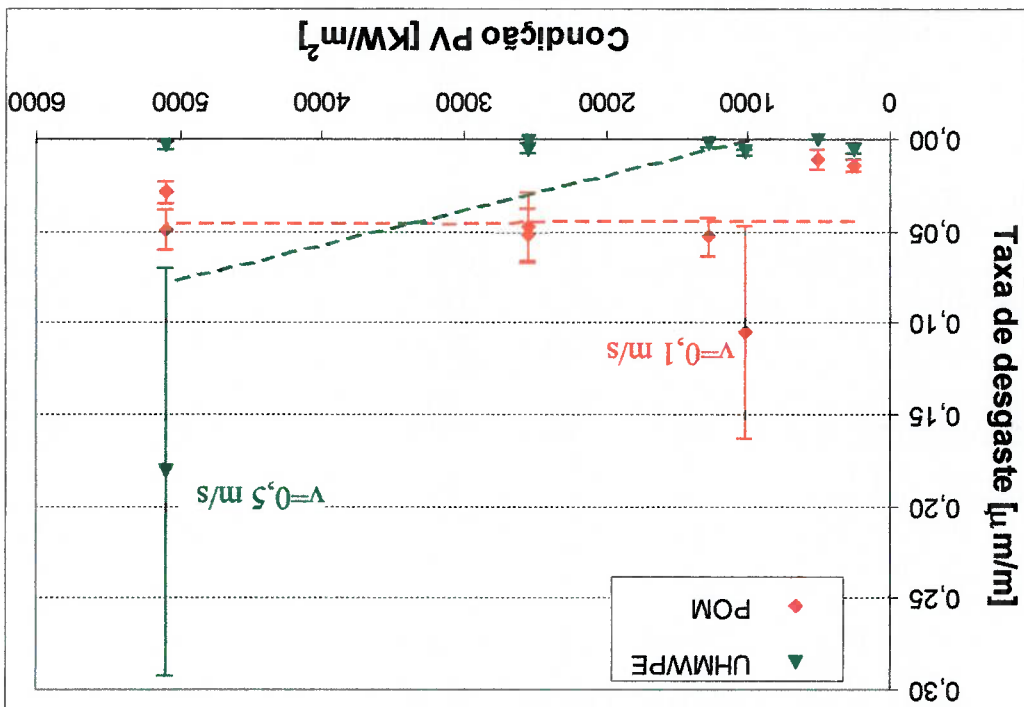
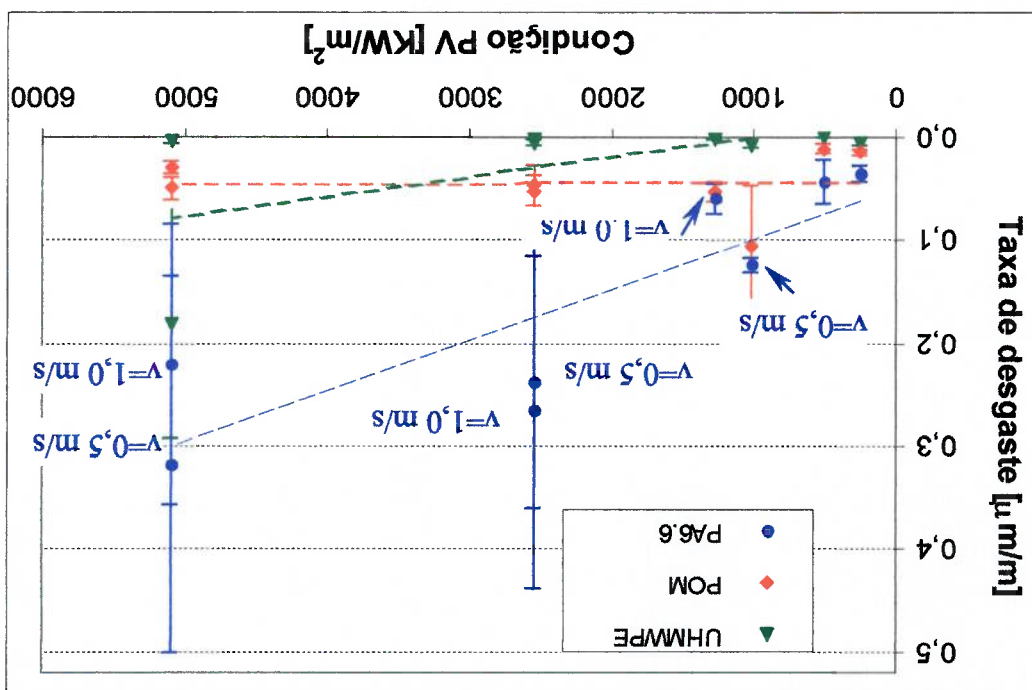


Figura 86. Resultados de taxa de desgaste em função da condição PV.

b). Resultados para o UHMWPE e o POM.



a). Resultados para os três materiais.



Os resultados mostrados na Figura 86 indicam que não há uma relação definida entre a condição PV e a taxa de desgaste.

No caso do UHMWPE e do POM, a condição PV pareceu não influenciar a taxa de desgaste. Só houve um resultado fora deste comportamento; para o UHMWPE a carga de 200 N e velocidade de 0,5 m/s produziram uma taxa de desgaste muito maior do que as outras. No entanto, este resultado foi o único deste tipo e não permite estabelecer um padrão de comportamento para estes dois materiais.

Os resultados do PA6.6 podem ser divididos em dois grupos: para condições PV até 1300 KW/m² as taxas de desgaste são da ordem de 0,05 µm/m; no outro grupo encontram-se os resultados obtidos para as condições PV superiores a 2000 KW/m² com valores na da ordem de 0,4 µm/m. Em ambos os grupos as taxas de desgaste parecem independem da condição PV, mas a grande dispersão dos resultados não permite extrair uma conclusão definitiva a este respeito.

5.2.4.4 Efeito da temperatura na taxa de desgaste

Na Figura 87 é mostrada a taxa de desgaste em função da temperatura atingida na região próxima à superfície de contato para os três materiais termoplásticos testados, visando determinar o efeito da temperatura na resistência ao desgaste para estes materiais.

Na Figura 88 é mostrado o resultado de um ensaio onde houve fusão do pino.

Em alguns ensaios com PA6.6 observou-se fusão do material polimérico na região próxima à superfície de contato. A seguir são apresentados esses ensaios, com o intuito de analisar a relação entre a taxa de desgaste, o coeficiente de atrito e a fusão que foi observada.

5.2.5 Ensaios pino-contra-disco com fusão do PA6.6.

É observado como a temperatura atingida na região de contato não apresenta uma relação direta com a taxa de desgaste.

Figura 87. Resultados de taxa de desgaste em função da temperatura atingida na região próxima à superfície de contato.

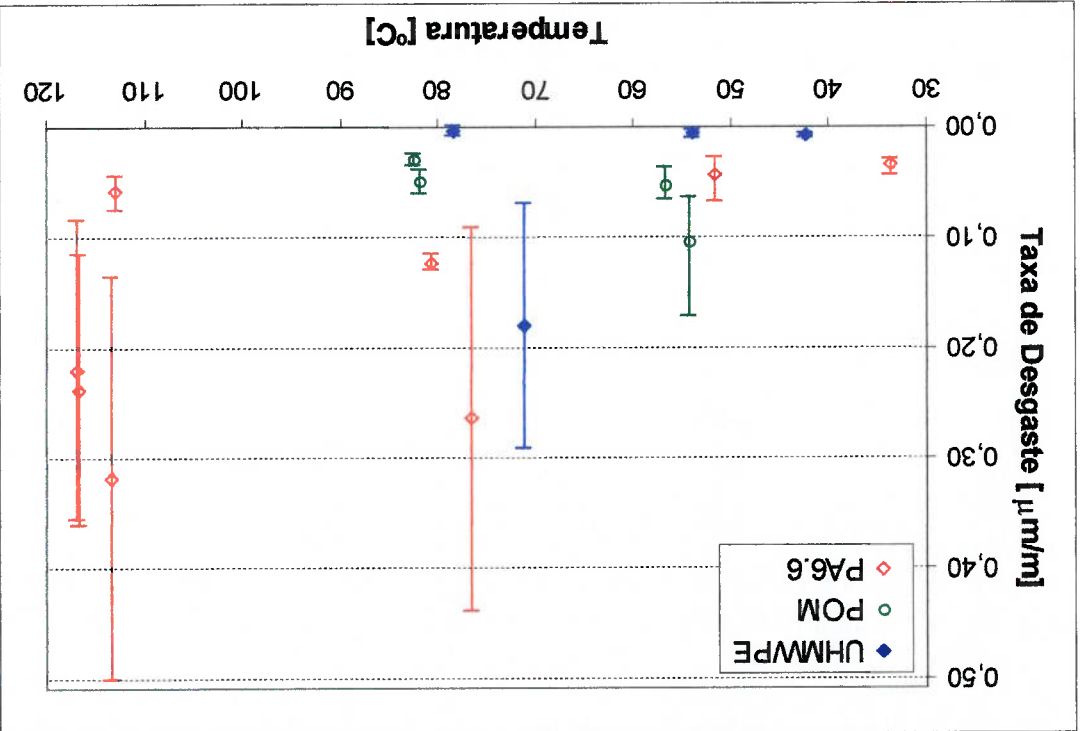
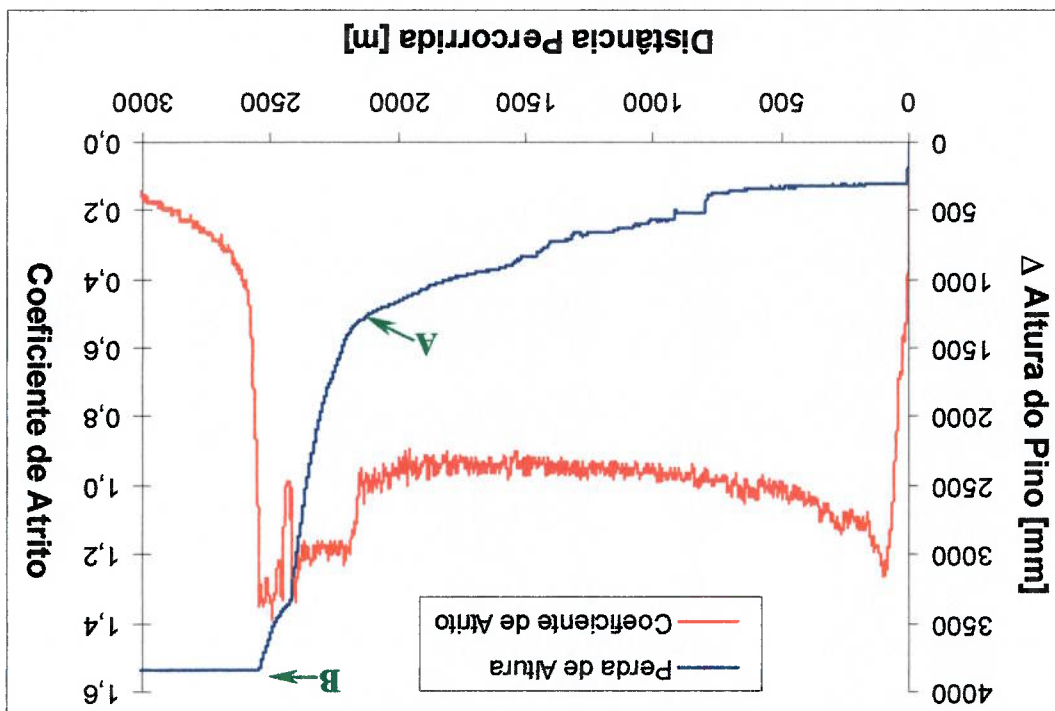
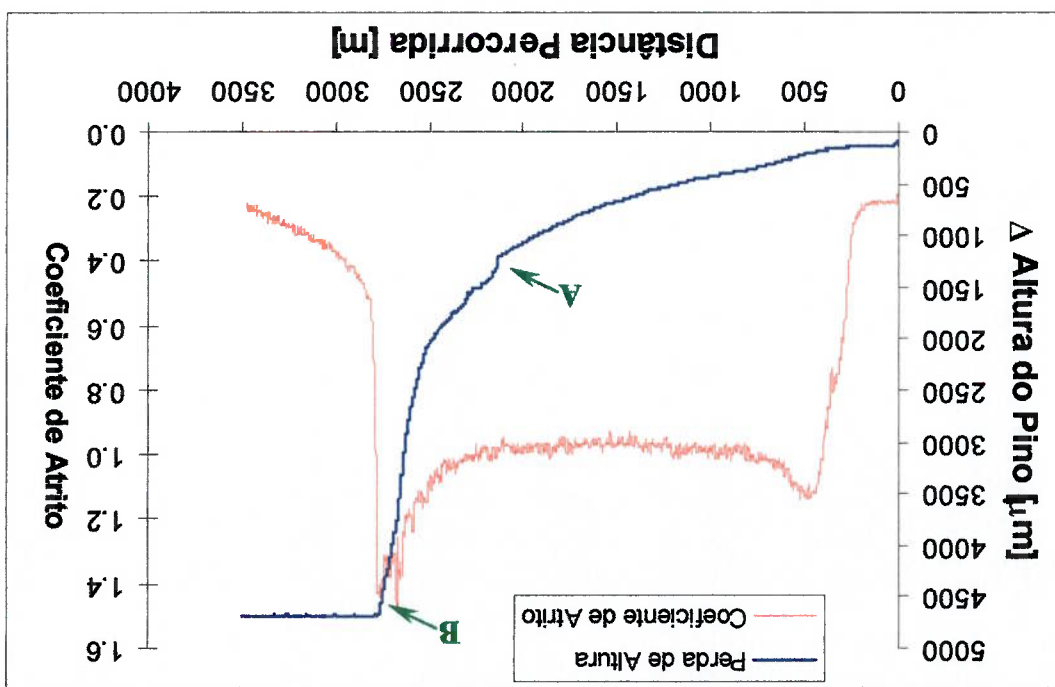


Figura 88. Ensaios com fusão do PA6.6. Carga: 50 N. Velocidade: 1,0 m/s.

b) Repetição 2



a) Repetição 1



Na Figura 88 observa-se como os tribossistemas apresentaram uma taxa de desgaste aproximadamente constante até o ponto A, até o qual os coeficientes de atrito atingiram patamares onde o valor era estável, por volta de 1,0. Após esse ponto, a taxa de desgaste do material e o coeficiente de atrito começaram a aumentar, até degradar no ponto indicado com a letra B.

Em ambos os ensaios da Figura 88, o coeficiente de atrito atingiu valores um pouco superiores aos apresentados nos ensaios onde não houve fusão (Tabela 25), os quais que estiveram entre 0,879 e 0,995. Também é observado como os valores de máximos de coeficiente de atrito estiveram próximos de 1,4. Estes altos valores de coeficiente de atrito sugerem um alto grau de aquecimento, lembrando que a temperatura medida com termopar na região próxima à superfície de contato para 50 N e 1,0 m/s foi 117 °C, e a temperatura no contato estimada foi 130 °C, acima da temperatura máxima de uso recomendada pelo fabricante de 130 °C (vide Tabela 3).

Na Figura 89 são mostrados dois ensaios onde houve fusão do pino, já com carga de 200 N e 0,5 m/s.

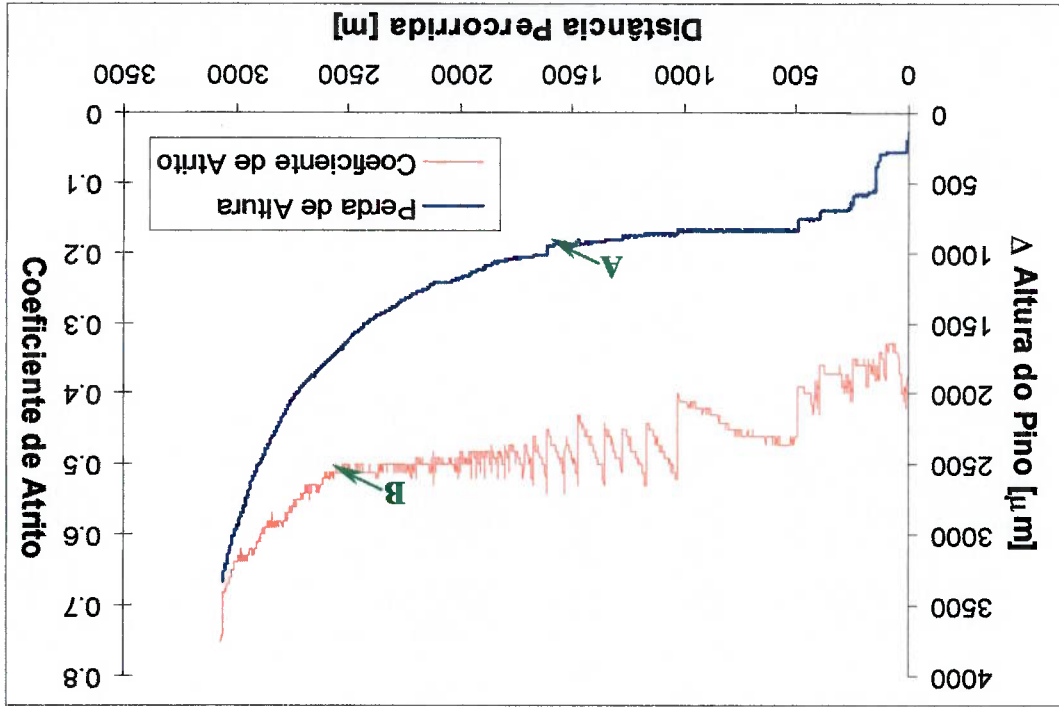
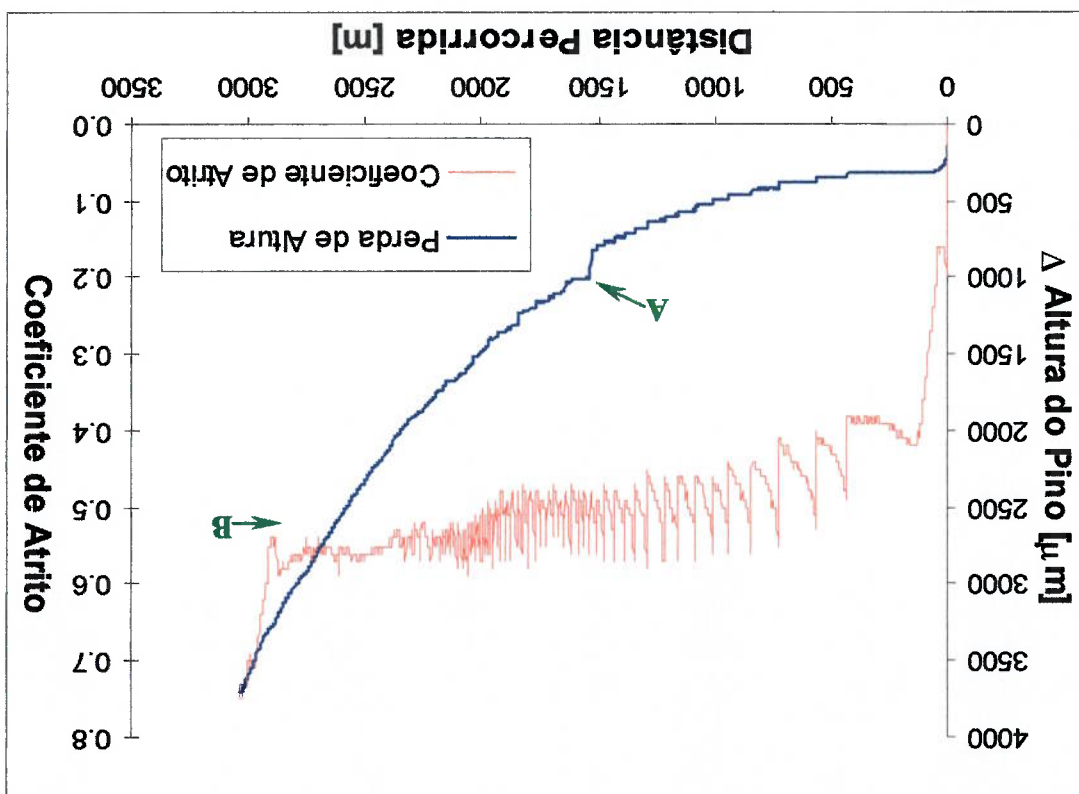


Figura 89. Ensaios com fusão do PA6.6. Carga: 200 N. Velocidade: 0,5 m/s.
a) Repetição 1

Na Figura 89 é observado como há um ponto, indicado com a letra A, onde começa a aumentar a taxa de desgaste, que diferentemente dos ensaios com carga de 50 N e 1,0 m/s não é acompanhado por um aumento no coeficiente de atrito. O aumento no coeficiente de atrito começa depois, nos pontos indicados com as letras B. Em ambos os ensaios, o coeficiente de atrito em média era de 0,5 antes de chegar nos pontos B, e depois aumentou para um valor de aproximadamente 0,75. Em ambos os testes o equipamento pino-contra-disco foi desligado, porque foi observado que os pinos tinham degradado antes que os ensaios tivessem terminado, fato que não aconteceu com os ensaios com 50 N e 0,5 m/s.

Figura 89 (Continuação). Ensaios com fusão do PA6.6. Carga: 200 N. Velocidade: 0,5 m/s.
b) Repetição 2



5.2.6 Perda de massa

Na Figura 90 é mostrada a perda de massa dos pinos para cada condição de

ensaio.

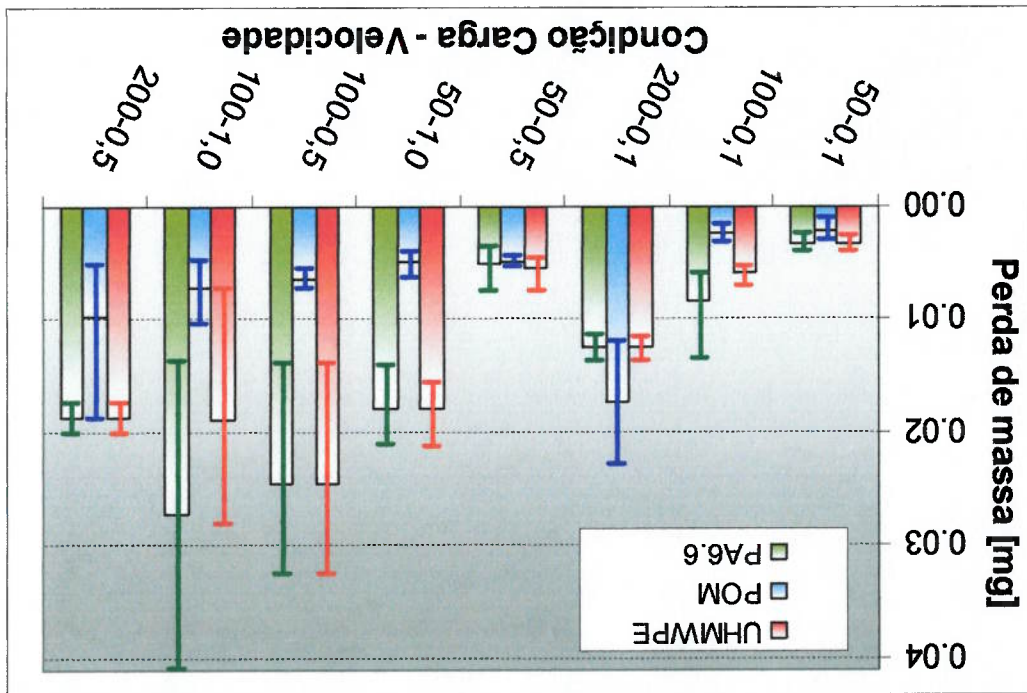


Figura 90. Perda de massa para os ensaios pino-contra-disco realizados.

Comparando os resultados da Figura 90 com as taxas de desgaste (Figura 79) é observado como a diferença entre os resultados do UHMWPE e do POM diminuiu, e que não há uma diferença marcada entre os resultados do POM e do PA6.6, para o ensaio com 50 N e 1,0 m/s e para os ensaios com cargas de 100 e 200 N.

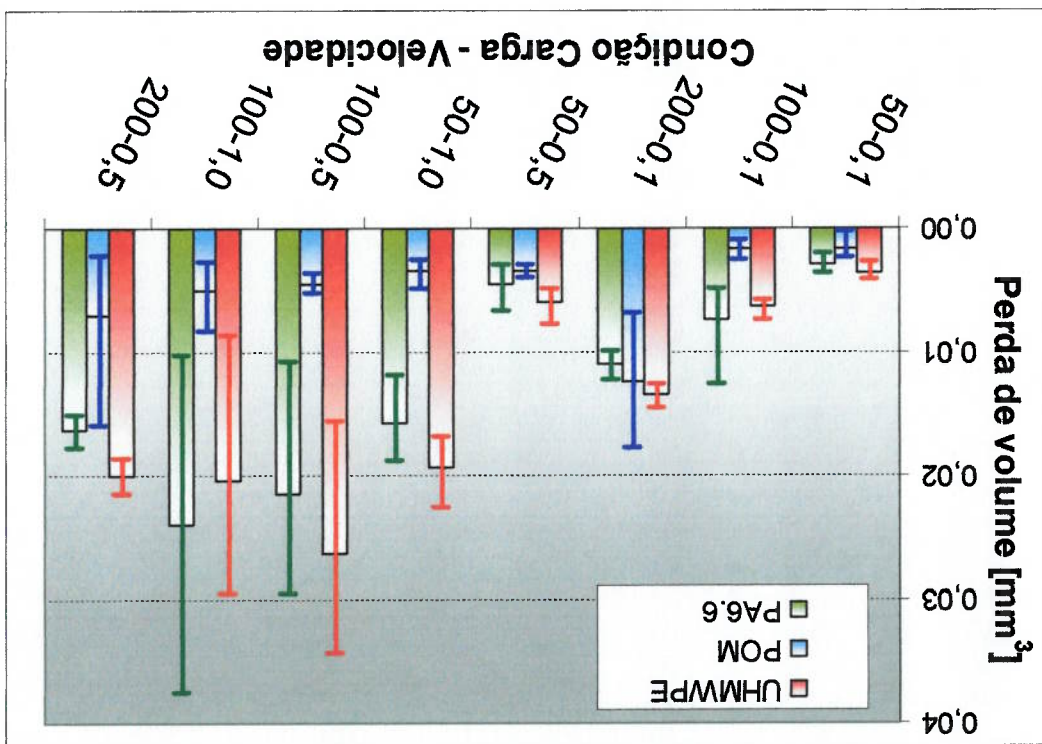
Assumindo a densidade dos materiais como sendo constante, a perda de volume foi calculada, sendo mostrada na Figura 91.

A seguir serão apresentadas algumas informações obtidas com a visualização das superfícies de desgaste dos pinos poliméricos de cada um dos 8 tribossistemas, apresentando-se as fotomicrografias mais representativas. Como explicado na Seção 4.5.2, as superfícies desgastadas dos pinos foram analisadas usando MO (Microscopia Óptica) e MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura).

5.2.7 Imagens das superfícies dos pinos

Na Figura 91 é observado como em todas as condições a perda volumétrica do UHMWPE foi superior à perda volumétrica do POM, resultado totalmente oposto ao encontrado com as taxas de desgaste. Também é mostrado como, em algumas condições, a perda de volume do UHMWPE foi superior à perda de volume do PA6.6, mas também deve ser considerado que o desvio padrão dos dados é grande em algumas condições de ensaio, dificultando uma discussão com base nestes resultados.

Figura 91. Perda de volume para os ensaios pino-contra-disco realizados.



5.2.7.1 UHMWPE

5.2.7.1.1 Microscopia Óptica

Nas Figuras 92, 93 e 94 são mostradas as imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas de pinos de UHMWPE para cada condição de ensaio.

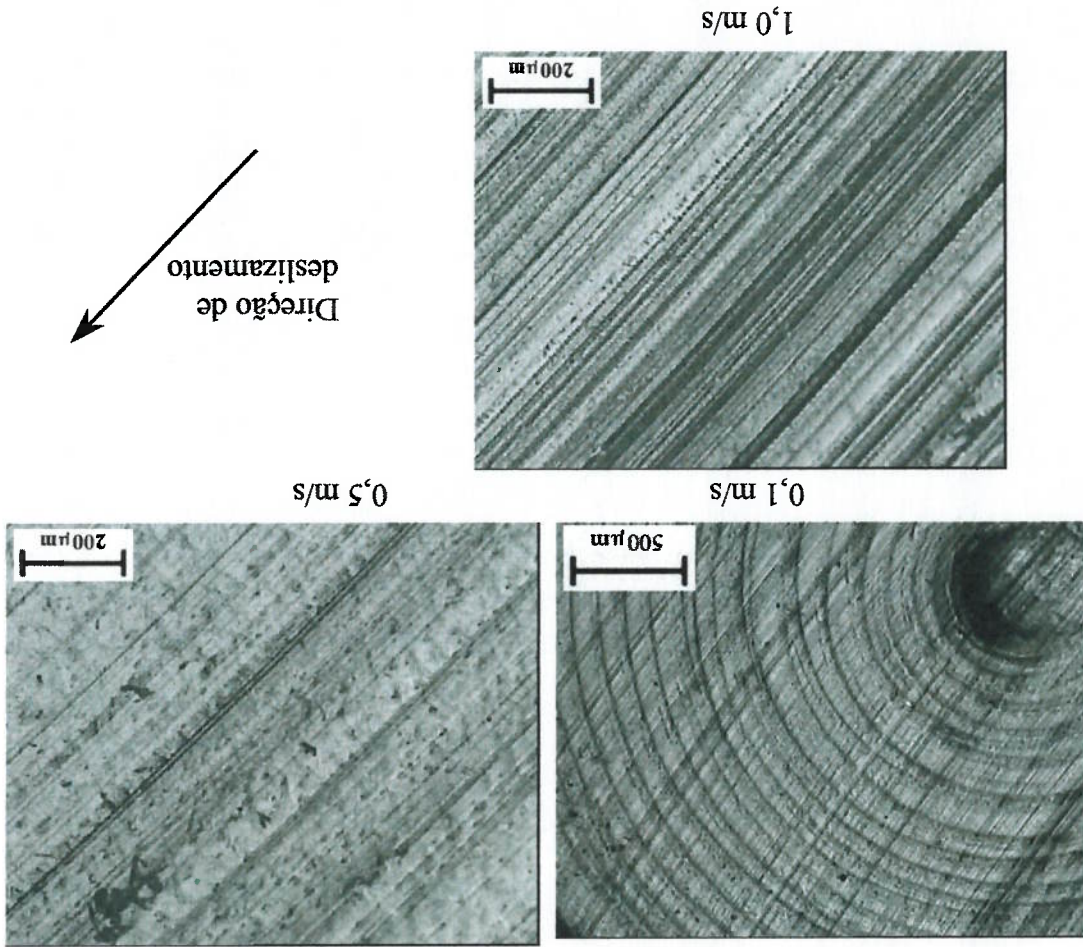


Figura 92. Imagens usando MO de pinos de UHMWPE. Carga: 50 N.

Na Figura 92, pode-se observar que na velocidade de 0,1 m/s aparecem marcas circulares concêntricas, produto do processo de usinagem dos pinos, anterior aos ensaios de desgaste. Já para as outras velocidades estas marcas não foram observadas.

O efeito do aumento da velocidade foi um aumento dos sulcos presentes na superfície, sendo estes mais evidentes e definidos para a velocidade de 1,0 m/s. Estes sulcos serão melhor observados com ajuda da MEV.

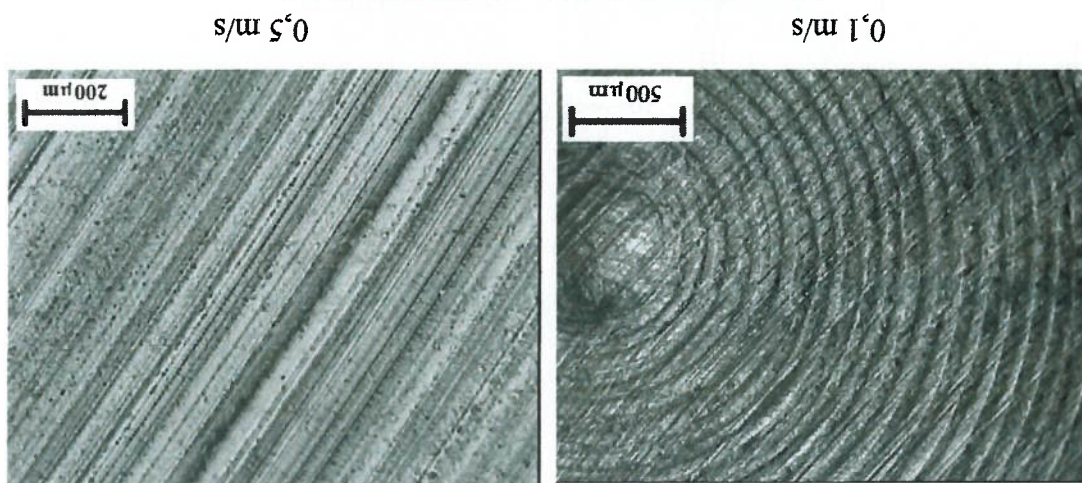


Figura 93. Imagens usando MO do pino de UHMWPE. Carga: 100 N.

Aparentemente não há uma diferença sensível entre a imagem para os ensaios com carga de 50 N e 1,0 m/s (Figura 92) e a imagem para o ensaio com carga de 100 N e 0,5 m/s (Figura 93), sugerindo uma dependência da morfologia das superfícies com a condição PV. Também é observado como, para a carga de 100 N, a superfície para a velocidade de 1,0 m/s parece ter menos sulcos do que para 0,5 m/s.

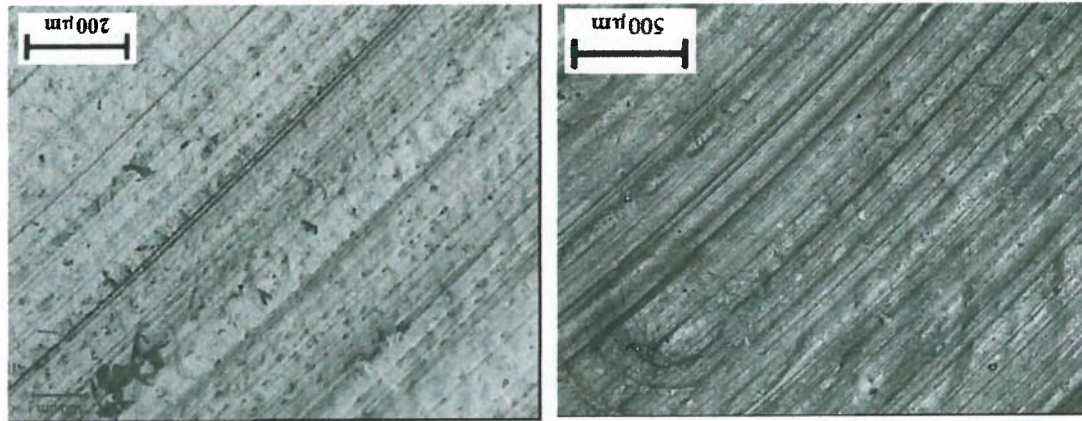


Figura 94. Imagens usando MO do pino de UHMWPE. Carga: 200 N.

A carga de 200 N (Figura 94) parece ter diminuído a visibilidade das marcas de usinagem para a velocidade de 0,1 m/s, o que é observado quando se compara a Figura 94 com as Figuras 92 e 93 nas mesmas condições de velocidade de deslizamento. A morfologia presente com velocidade de 0,5 m/s não parece ser muito diferente da observada na Figura 93 com carga de 100 N e 1,0 m/s de velocidade de deslizamento.

5.2.7.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Nas Figuras 95 a 97 são mostradas as imagens obtidas para as superfícies desgastadas dos pinos de UHMWPE.

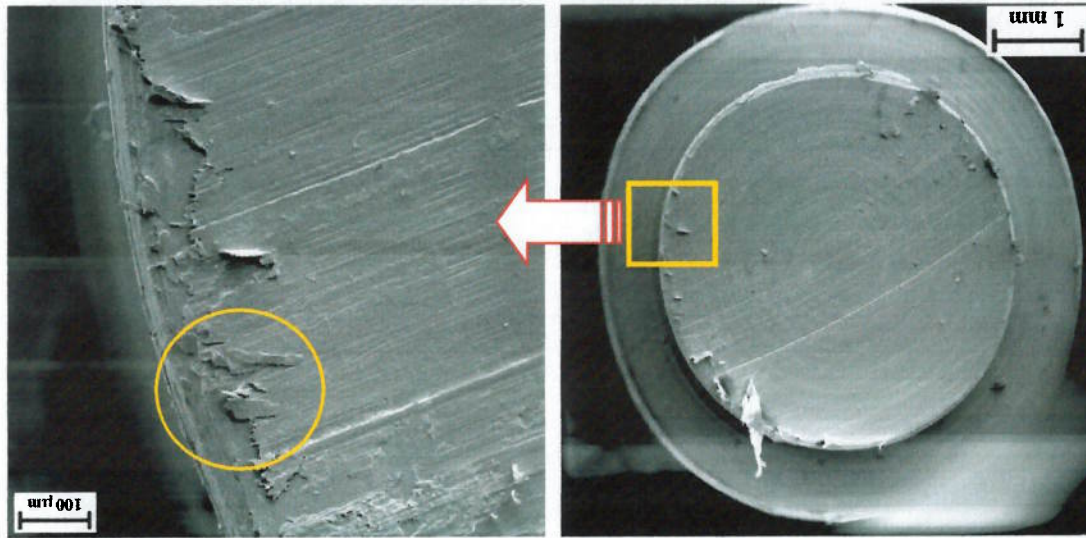


Figura 95. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s.

Novamente são observadas as marcas circulares, mas menos nítidas que nas imagens obtidas por MO. Na região indicada com o círculo é observado como o material parece formar camadas e também pode-se notar que os sulcos gerados pelo deslizamento encontram-se na camada mais superficial, e não aparecem na região sobre a qual a camada é depositada. Na Figura 96 esta região é mostrada com mais detalhe.

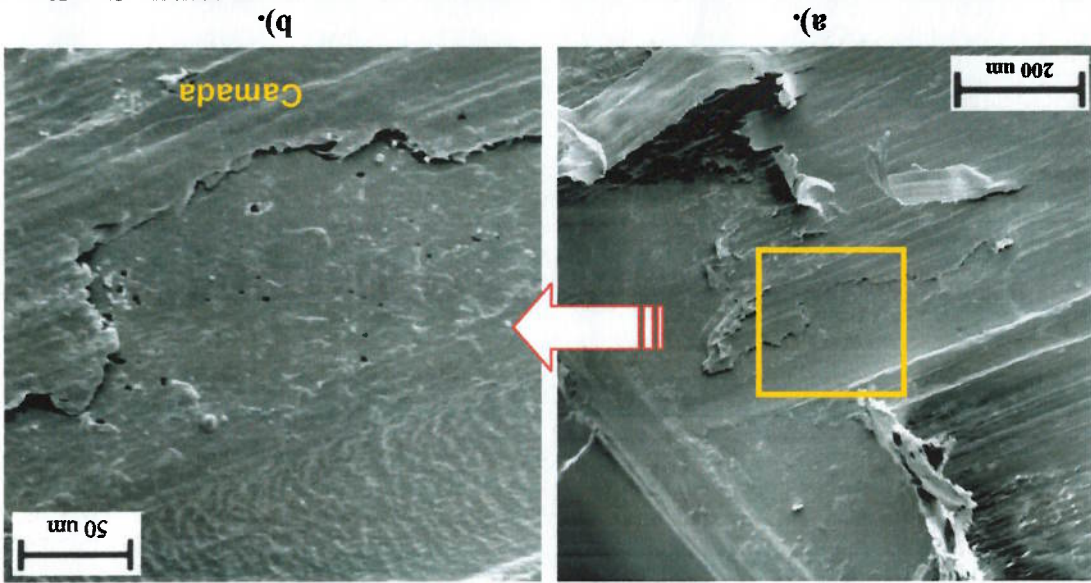


Figura 96. Formação de camadas na superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s. Imagens obtidas por MEV.

Na Figura 96a é observado como a camada de material formada pelo deslizamento é destacada. Na Figura 96b é mostrado como essa camada encontra-se sobre uma região de material com ondulações que são chamadas de ondas de Schallamach (ZHANG, 1998). Também é observado que os sulcos gerados pelo deslizamento são formados na superfície da camada.

Analisando com detalhe a borda de saída do contato foi observada a formação de camadas; o fato de serem observadas na borda faz pensar que a camada está presente em toda a superfície do pino. Aparelentemente, o processo de desgaste faz com que o material da região superficial do pino de UHMWPE seja esmagado e deformado na direção de deslizamento, formando camadas que formam a nova superfície de contato do pino com o contra-corpo. Posteriormente, o deslizamento

produz sulcamento, característica do mecanismo de desgaste abrasivo, na camada superficial. Considerando que as marcas circulares ainda são visíveis, essas camadas, em conjunto, devem ter uma espessura inferior de 1 μm , valor de rugosidade média inicial dos pinos (DA SILVA, 2001).

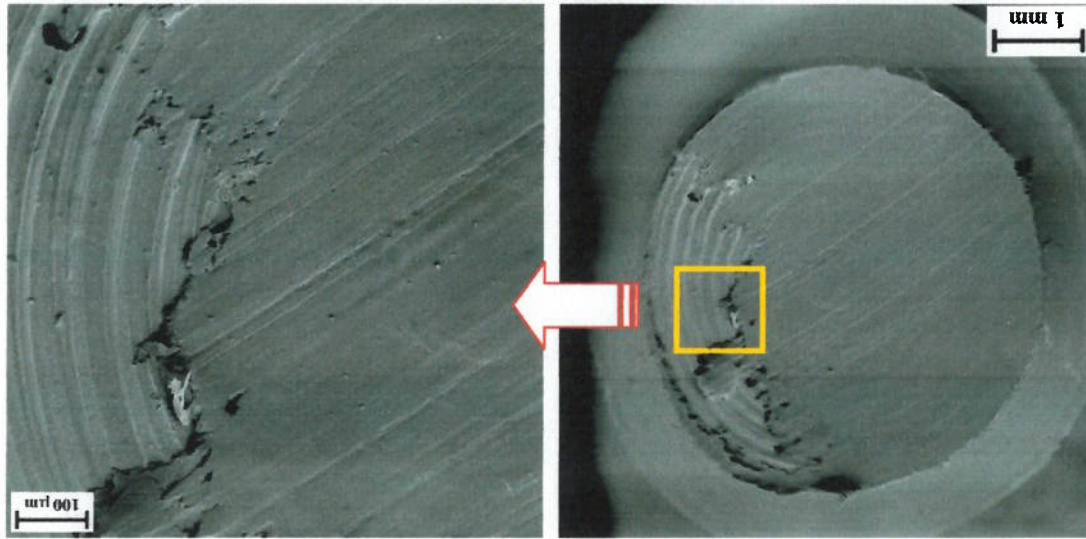
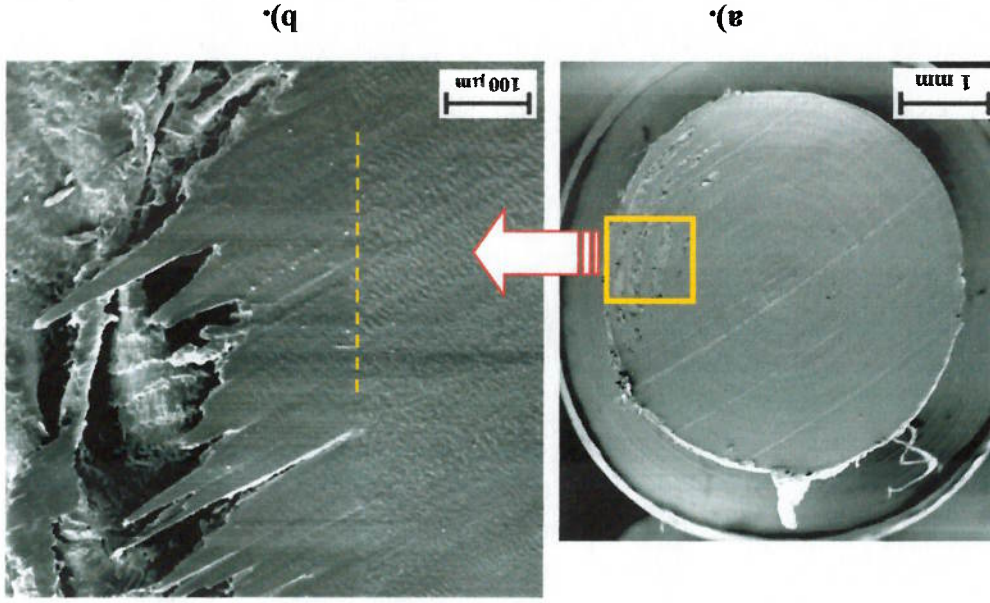


Figura 97. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 50 N e 1,0 m/s.

Na Figura 97 observa-se que no ensaio com 50 N e 1,0 m/s a área de contato do pino não foi circular, sugerindo que o pino tenha apresentado flexão na direção de deslizamento, gerada pela força de atrito. Este fato afeta o atrito e o desgaste, pela intensificação de esforços e a diminuição da área de transferência de calor. Mesmo assim, este aparente “inconveniente” é aproveitado para observar o processo de formação de uma camada na superfície. Neste pino aparecem novamente sulcos na direção de deslizamento na camada superficial. Os sulcos da Figura 97 parecem ser mais profundos que os observados na Figura 96, sugerindo que o aumento da velocidade fez com que, na área de contato, o processo de sulcamento tenha sido mais intenso.

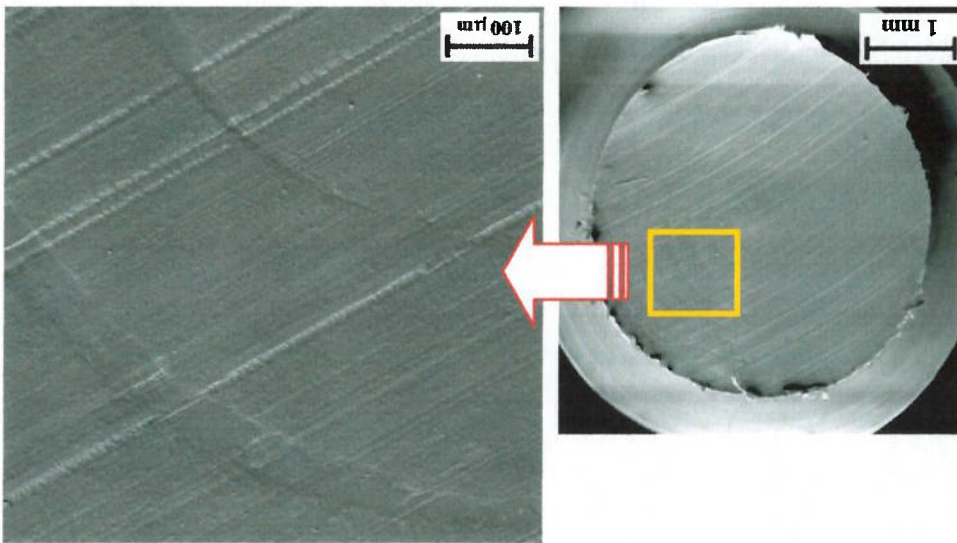
Na Figura 99 observa-se novamente que a área de contato não foi circular, e que ainda aparecem alguma marcas circulares concêntricas. A Figura 101b foi

Figura 99. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 100 N e 0,5 m/s.



Na Figura 98 é observado como os sulcos produzidos pelo deslizamento com 100 N e 0,1 m/s atravessam as marcas circulares da usinagem. Nas bordas não é evidente a formação das camadas, como as observadas nas Figuras 95 e 97.

Figura 98. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 100 N e 0,1 m/s.



mudada digitalmente, aumentado o contraste em 15%, para mostrar como na parte da esquerda há uma região com ondulações transversais à direção de deslizamento, ondas que não apareceram nas condições PV anteriores.

Na parte central da Figura 101b nota-se que há material que está sobreposto aos sulcos gerados pela usinagem. As ondas que aparecem não se formam no material destacado e sim na região que parece ter um material de suporte embaixo dele.

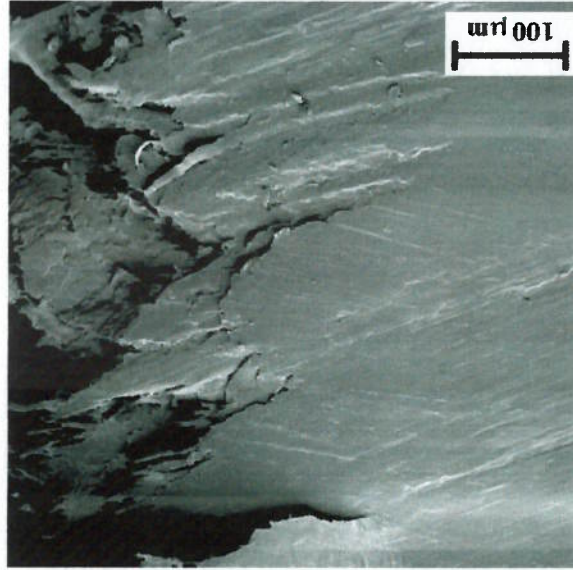
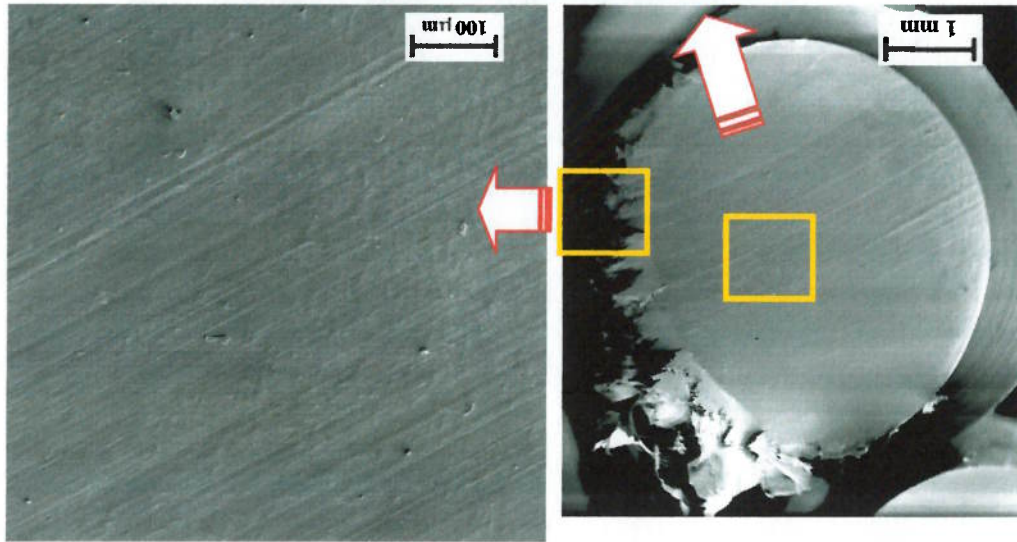


Figura 100. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de UHMWPE. Condições de ensaio: 200 N e 0,5 m/s.

Na Figura 100 o pino após o ensaio com 200 N e 0,5 m/s apresenta sulcos na direção de deslizamento e ondas na área de contato. A área de contato não foi circular, sugerindo novamente uma possível flexão do pino. Também é observado que na borda de saída do contato há evidências da formação de camadas.

Observando a superfície dos pinos de UHMWPE tanto por MO como por MEV, pode-se dizer que:

- No contato entre o UHMWPE e o disco de aço inoxidável nitrogenado formam-se camadas pela deformação do material polimérico na região de contato.
- As camadas depositadas apresentam riscos de abrasão e formação de ondas;
- Aparentemente o filme não se forma pelo preenchimento total dos sulcos de usinagem com partículas de desgaste. O material adere no cume da marca de usinagem e depois é esmagado sobre os sulcos; formando um filme com espessura de alguns poucos micrometros;
- Para ensaios com condições PV mais elevadas é mais evidente a formação de ondas.

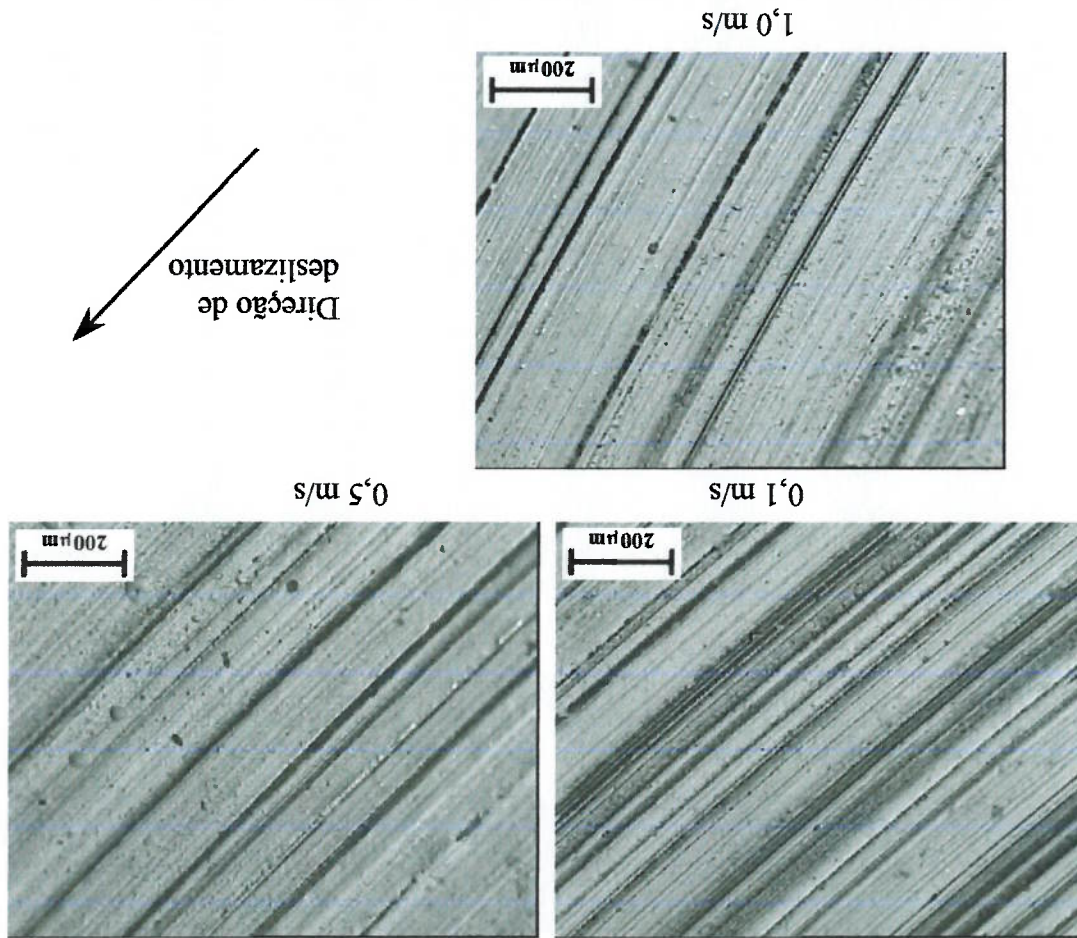
5.2.7.2 POM

5.2.7.2.1 Microscopia Óptica

Nas Figuras 101, 102 e 103 são mostradas as imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos pinos de POM, para cada condição de ensaio.

Em todas as imagens são observados sulcos na direção de deslizamento. Alguns sulcos apresentam uma coloração mais escura que os outros. Um outro aspecto interessante é que a velocidade parece diminuir a quantidade de riscos escuros. Estes sulcos serão melhor analisados com ajuda da MEV.

Figura 101. Imagens usando MO de pinos de POM. Carga: 50 N.

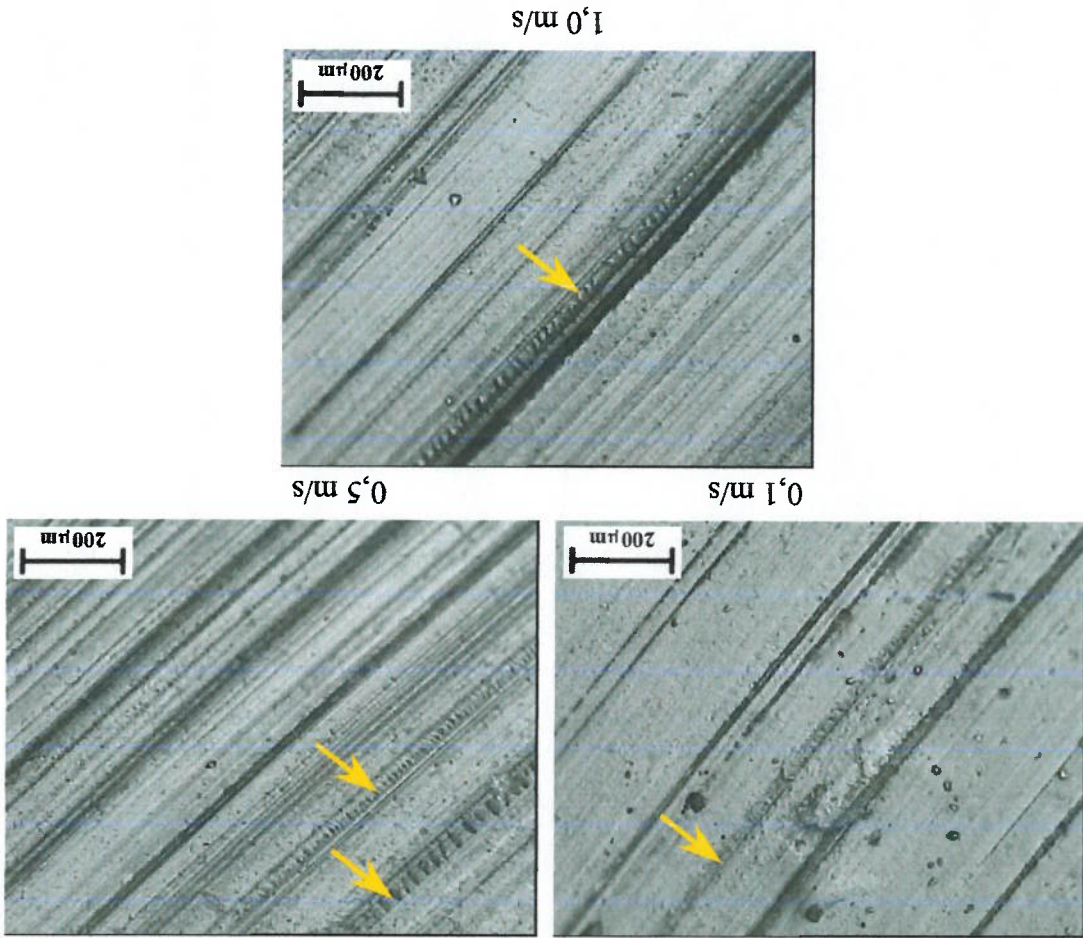


Na Figura 102 a quantidade e distribuição dos sulcos nas outras velocidades de deslizamento (0,5 e 1,0 m/s) não são muito diferentes das encontradas para carga de 50 N nessas mesmas velocidades.

No interior dos sulcos assinalados com setas, encontram-se ondas, que serão observadas com maior detalhe com ajuda da MBV.

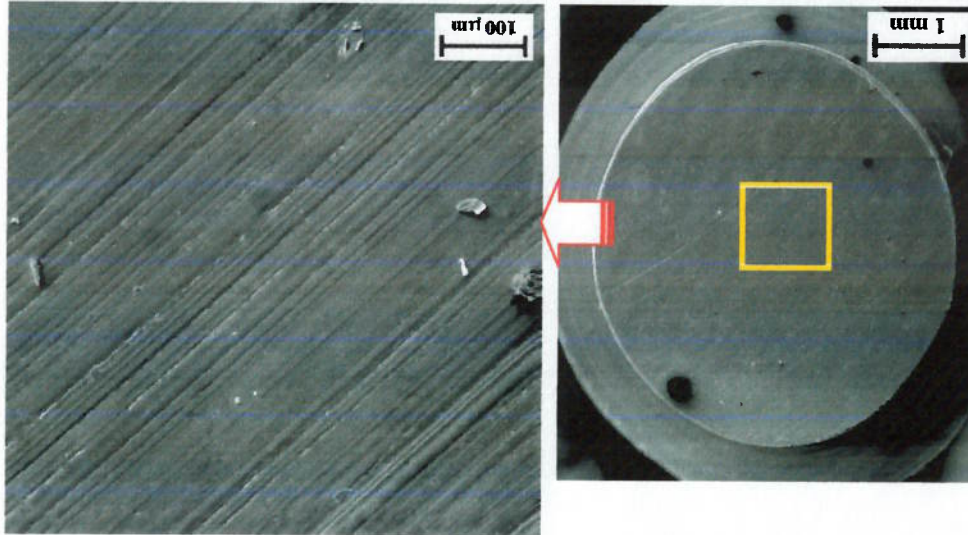
Na Figura 102, que apresenta resultados para cargas de 100 N, observa-se que para 0,1 m/s de velocidade de deslizamento é menor quantidade de sulcos na direção de deslizamento, mas alguns deles são bem definidos pela coloração escura e a largura.

Figura 102. Imagens usando MO de pinos de POM. Carga: 100 N.



Na Figura 104, para o ensaio com 50 N e 0,1 m/s, são observados sulcos na superfície do pino, sem formação de ondas. Uma outra característica foi que a borda do pino está bem definida, diferentemente do encontrado nos pinos de UHMWPE.

Figura 104. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de POM, nas condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s.

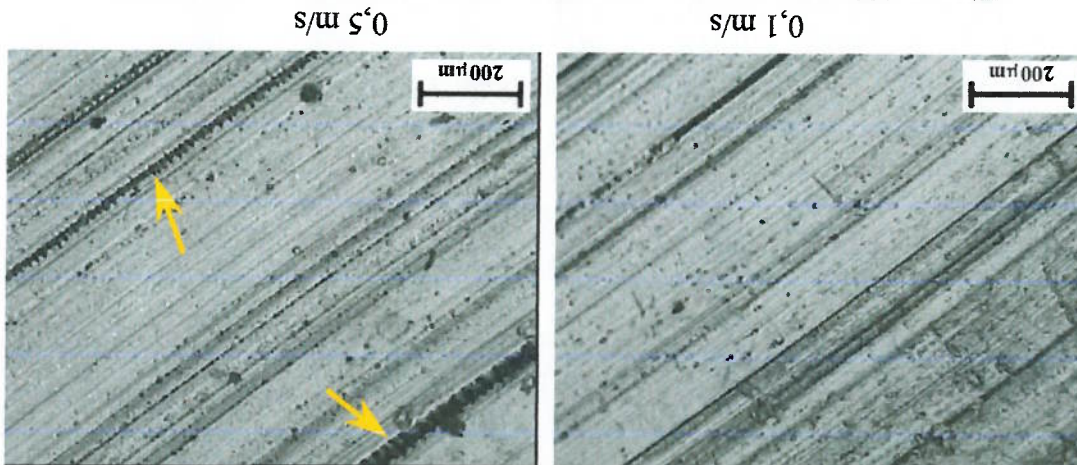


5.2.7.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Das imagens obtidas por MO pode-se dizer que o mecanismo de desgaste predominante parece ser a abrasão, particularmente o microsulcamento, com a formação de ondas nos vales de alguns sulcos nas maiores condições PV.

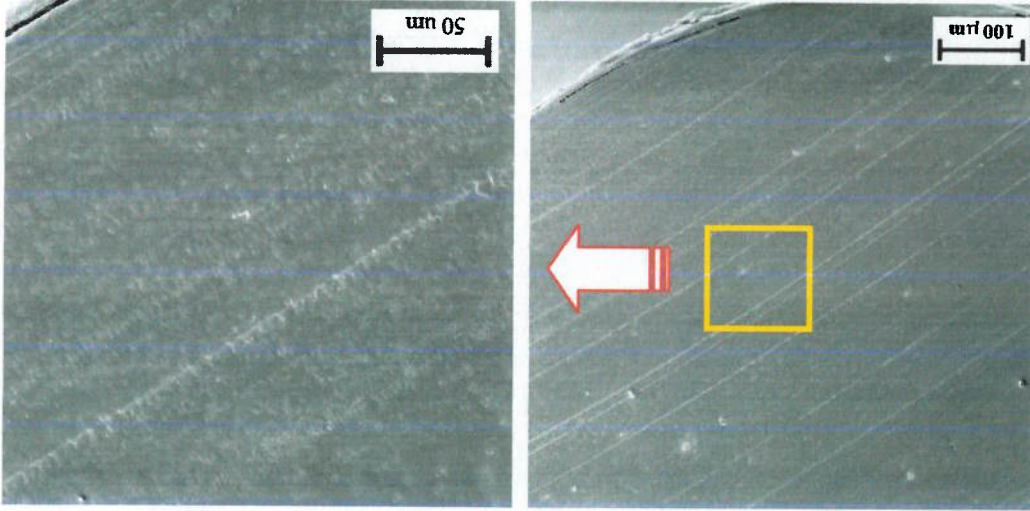
Na Figura 103, referente aos ensaios com carga de 200 N, encontrou-se a mesma morfologia que a gerada nos ensaios com carga de 100 N. As setas indicam os sulcos que apresentaram ondas no seu interior.

Figura 103. Imagens usando MO de pinos de POM. Carga: 200 N.



Na Figura 106, referente à condição 50 N e 1,0 m/s, são encontrados sulcos na direção de deslizamento e, observando-se esta região com maiores aumentos, perceberam-se ondas.

Figura 106. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. 50 N; 1,0 m/s.



Na Figura 105, associada à condição de 50 N e 0,5 m/s, os sulcos já não são tão evidentes como na Figura 104 e nas imagens dos pinos de UHMWPE. Observa-se material polimérico aderido na superfície, indicado com uma elipse pela morfologia, este material aderido deve ser um *debris* que ficou entre as superfícies de contato e aderiu-se ao pino no deslizamento. Nota-se ainda, que o material está cobrindo uma parte de um sulco, indicando que possivelmente aderiu-se ao pino depois da formação do sulco.

Figura 105. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. 50 N; 0,5 m/s.

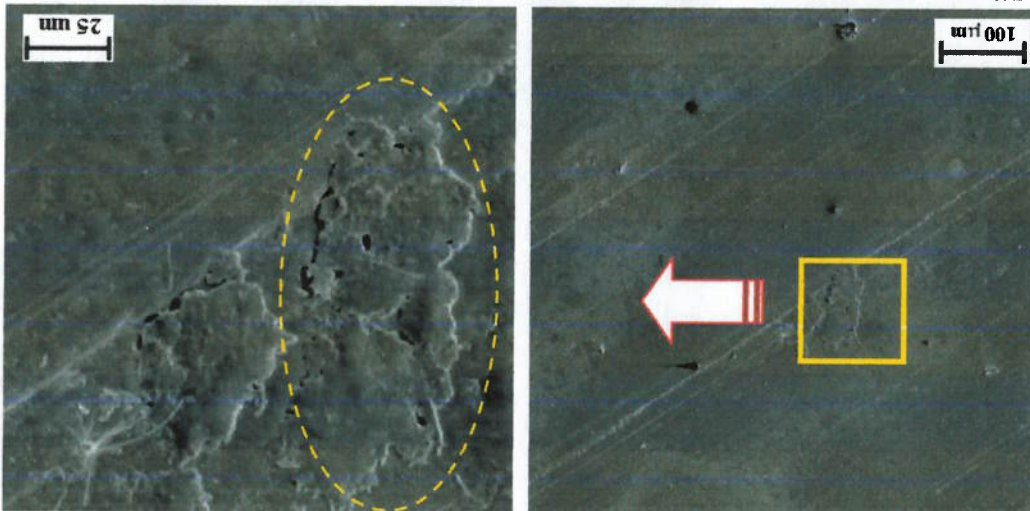
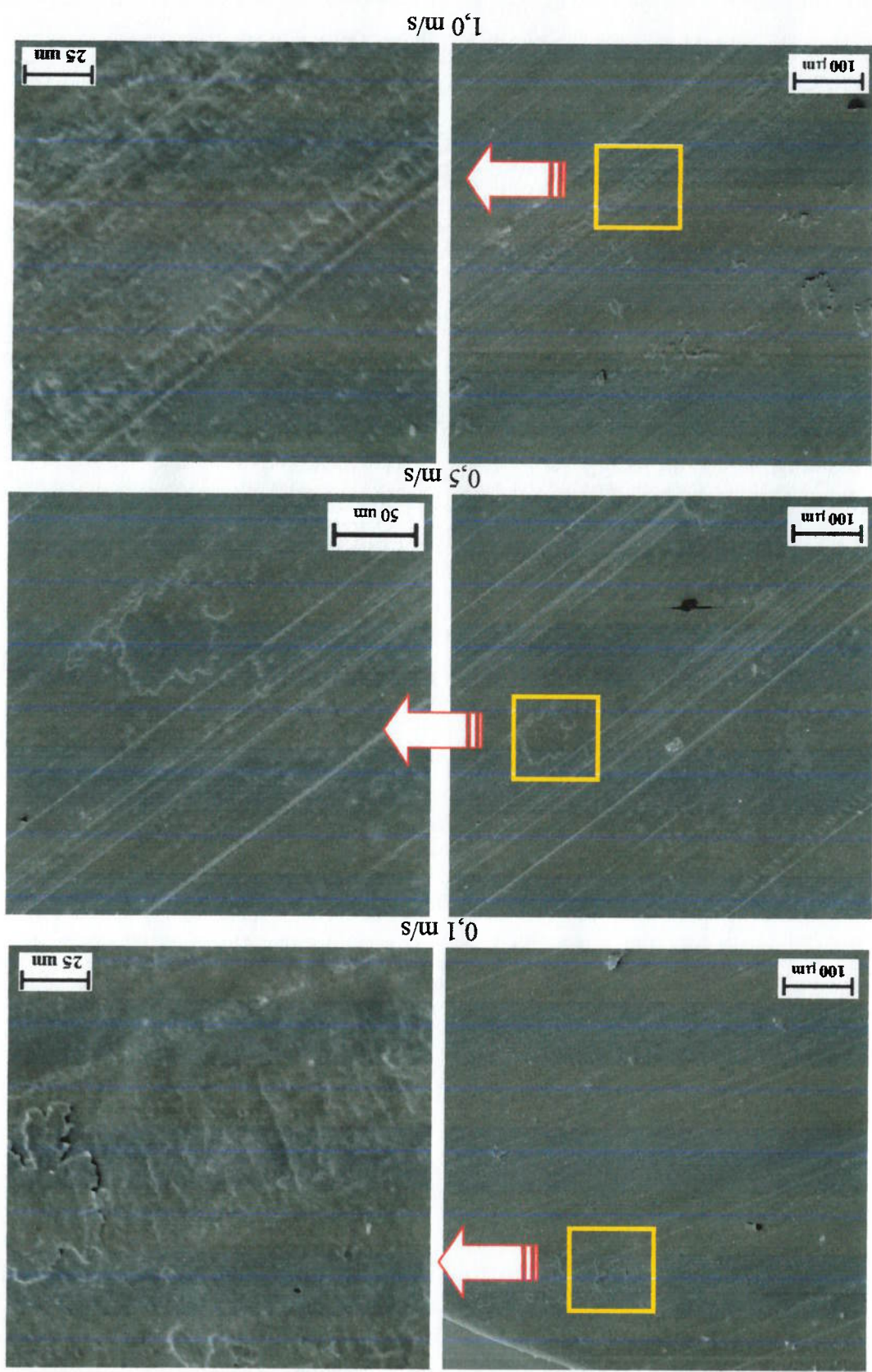


Figura 107. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. Carga: 100 N.



Com carga de 100 N (Figura 107) são encontrados sulcos na direção de deslizamento com formação de ondas nos vales de alguns deles. Observaram-se também pedaços isolados de material polimérico depositado nas superfícies, que parecem ter se aderido ao pino após o processo de sulcamento.

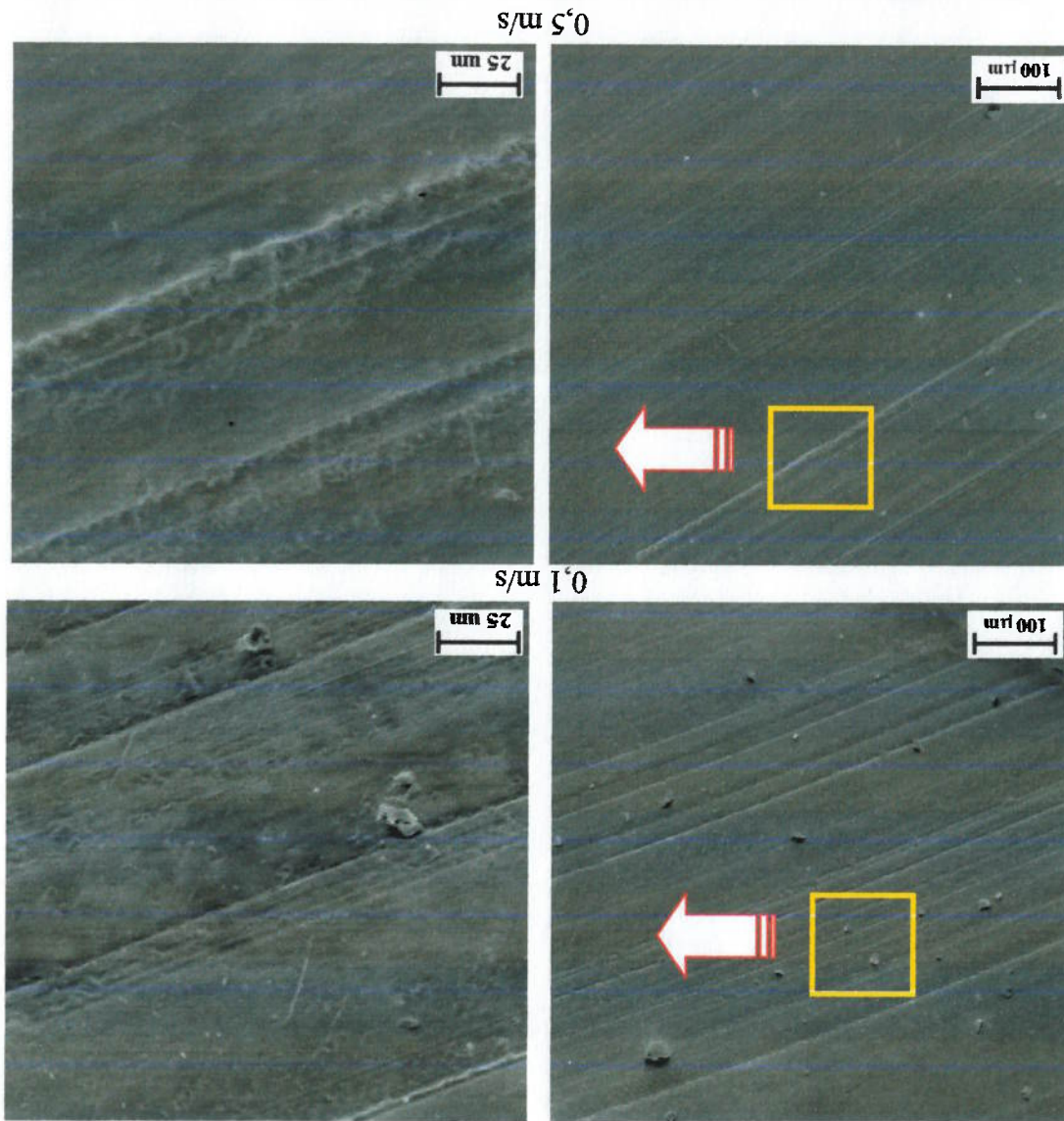


Figura 108. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. Carga: 200 N.

Para cargas de 200 N (Figura 108), nos resultados com velocidade de 0,1 m/s não é observada a formação de ondas nos sulcos, fenômeno que foi observado para a velocidade de 0,5 m/s.

Com ajuda das imagens da superfície dos pinos de POM, pode-se dizer que:

- Observaram-se riscos de abrasão, mais definidos e aparentemente em maior quantidade do que nos pinos de UHMWPE;
- Diferente do UHMWPE, na superfície do POM não há marcas de usinagem em nenhuma das condições;
- Pode-se ver em algumas condições a formação de ondas no fundo dos vales dos sulcos, porém não se percebe o mecanismo de formação de ondas em grandes regiões da superfície do pino;
- Encontraram-se partículas de desgaste aderidas ao pino (formato heterogêneo, disforme, com grandes flocos amassados). Esse material aderido cobriu os sulcos em algumas condições, indicando que sua adesão ao pino aconteceu após o processo de microsulcamento na região onde apareceram;
- Diferentemente do fenômeno observado em alguns pinos de UHMWPE, que tiveram uma área de contato não circular, talvez pelo efeito da flexão, as superfícies de contato dos pinos de POM aparentemente permanecem sendo circulares

5.2.7.3 PA6.6

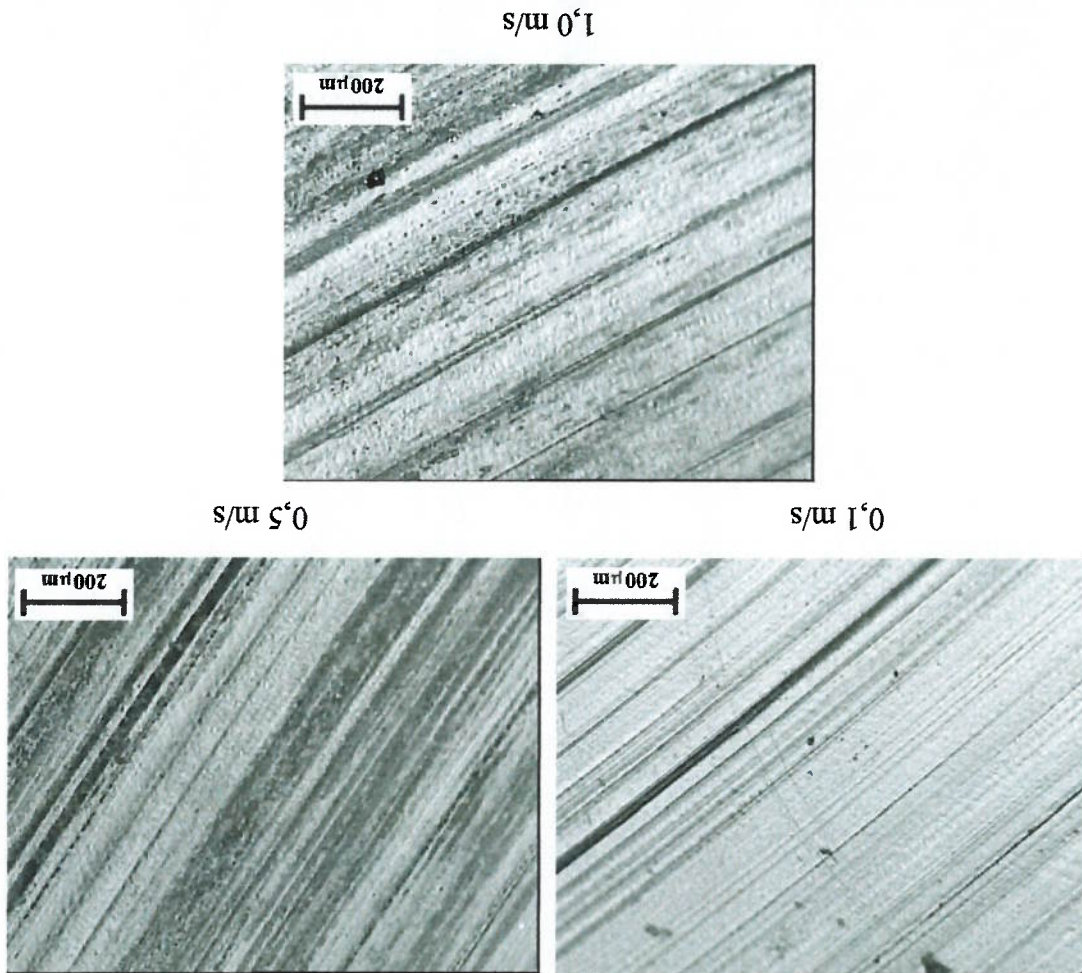
5.2.7.3.1 Microscopia Óptica

Nas Figuras 109, 110 e 111 são mostradas as imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos pinos de PA6.6, para cada condição de ensaio.

Para esta condição de carga não foram encontradas ondas nas superfícies dos pinos.

Na Figura 109 as superfícies dos pinos indicam a formação de sulcos na direção de deslizamento. Comparando estas imagens com as obtidas para o POM, observa-se que no POM o sulcamento foi mais intenso, traduzido em uma maior quantidade de sulcos observados. Uma outra característica é a presença de sulcos mais escuros nas maiores velocidades (0,5 e 1,0 m/s).

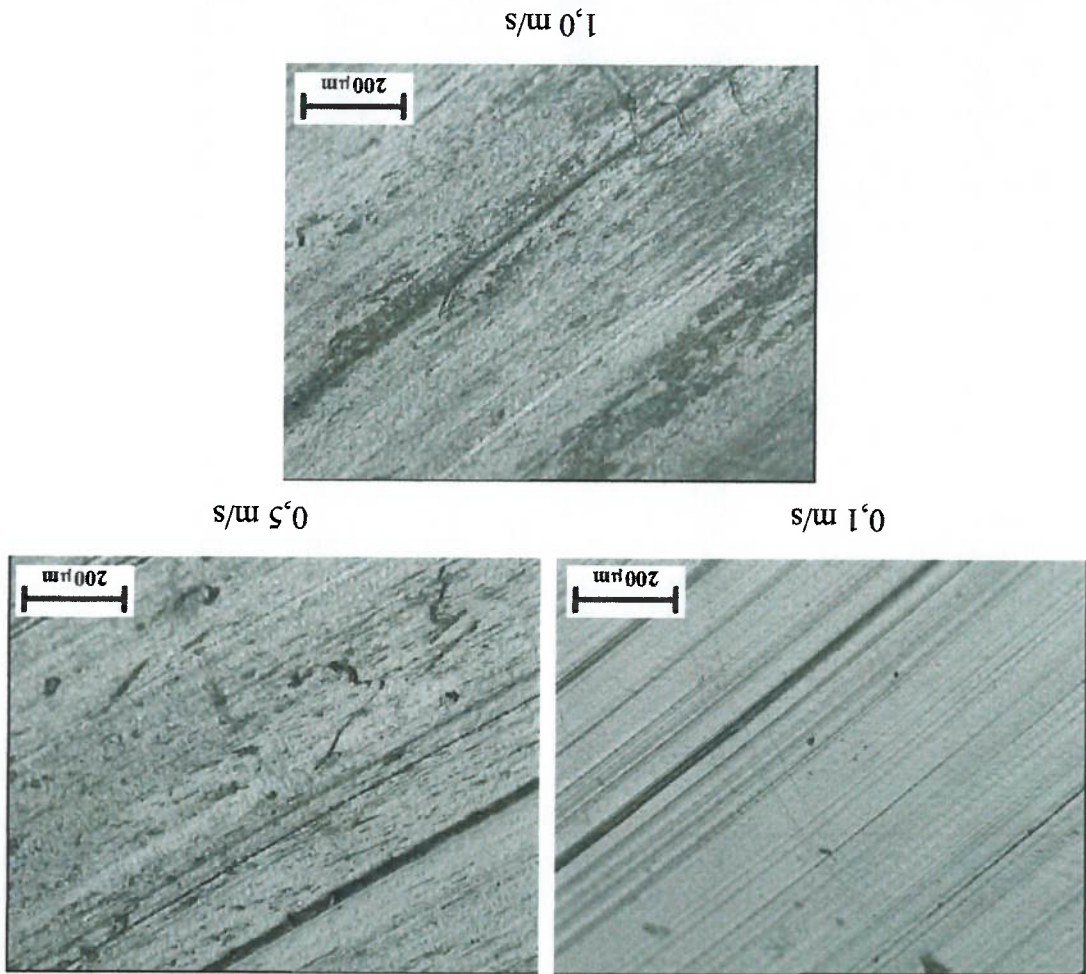
Figura 109. Imagens usando MO do pino de PA6.6. Carga: 50 N.



Ainda na Figura 110 as superfícies apresentam maior deformação plástica quando comparadas às dos pinos dos outros dois materiais, talvez devido ao fato de PA6.6 atingir temperaturas mais elevadas no contato. A perda de material pode estar associada ao fato do material amolecer com as temperaturas atingidas (na faixa dos 90-120 °C para 0,5 e 1,0 m/s), diminuindo a facilidade para o microcorte e possibilitando uma maior deformação plástica pelo aumento na viscosidade do termoplástico nestas temperaturas.

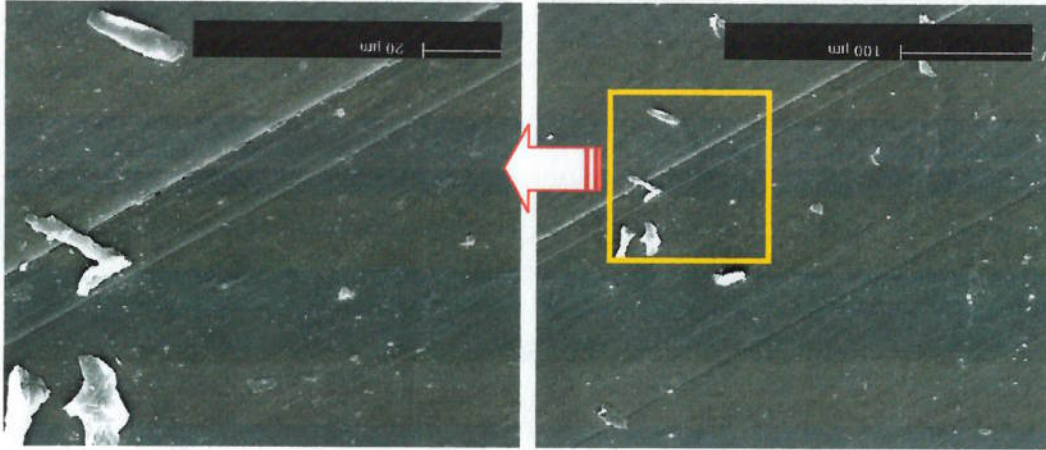
Na Figura 110, é observada a formação de sulcos na condição de 0,1 m/s, enquanto que, para 0,5 e 1,0 m/s, os sulcos já não são tão definidos. A aparência da superfície sugere que o mecanismo de perda de material é diferente do atuante nos pinos de UHMWPE e POM.

Figura 110. Imagens usando MO do pino de PA6.6. Carga: 100 N.



Na Figura 112, referente à condição de 50 N e 0,1 m/s, são observados sulcos na direção de deslizamento na superfície do pino, menos largos que os encontrados no UHMWPE e no POM, e não há formação de ondas. Uma outra

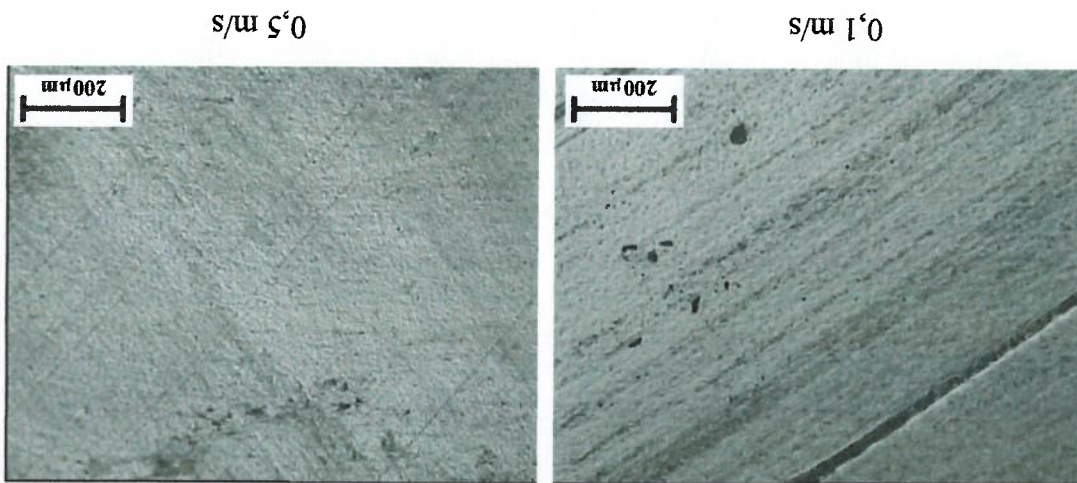
Figura 112. Imagens obtida por MEV da superfície do pino de PA6.6, nas condições de ensaio: 50 N e 0,1 m/s.



5.2.7.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 111, com a carga de 200 N, a superfície dos pinos apresenta menos sulcos que com carga de 100 N, para iguais condições de velocidade. Observa-se que para a velocidade de 0,5 m/s, os sulcos são pouco definidos, o que pode ser tomado como evidência da alta deformação plástica da superfície.

Figura 111. Imagens usando MO do pino de PA6.6. Carga: 200 N.



característica observada foi a presença de partículas de desgaste na superfície do pino.

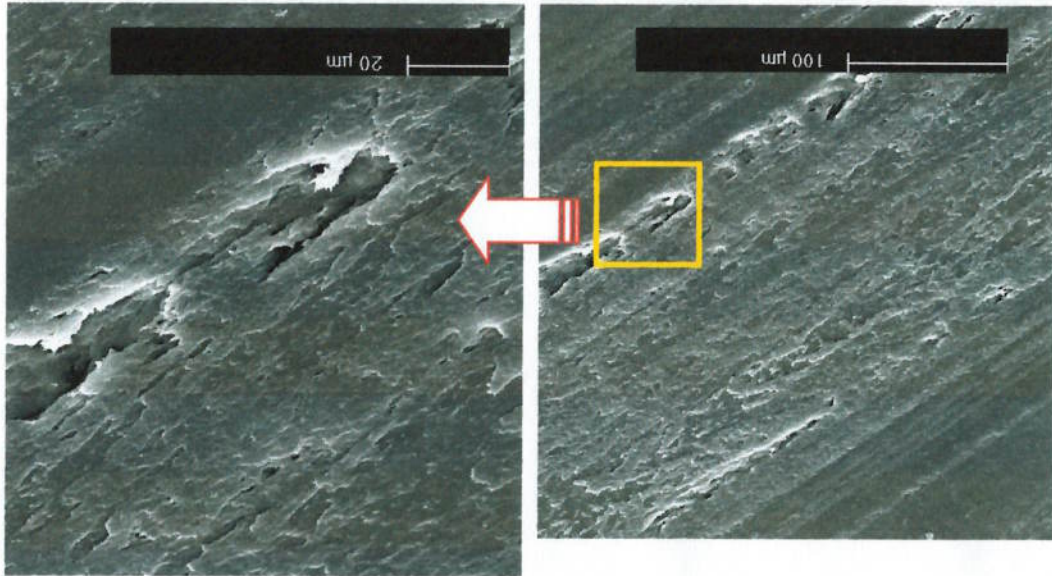


Figura 113. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. 50 N; 0,5 m/s.

Na Figura 113, observa-se como há sulcos na direção de deslizamento, e também há regiões onde o material está sendo altamente deformado na direção de deslizamento, com uma morfologia semelhante às escamas de um peixe, fenômeno que não foi observado nem no ensaio com velocidade de 0,1 m/s nem nos ensaios com os outros materiais.

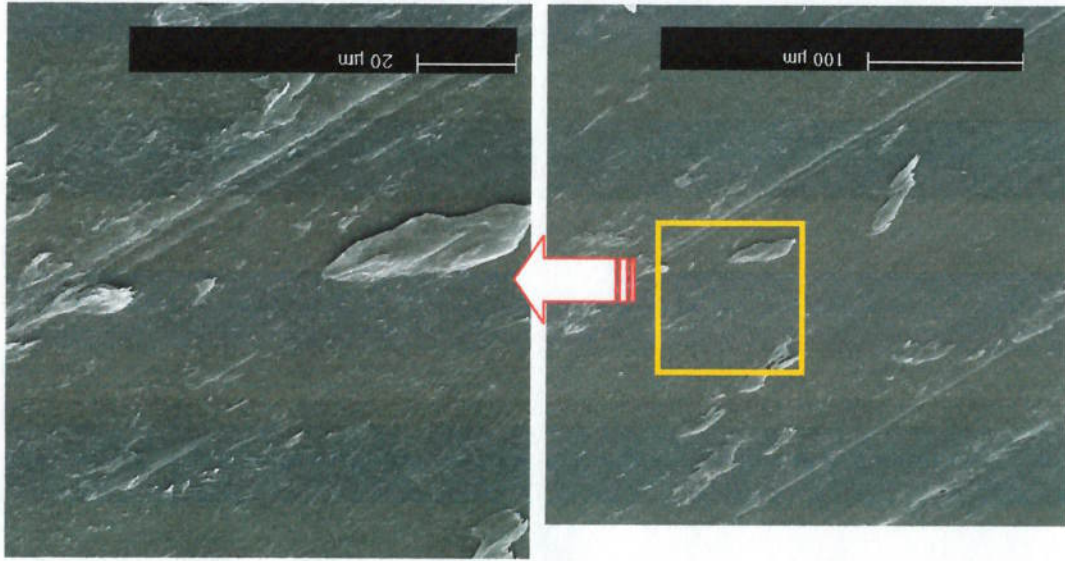
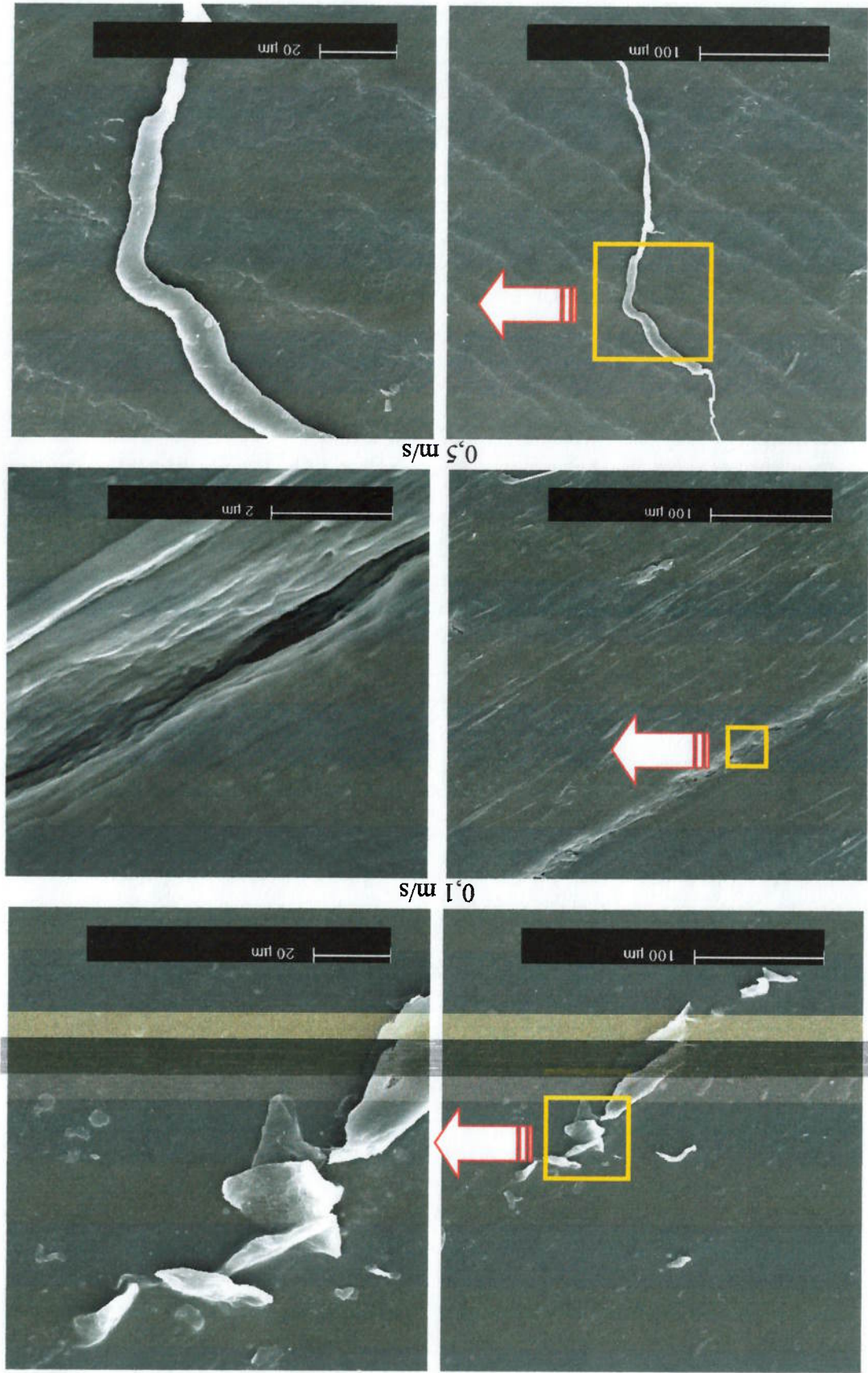


Figura 114. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. 50 N; 1,0 m/s.

Na Figura 114 são encontrados sulcos na direção de deslizamento e pequenos grupos de material depositados na superfície do pino.



1,0 m/s

Figura 115. Imagens obtida por MEV de um pino de PA6.6. Carga: 100 N.

Com carga de 100 N (Figura 115) são encontrados menos sulcos na direção de deslizamento do que os observados com a carga de 50 N. Com velocidade de 0,1 m/s encontraram-se partículas de desgaste na superfície de desgaste e não foram observados sulcos. Já com velocidade de 0,5 m/s, de novo foi evidenciado o processo de sulcamento. Nesta condição de ensaio foi observado que no fundo do sulco aparecem bordas de lâminas que parecem se formar no processo de desgaste.

Com a velocidade de 1,0 m/s (Figura 115) produziram-se ondas transversais à direção de deslizamento na superfície do material, que pela morfologia podem ser identificadas como ondas de Schallamach. Nesta condição de ensaio observou-se material que parece ter sido arrancado do pino formando um rolo, semelhante aos observados em superfícies desgastadas de borracha em condições abrasivas (ZHANG, 1998).

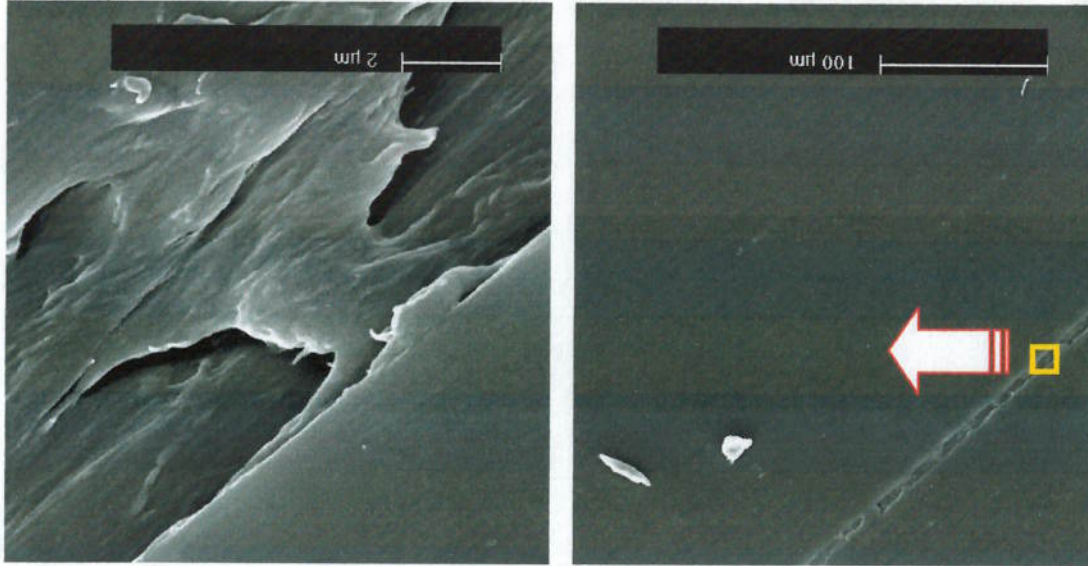


Figura 116. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. Carga: 200 N. Velocidade de deslizamento: 0,1 m/s.

Na imagem obtida para o ensaio com carga de 200 N e velocidade de 0,1 m/s os outros observados na mesma superfície. Analisando com detalhe o fundo desse (Figura 118), encontrou-se um sulco na direção de deslizamento mais profundo que

sulco, observou-se que o material apresenta a mesma morfologia de "escamas de peixe", que foi encontrada na Figura 113.

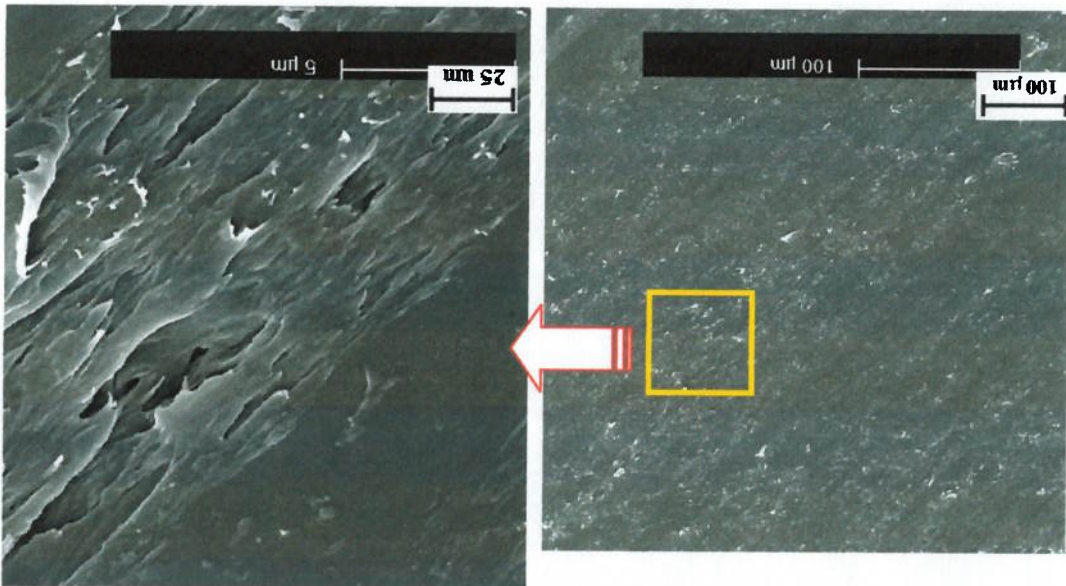


Figura 117. Imagens obtida por MEV de um pino de POM. Carga: 200 N, velocidade de deslizamento: 0,5 m/s.

Com a velocidade de 0,5 m/s (Figura 117) produziu-se no material a mesma morfologia encontrada na Figura 115 e no fundo do sulco do ensaio com 200 N e 0,5 m/s.

- Com ajuda das imagens da superfície dos pinos de PA6.6, pode-se dizer que:
- Observaram-se riscos de abrasão, menos definidos e aparentemente em menor quantidade do que nos pinos de POM;
 - Diferente do UHMWPE, na superfície do PA6.6 não há evidências das marcas de usinagem em nenhuma das condições;
 - Pode-se ver em algumas condições uma morfologia semelhante às escamas de um peixe;
 - No ensaio com 100 N e 1,0 m/s apareceram ondas de Schallamach em toda a superfície do pino;
 - Encontraram-se partículas de desgaste aderidas ao pino (formato heterogêneo, distorção, com grandes flocos amassados).

Poucos trabalhos, dentre os publicados na área de ciência dos materiais poliméricos, dedicam páginas, parágrafos ou figuras à relação dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos com os fenômenos que têm lugar na estrutura do material e, quando são apresentados, os engenheiros da área de seleção de materiais por vezes carecem dos conhecimentos necessários para realmente compreender as análises e

A relação entre os mecanismos de deformação viscoelástica e viscoplástica e as propriedades mecânicas para os materiais poliméricos ainda não atingiram o nível de conhecimento que existe na atualidade para os materiais metálicos. Há algumas idéias neste sentido, mas uma teoria com a coerência e grau de apoio experimental, como as que são difundidas para materiais metálicos e cerâmicos, aparentemente ainda não foi elaborada. Talvez este fato aconteça pela exigência tecnológica de encontrar rapidamente novos materiais poliméricos, novas blendas, novos materiais compostos que permitam desenvolver produtos mais leves, econômicos, estéticos, processáveis, sem dar tempo para que o conhecimento sobre a relação entre propriedades mecânicas e estrutura acompanhe o desenvolvimento desses produtos.

6.1 Propriedades mecânicas e mecânico-dinâmicas dos termoplásticos

Neste capítulo será consolidada a discussão do trabalho realizado, discutindo os aspectos gerais do atrito e do desgaste dos materiais termoplásticos estudados sob deslizamento a seco, assim como o método de análise dos resultados do ensaio pino-contra-disco.

No capítulo anterior foram apresentados os resultados obtidos, cada um deles com uma breve discussão sobre aquilo que era observado.

6 DISCUSSÃO

Comparando qualitativamente as durezas medidas, com os dados dos catálogos dos fabricantes, foi observado que as durezas Vickers obtidas neste trabalho permitem ordenar os termoplásticos da mesma maneira que as durezas

superior ao UHMWPE em termos de dureza Vickers. Vickers do POM (Tabela 11). Por isto, o POM e o PA6.6 são materiais em um nível aproximadamente a metade da dureza Vickers do PA6.6 e 73% inferior à dureza marcadamente inferiores às do POM e do PA6.6. A dureza Vickers do UHMWPE é menores valores de dureza e módulo elástico. Ambas as propriedades são De acordo com os resultados obtidos, o UHMWPE é o material com os

6.1.1 Dureza

A situação descrita cria uma barreira que dificulta o entendimento dos mecanismos estruturais que influenciam as propriedades mecânicas dos polímeros, assim como as propriedades medidas nos ensaios de análise mecânico-dinâmica. Levando em consideração esse inconveniente, e na tentativa de avançar no conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais poliméricos, a seguir é apresentada a análise sobre as propriedades dos materiais poliméricos, que foram medidas durante o trabalho que foi realizado.

Nos cursos de engenharia mecânica, de produção, elétrica, civil, por falar em algumas, por vezes ainda predominam disciplinas que buscam fornecer as bases necessárias para utilizar adequadamente os materiais metálicos, especialmente as ligas ferrosas.

E evidente, no meio acadêmico e industrial, o vazio existente entre os profissionais da área química, dedicados ao projeto e fabricação de materiais poliméricos, e os profissionais encarregados de projetar e usar componentes em materiais poliméricos com algum tipo de solicitação mecânica.

possível concluir que o termoplástico mais duro dentre os testados é o POM, seguido pelo PA6.6 e por último, o UHMWPE.

6.1.2 Ensaios de Microdureza Instrumentada

Os módulos elásticos obtidos para os materiais termoplásticos estudados apresentaram diferenças com respeito aos valores encontrados na literatura e, especificamente, aos fornecidos pelos fabricantes (Figura 55). No caso do UHMWPE o módulo elástico medido foi superior ao valor registrado no catálogo do fabricante, enquanto que no POM e no PA6.6 foi o contrário, ou seja, os valores medidos foram inferiores. A diferença pode ser atribuída ao método de medição do módulo elástico por parte dos fabricantes, que não foi especificado. No site MATWEB (2003) são indicados valores de módulo elástico similares aos registrados pelos fabricantes, e que foram obtidos em ensaios de tração segundo a norma ASTM 638M. A comparação dos valores sugere que nos termoplásticos usados o módulo elástico é muito influenciado pelo método de medição e pelas condições de carregamento. Por exemplo, a Figura 38 mostra como o módulo elástico do POM Hostaform (HOECHST, 2003) varia em função do esforço aplicado e do tempo de aplicação da carga.

Neste trabalho, os valores numéricos dos módulos elásticos foram obtidos em condições específicas de tempo de carregamento, carga máxima aplicada, geometria de penetrador, tempo de aplicação da carga máxima e tempo de descarregamento. Esses valores, então, servem como referência, mas sua aplicabilidade em outras condições de carregamento é discutível.

Para efeito de comparação entre materiais, foi observado que o módulo elástico medido nos ensaios de microdureza instrumentada do UHMWPE é a metade do módulo do POM, e 60% inferior ao módulo do PA6.6 (Tabelas 12, 13 e 14 e Figura 55).

Analisando os resultados de dureza plástica dos termoplásticos estudados, observou-se que os valores sempre foram superiores aos valores de dureza Vickers (Figura 54) e que a diferença entre a dureza Vickers e a dureza plástica foi maior para o POM e o PA6.6 do que para o UHMWPE. Mesmo assim, manteve-se a ordem: $HP_{POM} > HP_{PA6.6} > HP_{UHMWPE}$.

Tentando explicar melhor os resultados obtidos, construíram-se as curvas de carga em função da profundidade para os três materiais, mostradas na Figura 118, e usando os dados obtidos no equipamento de microdureza instrumentada.

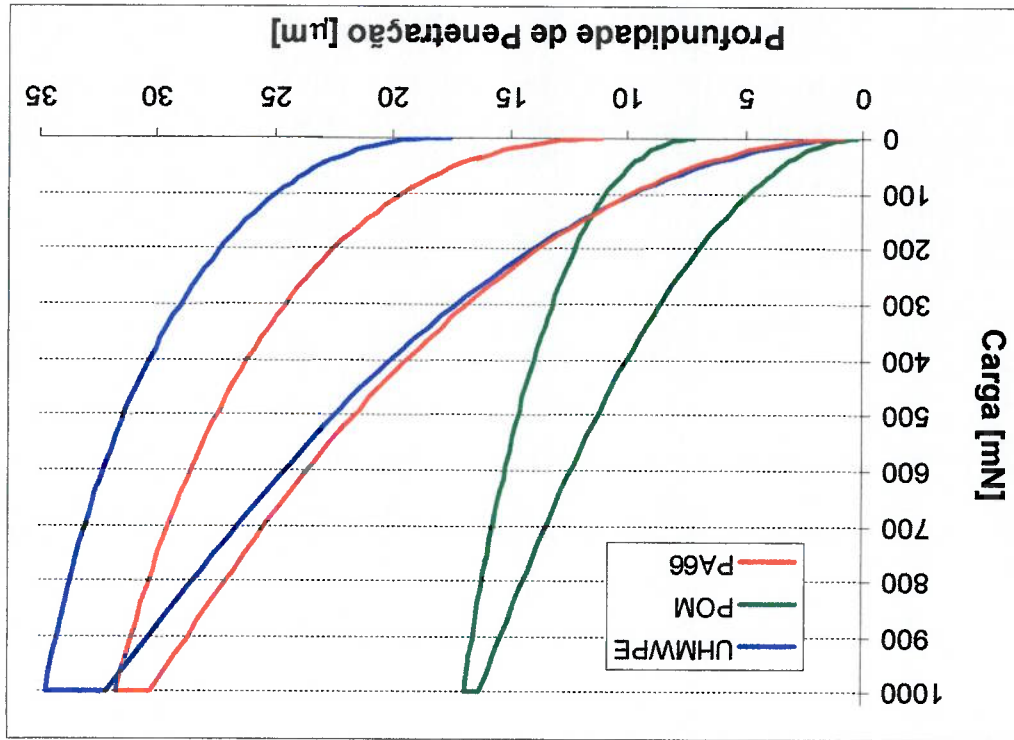


Figura 118. Curvas de carga em função da profundidade de penetração obtidas nos ensaios de microdureza instrumentada para os três termoplásticos.

A Figura 118 fornece informação mais completa sobre o comportamento dos materiais, que as obtidas com base nos valores de dureza. Comparando as profundidades máximas (em ordem crescente: POM=16,9 µm; PA6.6=31,6 µm; UHMWPE=34,7 µm) é observado como a diferença entre o PA6.6 e o UHMWPE é

menor do que a diferença entre o POM e o PA6.6, indicando que a penetração conseguida no PA6.6 não é tão diferente da produzida no UHMWPE.

Um outro fator que deve ser analisado são os valores de profundidade final (em ordem crescente: POM=7,3 µm; PA6.6=11,1 µm; UHMWPE=17,6 µm), que indicam que a marca de dureza final do PA6.6 tem uma geometria mais próxima da geometria da marca de dureza final do POM que da geometria do UHMWPE. Este resultado é coerente com os resultados de dureza Vickers obtidos.

As diferenças observadas nas curvas da Figura 118 estabelecem uma questão a ser estudada em trabalhos futuros: o entendimento dos mecanismos de deformação elástica e plástica dos materiais termoplásticos nos ensaios de dureza e a relação entre a dureza e as propriedades mecânicas deste tipo de material.

Alguns valores de propriedades mecânicas do POM e do PA6.6, como dureza, módulo elástico, limite de escoamento e resistência à tração, são superiores aos valores de muitos dos termoplásticos de engenharia (ZHANG, 1998). Estas condições, junto às de estabilidade dimensional, fazem com que ambos os materiais sejam os preferidos para engrenagens fabricadas em materiais poliméricos (BUDINSKI, G. B.; BUDINSKI, M. K., 1999). Nas condições de ensaio aplicadas ao POM e o PA6.6, houve uma diferença tanto no coeficiente de atrito como na taxa de desgaste e na perda de massa. O POM mostrou-se ser um material mais resistente ao desgaste do que o PA6.6, e as temperaturas atingidas com o POM também foram inferiores. Este fato questiona a aplicabilidade do PA6.6 em condições de contato a seco com deslizamento relativo entre as superfícies, mas deve ser lembrado que essas condições mudam com a aplicação de lubrificantes. Com lubrificação com água ou óleo, a resposta do PA6.6 em termos de resistência ao desgaste é comparável à do POM (ZHANG, 1998).

6.1.3 Análise Dinâmico-Mecânica

Uma falta de informação a respeito dos mecanismos de deformação dos materiais poliméricos também é observada nos ensaios de análise mecânico-dinâmica, o que dificulta o entendimento dos resultados. Tomando os resultados obtidos neste trabalho como referência para aplicabilidade dos materiais em condições de trabalho reais, pode-se dizer que os ensaios DMA permitem identificar as mudanças que os materiais apresentam com a temperatura, estabelecendo assim faixas de temperatura onde esses materiais podem ser usados em condições de serviço reais.

O livro de BARTENEV, LAVRANTEV (1981) usa um conceito de temperatura de transição mecânica, T_M , que não é encontrado em livros de ciência dos materiais, como os que foram citados neste trabalho (ASKELAND, 1998; CALLISTER, 1994), nem nos catálogos dos fabricantes dos materiais, nem em nenhuma outra referência. No entanto, como é mostrado por esses autores russos, a temperatura T_M indica que a temperatura de transição vítrea T_g é um valor de referência que informa que o material apresenta uma mudança de comportamento a essa temperatura, mas que essa temperatura depende do tipo e magnitude de sollicitação que é imposta ao material. Os resultados de análise mecânico-dinâmica obtidos neste trabalho (Figuras 56 a 60) mostraram como os materiais apresentam mudanças de comportamento mecânico com a temperatura, sem que essas mudanças possam ser associadas a temperaturas de transição vítrea, ou seja, há mudanças nos valores de E' , E'' e $\tan\delta$, e picos e vales nas curvas obtidas, que não podem ser associados a T_g , mas que indicam que há uma mudança no comportamento do material.

Os resultados de DMA permitiram estabelecer que o UHMWPE apresenta uma queda progressiva do módulo elástico com a temperatura (Figura 57). Também é observado um aumento da componente viscosa com a temperatura, produzindo assim um aumento no valor de $\tan\delta$.

Como explicado no Capítulo 4, nos ensaios de microdureza instrumentada a carga máxima foi mantida durante 30 segundos, permitindo comparar a deformação por fluência dos três materiais sob aplicação da carga de 1000 mN com um penetrador com geometria Vickers (Figura 118). Na Figura 119 são comparadas a profundidades de penetração conseguidas para os materiais nessas condições de medição ou seja o aumento de profundidade nos 30 segundos observado entre o fim

Os resultados dos ensaios a temperatura ambiente realizados no equipamento pino-contra-disco mostraram que o POM é o material com menos deformação por fluência a temperatura ambiente, seguido pelo PA6.6 (Figuras 72 e 73). Já o UHMWPE (Figura 71) mostrou ser o material com a maior deformação por fluência, sendo muito superior à observada nos outros dois materiais.

6.1.4 Fluência

Uma proposta para trabalhos futuros é acompanhar os ensaios de DMA com análises de calorimetria diferencial de varredura e microscopia da microestrutura, para relacionar os módulos de perda e armazenamento, e o valor de $\tan \delta$, às mudanças de cristalinidade e morfologia dos esterulitos dos materiais. Estes estudos explicariam melhor a resposta mecânica dos materiais, possibilitando assim usar os ensaios DMA como uma ferramenta de caracterização microestrutural dos materiais, e não só como uma resposta às condições de carregamento impostas no ensaio.

O POM apresentou mudanças de E' , E'' e $\tan \delta$ na faixa de temperaturas entre 30 °C e 70 °C e, para temperaturas superiores, há uma queda no módulo de armazenamento, acompanhada de um aumento da componente viscosa (Figura 58). Um resultado muito parecido foi obtido para o PA6.6 (Figura 59), sugerindo que para os três materiais a temperatura faz com que haja uma queda no módulo de armazenamento e um aumento da componente viscosa, situação que deve influenciar a resposta tribológica dos materiais nessa faixa de temperaturas.

Não foi possível encontrar informação na literatura a respeito da fluência do PA6.6, mas, com base nos resultados obtidos com o UHMWPE e o POM, concluiu-se que os ensaios realizados no equipamento pino-contra-disco podem ser usados para estimar a deformação por fluência a temperatura ambiente dos materiais nas

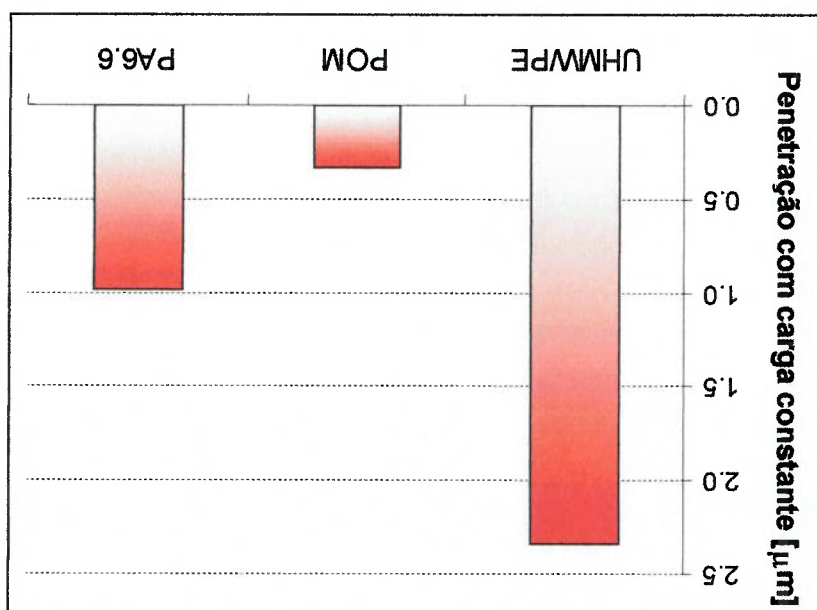
fabricantes (Figura 74).

Os resultados dos testes de fluência a temperatura ambiente para o UHMWPE e o POM foram comparados com os fornecidos pelos fabricantes (Figuras 74 e 75), encontrando que as deformações iniciais não foram muito diferentes, mas que as taxas de deformação dos ensaios em tribômetro foram inferiores. Os resultados obtidos para o UHMWPE foram mais parecidos com os fornecidos pelos

seguido pelo PA6.6 e por último o POM.

Na Figura 119 é observado que nos ensaios de dureza instrumentada foi obtido o mesmo comportamento dos ensaios de fluência no equipamento pino-contra-disco, ou seja, o UHMWPE apresenta a maior deformação por fluência,

Figura 119. Profundidade de penetração para os três termoplásticos com carga de 1000 mN. Tempo de aplicação da carga: 30 s.



condições de tempo e carga dos ensaios de desgaste realizados, mas que não devem ser extrapolados a outras condições.

Idealmente, deveriam ter sido feitos ensaios de fluência reproduzindo as temperaturas atingidas pelos corpos-de-prova durante os ensaios pino-contra-disco, para desta maneira calcular com maior precisão a taxa de deformação por fluência que deve ser subtraída da perda de altura dos pinos. Como foi mostrado, a deformação por fluência devida à temperatura foi estimada, possibilitando, assim, calcular uma taxa de desgaste por perda de material que não envolvesse a deformação por fluência. Este ponto será novamente discutido no item seguinte.

6.2 Resultados do ensaio pino-contra-disco

As conclusões a respeito do comportamento tribológico dos termoplásticos estudados, em termos de taxa de desgaste e coeficiente de atrito, serão obtidas a partir dos valores numéricos calculados com base nos dados fornecidos pelo equipamento pino-contra-disco. Posteriormente, serão discutidos os aspectos dos ensaios que influenciaram os resultados de taxa de desgaste e coeficiente de atrito.

6.2.1 Temperatura na região de contato durante os ensaios

As temperaturas na região próxima ao contato nos pinos de UHMWPE e POM foram monitoradas nos ensaios com a maior condição de carga e velocidade, com base na informação encontrada na literatura sobre a relação entre temperatura e condição PV, como a citada na seção 2.6.3. No entanto, teria sido recomendável medir também a temperatura nas outras condições de ensaio, para ter mais dados de referência para a análise. Essa medição foi realizada para o PA6.6 em todas as condições de ensaio, fornecendo dados para uma discussão melhor apoiada em dados experimentais.

Os pinos de PA6.6 apresentaram o maior aquecimento dentre os três materiais estudados (Tabela 17), possivelmente devido a dois fatores: os maiores valores de coeficiente de atrito nas condições de ensaio e a menor condutividade térmica deste material em comparação com o UHMWPE e o POM.

O UHMWPE e o POM só apresentaram diferenças significativas na temperatura na região de contato para carga de 200 N e velocidade de 0,1 m/s, ou seja, na menor condição PV em que foi medida a temperatura. Nas outras três condições, as temperaturas foram semelhantes. É conveniente considerar o fato de que o coeficiente de atrito para o UHMWPE sempre foi menor (Tabela 20) e que as condutividades térmicas (Tabela 3) são parecidas, sendo a do UHMWPE aproximadamente 15% superior à do POM. Estes dados sugeririam que nos ensaios com UHMWPE, o calor gerado no contato e conduzido para o interior do pino deveria produzir um aquecimento menor que o aquecimento dos pinos de POM. Entretanto, nos ensaios encontrou-se que as temperaturas foram parecidas e a diferença diminuiu ainda mais com o aumento da condição PV. Cabe pensar que estes materiais são semelhantes não só no fato de apresentar um comportamento viscolástico na faixa de temperaturas estudadas, como também no grau de aquecimento conseguido durante os ensaios pino-contra-disco. Com o aumento da condição PV, o comportamento térmico de ambos os materiais é igual, e as diferenças entre os coeficientes de atrito também diminuem (Figura 70). As taxas de desgaste destes materiais também ficam mais parecidas com o aumento da condição PV (Figura 86), mas a dispersão dos dados questiona a validade desta afirmação. Ignorando a dificuldade em usar os dados de taxa de desgaste, cabe pensar que o aumento na condição PV diminui a diferença no coeficiente de atrito e comportamento térmico de ambos os materiais, ficando aberta a possibilidade de este fato acontecer também com a taxa de desgaste.

A condição PV fez com que a temperatura dos pinos aumentasse (Figura 62), coincidindo com os resultados encontrados por outros autores (Figuras 32 e 33). No

UHMWPE e o POM. Entretanto, é necessário considerar que para o PA6.6 foram medidas 8 temperaturas e para os outros dois materiais só 4, facilitando o ajuste linear para o UHMWPE e para o POM.

Os resultados também sugerem que o parâmetro que mais influencia a temperatura é a velocidade de deslizamento (Figura 64). Sobre a influência da carga aplicada pode-se dizer que não há informação suficiente para verificar a relação entre carga aplicada e temperatura, já que só foram determinadas duas curvas para o UHMWPE e POM (Figura 65). No PA6.6 a carga não teve um efeito definido na temperatura atingida durante o contato (Figura 66).

A estimativa de Archard para a temperatura no contato permitiu observar que, em todas as condições, a maior temperatura no contato foi encontrada nos ensaios com PA6.6, seguida pelo POM e finalmente o UHMWPE (Tabela 22). As temperaturas estimadas para o contato nos ensaios com UHMWPE e POM novamente mostraram ser muito parecidas, com diferenças de aproximadamente 10 °C, mesmo com o menor valor de coeficiente de atrito monitorado nos ensaios com UHMWPE.

Considera-se que a estimativa da temperatura no contato fornece uma idéia do grau de aquecimento nas superfícies em contato, mas optou-se por usar a temperatura medida diretamente no pino como referência para a análise. A temperatura obtida experimentalmente foi medida a uma distância de 1 mm do contato.

6.2.2 Coeficiente de atrito

Em geral, o coeficiente de atrito para os tribossistemas estudados esteve na faixa entre 0,1-1,0 (Figura 67). Em todas as condições de ensaio, o coeficiente de atrito do tribossistema UHMWPE-aco inoxidável foi o menor, estando sempre entre

No PA6.6 o valor de coeficiente de atrito, o maior dentre os três materiais estudados, encontra uma possível explicação nos grupos amida laterais presentes nas cadeias, que dificultam a movimentação relativa entre as cadeias (THORP, 1982).

O baixo valor de coeficiente de atrito medido para o UHMWPE pode ser explicado pela linearidade das cadeias poliméricas, pela baixa tensão superficial entre o PE e o aço (BRISCOE; TABOR, 1978) e pela formação de camadas de UHMWPE na superfície do contracorpo (BAHADUR, 2000). Um fator que também diminui o coeficiente de atrito é o peso molecular (YOUNG, LOVELL, 1991), já que cadeias moleculares mais compridas tendem a apresentar uma maior ordem fazendo com que a dissipação de energia seja menor.

Este trabalho foi realizado com base nas propriedades termomecânicas dos materiais, sem realizar nenhum tipo de análise química dos termoplásticos nem das superfícies desgastadas, fazendo com que muito pouco possa ser discutido quanto à influência das características químicas dos materiais no coeficiente de atrito. A discussão, então, estará centrada nos efeitos dos parâmetros de ensaio no coeficiente de atrito, tratando os valores de coeficiente de atrito como variáveis de saída do tribossistema e não como fontes de informação a respeito dos fenômenos triboquímicos ou tribofísicos, que afetaram as superfícies em contato. Por outro lado, a literatura permite uma breve discussão dos resultados obtidos.

Os valores de desvio padrão permitem dizer que os ensaios forneceram dados repetíveis de coeficiente de atrito e que a discussão sobre esses valores esta bem fundamentada pelo trabalho experimental.

CLERICO, 1969; ERHARD, 1983).
maior valor sempre foi o do tribossistema PA6.6-aço inoxidável (0,5-1,0). Esta ordem esta de acordo com os valores referenciados na literatura (Figuras 18 e 28;

6.2.2.1 Efeito da carga aplicada

O incremento da carga aplicada de 50 para 200 N fez com que o atrito do POM e do PA6.6 diminuísse até cerca da metade (Tabelas 24 e 25, Figura 68), mas no UHMWPE o efeito da carga foi o de aumentar o coeficiente de atrito em aproximadamente 50% (Tabela 23 e Figura 68).

YAMAGUCHI (1990) obteve, para o PA6 em contato com aço, um máximo no coeficiente de atrito em função da carga aplicada para várias velocidades de deslizamento (Figura 29). No entanto, ele não indicou o tipo de ensaio que produziu essa curva, de forma que não é possível comparar os resultados com os apresentados por YAMAGUCHI (1990).

6.2.2.2 Efeito da velocidade de deslizamento

A velocidade de deslizamento teve efeitos diferentes nos materiais estudados. No UHMWPE não foi observada variação do coeficiente de atrito (Figura 62), enquanto que no POM a velocidade de deslizamento fez com que o coeficiente de atrito diminuísse. Já no PA6.6, o coeficiente de atrito apresentou um máximo com a velocidade de 0,5 m/s.

Os resultados de coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento deveriam encontrar explicação nas temperaturas atingidas no contato (Figuras 56, e 57), mas não foi possível correlacionar ambos os parâmetros. Houve ensaios onde a temperatura aumentou e o coeficiente de atrito diminuiu, de forma que uma explicação deve ser procurada junto aos parâmetros do sistema e não unicamente na temperatura.

Se a lei de Archard para desgaste abrasivo fosse aplicável para as condições dos ensaios realizados, as diferenças em dureza deveriam fazer com que o UHMWPE tivesse uma resistência ao desgaste marcadamente inferior às apresentadas pelo POM e PA6.6, em condições de temperatura próximas à temperatura ambiente, na qual foram medidas as durezas dos materiais. Para mostrar a taxa de desgaste em função da dureza foi construída a Figura 120, selecionando-se

Pelo método empregado para a estimativa da taxa de desgaste, e pela dispersão dos resultados, considera-se que os ensaios realizados permitem comparar os termoplásticos quanto à sua resistência ao desgaste. No entanto, os valores de taxa de desgaste não são estatisticamente confiáveis e não constituem uma base sólida para a discussão. Para a discussão vão ser usados os valores estimados, mas sempre deverá ser considerado que as taxas analisadas são produto de uma estimativa, e só indicam uma tendência.

Em quase todas as condições de ensaio, com uma única exceção, a taxa de desgaste estimada para o tribossistema UHMWPE-ago inoxidável foi a menor dentre os três tribossistemas (Figura 79), seguida pela estimada para o tribossistema POM-ago inoxidável e o maior valor sempre foi o do tribossistema PA6.6-ago inoxidável.

6.2.3 Desgaste

O aumento na condição PV fez com que o coeficiente de atrito do UHMWPE aumentasse e com que os valores obtidos para o POM diminuíssem, aproximando os valores em função da condição PV (Figura 70). Este fenômeno já foi discutido anteriormente quando abordou-se a temperatura, apoiando a ideia de que ambos os materiais possam ter comportamentos tribológicos semelhantes em altos valores de condição PV.

6.2.2.3 Efeito da condição PV

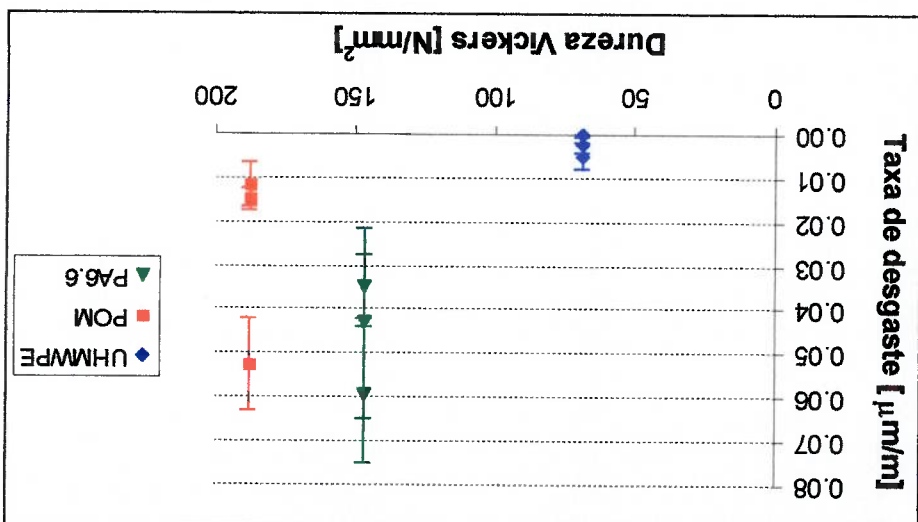
Analisando o efeito da carga aplicada na taxa de desgaste dos termoplásticos estudados, encontrou-se que só nos ensaios com UHMWPE (Figura 71), houve um aumento na taxa de desgaste em todas as condições de velocidade quando a carga aplicada foi 200 N, mas que com cargas de 50 e 100 N as taxas são semelhantes. O

6.2.3.1 Efeito da carga aplicada na taxa de desgaste

Na Figura 24 (BRISCOE, 1981, *apud* HUTCHINGS, 1992) é observado como a taxa de desgaste do PA6.6 é inferior à taxa do POM em condições predominantemente abrasivas. Nessas condições, com ensaios em esclerômetro, ou de abrasão a dois corpos, e baixas cargas e velocidades de deslizamento, não há uma diferença marcada nas temperaturas atingidas pelos materiais durante o ensaio. Sendo assim, é possível que nessas condições o PA6.6 apresente uma resistência ao desgaste abrasivo superior à obtida nos testes de desgaste por deslizamento a seco.

Na Figura 120 é observado que não há uma relação direta entre a taxa de desgaste e a dureza dos materiais.

Figura 120. Taxa de desgaste dos materiais em função da dureza Vickers com velocidade de 0,1 m/s.



que as propriedades mecânicas não variaram significativamente pelo efeito do aquecimento dos pinos.

Como descrito no Capítulo 2, a literatura tem indicado que a condigão PV é um parâmetro que deve influenciar o comportamento dos materiais poliméricos frente ao desgaste e o atrito. No entanto, no UHMWPE e no POM não foi observada uma relação definida entre a condigão PV e a taxa de desgaste (Figura 86). No PA6.6, foi possível dividir os resultados em duas regiões: para valores de condigão PV inferiores a 1 MW/m^2 , a taxa de desgaste esteve entre $0,04\text{-}0,10 \text{ } \mu\text{m/m}$, e para condições PV superiores a 1 MW/m^2 , a taxa de desgaste esteve entre $0,3$ e $0,4 \text{ } \mu\text{m/m}$. A temperatura atingida no contato não explica por si só esta divisão, já que não há uma diferença sensível entre as temperaturas com carga de 50 N e 1 m/s e as

6.2.3.3 Efeito da condigão PV na taxa de desgaste

No POM não foi observado que a velocidade de deslizamento influísse na taxa de desgaste (Figura 84) e no PA6.6 a taxa de desgaste parece apresentar um máximo nos ensaios com $0,5 \text{ m/s}$.

A velocidade de deslizamento não teve o mesmo efeito na taxa de desgaste nos ensaios com os três materiais. No UHMWPE, só com a carga de 200 N houve um aumento com a velocidade (Figura 83); nas outras condições de ensaio não foi observado que a velocidade de deslizamento afetara a taxa de desgaste.

6.2.3.2 Efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste

resultados. aumento da taxa de desgaste com a carga de 200 N também foi observado para os ensaios com POM e $0,1 \text{ m/s}$, e nos ensaios com PA6.6 e $0,5 \text{ m/s}$. Em todas as outras condições de ensaio, para os três materiais, a carga aplicada não influenciou a taxa de desgaste. Estes resultados demonstram como não há um comportamento padrão da taxa de desgaste com a carga aplicada nas condições de ensaio estudadas, sem deixar de lado a questão da dispersão dos dados, que dificulta a confiabilidade nos resultados.

117. Nos ensaios com as menores condições PV (Figuras 112 e 116), o mecanismo de desgaste foi a abrasão, caracterizada pelo sulcamento na direção de deslizamento. Já nas maiores condições PV (Figuras 115 e 117) as superfícies apresentaram ondas de Schallamach com a carga de 100 N e 1, 0 m/s, e uma morfologia semelhante à escamas de peixe com carga de 200 N e 0, 5 m/s.

Cabe pensar, então, que no PA6.6 esse aparente limite de 1 MW/m^2 , constitui um valor que divide o comportamento do material assim:

- Para valores de condição PV menores a 1 MW/m^2 , as taxas de desgaste são baixas e nas superfícies dos pinos de PA6.6 formam-se sulcos na direção de deslizamento, como evidência do mecanismo de sulcamento.
- Para as condições PV superiores a 1 MW/m^2 , a taxa de desgaste é maior e constante, e o mecanismo de sulcamento não é evidente, dando lugar ao surgimento de outras morfologias: em um caso foram encontradas ondas de Schallamach e em outros casos o material pareceu ser arrancado em lâminas produzindo uma aparência semelhante às escamas de um peixe.

6.2.4 Perda de massa

Os resultados de perda de massa foram muito dispersos (Figura 142). Essa dispersão na perda de massa é comparável com a dispersão obtida para as taxas de desgaste, sugerindo que talvez a fonte da dispersão fosse efetivamente o comportamento tribológico dos materiais e não apenas o método experimental usado. Buscando relacionar a perda de massa com as taxas de desgaste, foram calculadas as perdas volumétricas usando os dados de densidade dos materiais da Tabela 3. Comparando a perda volumétrica (Figura 91) com as taxas de desgaste (Figura 79) é evidente que não é possível determinar uma relação entre ambos os

Se o critério usado para determinar o período de desgaste estacionário for a perda de altura, pode-se dizer que os tribossistemas apresentaram um período de *running-in* seguido de desgaste estacionário. Mas, analisando as imagens das superfícies após os ensaios de pinos de UHMWPE com 0,1 m/s de velocidade de deslizamento, pode-se dizer que as superfícies dos pinos ainda não

Neste ponto é adequado discutir o significado do termo *running-in* para os ensaios realizados. No caso dos ensaios de pinos de UHMWPE com velocidade de 0,1 m/s, nas três condições de carga aplicada, foi observado que, após os 3500 m de distância percorrida, a superfície dos pinos ainda apresentava as marcas circulares da usinagem anterior aos ensaios de desgaste (Figuras 94, 95 e 96). A presença destas marcas indica que, para essa condição de velocidade, a distância onde começa o período de desgaste estacionário é superior a 3500 m. No entanto, as curvas de perda de altura em função da distância percorrida mostraram que os tribossistemas de UHMWPE-disco de aço inoxidável apresentam uma região aproximadamente linear, com inclinações muito baixas.

Uma explicação pode ser obtida quando observa-se que uma relação direta entre a taxa de desgaste e a perda volumétrica baseia-se na suposição de que todos os pinos tiveram o mesmo comportamento quanto à duração do *running-in*, e perda de massa durante esse período, mas isso parece não ser verificado pelos resultados de taxa de desgaste estimada. Tomando como referência os resultados de taxa de desgaste (Figura 79) e a perda volumétrica (Figura 91), é observado que o UHMWPE parece ter tido uma maior perda de material durante o *running-in*, para depois atingir uma taxa de desgaste menor que as dos outros materiais. O POM apresentou a menor perda volumétrica de material dentre os três materiais, com exceção dos ensaios de pinos de UHMWPE com 0,1 m/s de velocidade de deslizamento, onde as marcas de usinagem desapareceram, sugerindo que, nessa velocidade, a perda volumétrica de material foi menor que nos ensaios com POM e PA6.6.

condições e de outros materiais, fazendo com que seja discutível a comparação das taxas de desgaste estimadas para estes ensaios com as estimadas para outras condições de ensaio. Em resumo, em alguns casos a curva de perda de altura indica que o tribossistema atinge o regime de desgaste estacionário, mas as superfícies dos pinos indicam que é necessária uma maior distância de deslizamento para as superfícies se desgastarem uniformemente em toda a área aparente de contato.

6.3 Aplicabilidade dos resultados

Os resultados obtidos neste trabalho permitem indicar que, nas condições analisadas e dentre os materiais estudados, o UHMWPE apresenta a menor taxa de desgaste junto a um baixo coeficiente de atrito, além de apresentar as menores temperaturas de contato.

Em termos de propriedades mecânicas, o POM copolímero apresenta, dentre os três materiais termoplásticos estudados, uma baixa deformação por fluência tanto à temperatura ambiente, como com temperaturas até 100 °C (Figura 41). A sua taxa de desgaste é superior à taxa do UHMWPE em algumas condições de ensaio e semelhante em outras, mas a perda volumétrica de material resultou ser a menor para todas as condições de ensaio.

Nas condições dos ensaios realizados, o PA6.6 apresentou as maiores taxas de desgaste e os maiores coeficientes de atrito, assim como as maiores temperaturas na região de contato. Estes resultados indicam que este material não é adequado para aplicações onde os componentes estejam em contato, a seco, com contracorpos de aço inoxidável, nas condições de esforço aplicado e velocidade de deslizamento usadas nos ensaios.

Com base nos comportamentos dos materiais termoplásticos descritos nos parágrafos anteriores, pode-se concluir que o UHMWPE e o POM são os melhores

adquirirem menores temperaturas durante o contato. Além disso, o POM apresenta a maior dureza e o maior módulo elástico, constituindo a opção que melhor combina a resistência ao desgaste com propriedades mecânicas. A vantagem do UHMWPE com respeito ao POM é o menor coeficiente de atrito medido nos tribossistemas com pinos de UHMWPE.

Sobre os materiais utilizados:

7 CONCLUSÕES

1. Os dados de propriedades mecânicas fornecidos pelos fabricantes mostraram diferenças com respeito aos medidos. A dependência das condições em que essas propriedades são determinadas faz com que os valores informados sirvam apenas como uma referência.

2. Os ensaios instrumentados de dureza permitiram observar que há diferenças no comportamento mecânico entre os materiais estudados, em termos de deformação viscoelástica e viscoplástica. O POM e o PA6.6 apresentaram valores semelhantes de dureza plástica (e dureza Vickers), enquanto que o PA6.6 e o UHMWPE apresentaram profundidades de penetração semelhantes.

3. A deformação por fluência foi maior para o UHMWPE, seguido pelo PA6.6. Já o POM apresentou a menor deformação por fluência dentre os materiais estudados.

4. Os ensaios de análise mecânico-dinâmica permitiram encontrar mudanças no comportamento dos materiais em função da temperatura, mas, nas faixas de temperatura atingida durante os ensaios, as propriedades dos materiais não apresentaram picos ou vales que indicassem uma mudança no comportamento. Nos três materiais, o aumento na temperatura fez com que a componente viscosa aumentasse.

2. Pelo método de medição usado pelo equipamento pino-contradisco baseado na variação de altura do pino, a fluência mostrou ser um fenômeno que deve ser analisado na determinação da taxa de desgaste, sendo considerável para o UHMWPE e o PA6.6, e desprezível para o POM.

1. Encontrou-se grande dispersão em alguns resultados de taxa de desgaste, dificultando uma análise adequada dos resultados.

Sobre o desgaste

4. A condição PV fez com que o coeficiente de atrito do UHMWPE aumentasse e com que os valores obtidos para o POM diminuíssem, aproximando os valores em função da condição PV obtidos para os três materiais.

3. A velocidade de deslizamento produziu uma queda no coeficiente de atrito para o POM e o PA6.6 e um pequeno aumento para o UHMWPE.

2. O coeficiente de atrito do UHMWPE não variou com a carga aplicada. Já os coeficientes de atrito do POM e do PA6.6 diminuíram com a carga aplicada.

1. Em todas as condições de ensaio, o coeficiente de atrito do tribossistema UHMWPE-ago inoxidável com nitrogênio foi o menor dentre os tribossistemas estudados, e seu valor esteve entre 0,1 e 0,2. Os tribossistemas com pinos de POM apresentaram coeficientes de atrito entre 0,2 e 0,5, e os ensaios com pinos de PA6.6 apresentaram coeficientes de atrito entre 0,5 e 1,0.

Sobre o coeficiente de atrito

3. Observaram-se diferenças entre a taxa de desgaste estimada e a perda volumétrica de material calculada com base na perda de massa, talvez como efeito das diferenças de comportamento tribológico durante o *running-in*.

4. As taxas de desgaste dos tribossistemas pinos de UHMWPE-disco de aço inoxidável foram as menores dentre as taxas estimadas. As taxas estimadas para os pinos de POM foram superiores às do UHMWPE, e as do PA6.6 foram as superiores dentre os tribossistemas estudados.

5. Não foi encontrada uma relação entre a taxa de desgaste e a dureza Vickers dos materiais estudados nas menores condições de carga e velocidade, onde as temperaturas na região de contato foram as menores. O POM, com a maior dureza, apresentou uma taxa de desgaste maior do que a do UHMWPE, que tem a menor dureza. Este resultado mostra como a aplicação da relação de Ratner-Lancaster, proposta para materiais poliméricos, em condições de desgaste por deslizamento é discutível.

6. A taxa de desgaste do POM e do PA6.6 não variou com a carga aplicada. No UHMWPE, a taxa de desgaste só aumentou quando a carga aplicada foi 200 N.

7. A velocidade de deslizamento não influenciou as taxas de desgaste do UHMWPE e do POM. Para o PA6.6, observou-se um máximo na taxa de desgaste com a carga de 100 N.

8. Não foi observada uma relação definida, como sugere a literatura, entre a condição PV e a taxa de desgaste nos ensaios com UHMWPE e com POM. No entanto, nas maiores condições PV os valores de taxa de desgaste para ambos os materiais são próximas, comportamento que também foi observado para o coeficiente de atrito em função da condição PV. Aparentemente ambos os materiais têm comportamentos tribológicos semelhantes em altos valores de condição PV.

2. Pela configuração do equipamento de equipamento pino-contra-disco, que usa um sensor de posição, e pela deformação por fluência dos materiais ensaiados, observou-se que o equipamento não é adequado para medir taxa de desgaste em tribossistemas onde sejam utilizados pinos de material polimérico. O monitoramento da perda de massa

1. Os resultados de coeficiente de atrito apresentaram pouca dispersão, enquanto que os resultados de taxa de desgaste apresentaram desvios padrões grandes, sugerindo que o método e equipamento utilizados neste trabalho permitem medir adequadamente o coeficiente de atrito, mas que a confiabilidade na aplicação das taxas de desgaste estimadas é diminuída pela dispersão dos dados.

Sobre os ensaios realizados

11. No PA6.6, foi possível dividir os resultados de taxa de desgaste em função da condição PV em duas regiões: para valores de condição PV inferiores a 1 MW/m^2 , a taxa de desgaste esteve entre $0,04-0,10 \text{ } \mu\text{m/m}$ e o mecanismo predominante foi o sulcamento. Para condições PV superiores a 1 MW/m^2 , a taxa de desgaste esteve entre $0,3$ e $0,4 \text{ } \mu\text{m/m}$ e as superfícies apresentaram ondas de Schallamach com a carga de 100 N e $1, 0 \text{ m/s}$, e uma morfologia semelhante à escamas de peixe com carga de 200 N e $0, 5 \text{ m/s}$.

10. Nos pinos de POM o mecanismo de sulcamento foi mais evidente do que nos pinos de UHMWPE, e observaram-se ondas de Schallamach em algumas condições. Também foram encontradas partículas de desgaste aderidas ao pino.

9. No UHMWPE o mecanismo de desgaste predominante foi o sulcamento na direção de deslizamento e nas superfícies dos pinos formaram-se camadas de material polimérico que, junto às camadas de UHMWPE aderidas na superfície do contracampo referenciadas na literatura, permitem explicar em parte o baixo coeficiente de atrito medido nos ensaios com UHMWPE.

não deveria estar baseado somente nas massas antes e depois do ensaio, mas deveria ser realizado em distâncias intermediárias.

3. O coeficiente de atrito e a taxa de desgaste são variáveis que devem ser tratadas estatisticamente da mesma maneira, ou seja, determinadas com o mesmo número de dados sempre que possível, já que são dados de saída fundamentais nos tribossistemas.

Sobre a utilidade dos resultados

1. Este trabalho mostra como, nas condições de carga e velocidade utilizadas, o POM e o UHMWPE apresentam boas resistências ao desgaste quando comparados com o PA6.6. Em situações onde haja contato de peças em materiais termoplásticos com componentes de aço inoxidável, o POM é uma boa opção pelo seu comportamento termo-mecânico e suas boas propriedades tribológicas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. ASTM G 99-90 Standard Test Method For Wear Testing With A Pin-On-Disk Apparatus Metals test methods and analytical procedure. Vol. 03.02 – Wear and erosion; metal corrosion. section 3 – (1992), p. 387-391
- ARCHARD, J. F. The temperature of rubbing surfaces. *Wear*, 2 (1959), p.439-455
- ARGAWAL, V. R., PILLAI, U.T.S. & SETHURAMIAH, A. New observation on PTFE wear mechanism. *Wear of Materials* (1989). p. 501-506
- BAER, E. Advanced polymers. *Scientific American*, (1986) Vol. 255, número 4, p. 146-155
- BAHADUR, S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *WEAR*, vol 245 (2000), pp. 92-99.
- BARTENEV, G. M.; LAVRENTEV, V. V. Friction and Wear of polymers, Tribology Series, nº6. Elsevier Scientific Publishing Company, 1981, p. 10-260
- BELLOW, D. G. & VISWANATH, N. S. An analysis of the wear of polymers. *Wear*, 162-164 (1993), p. 1048-1053
- BELY, V. A., SAVKIN, V. G. & SVIRIDYONOK, A. I. Effect of sturure on polymer friction. *Wear*, vol 18, 1971, pp. 11-18
- BELY, V. A.; SVIRIDYONOK, A. I.; SMURUGOV, V. A. & NEVZOROV, V.V. Adhesive wear of polymer friction. *Journal of Lubrication Technology*, v 109 (1977) p. 396-400
- BLAU, P. J. Friction science and technology. Marcel Dekker, Inc. (1996), p.285-334
- BORESI, A. P., SCHMIDT R. J., SIDEBOTOM, O. M. *Advanced Mechanics Of Materials*. John Wiley and Sons, Inc. (1993)

- BOX, G. E. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building.** Wiley and Sons, (1978).
- BRENTNALL, A. B. & LANCASTER, J. K. The friction and wear behaviour of a composite, dry-bearing linear sliding against itself. **Wear of materials**, 2 (1989), p. 596-603
- BRISCOE, B., J.; TABOR, F. R. S. Friction and wear of polymers. Capítulo I. From: **Polymer Surfaces.** Editado por D.T. Clark & W.J.Feast. John Wiley & Son, 1978. pp.1-46
- BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. **Tribology International** (1981), p.231-243
- BRISCOE, B.J. Material aspects of polymer wear. **Scripta Metallurgica et Materialia.** Vol. 24 (1990) p. 839-844
- BUDINSKI, G. B.; BUDINSKI, M. K. **Engineering Materials: Properties And Selection.** Prentice-Hall International (1999)
- BUDINSKI, K. G. Friction in machine design. "Tribological Modeling for Mechanical Designers" **ASTM, STP 1105** (1991), p. 89-125
- BUDINSKI, K. G. Friction in machine design. "Tribological Modeling for Mechanical Designers" **ASTM, STP 1105** (1991), p. 89-125
- CALCOTE, L.R. **Introduction To Continuum Mechanics.** Prinncetown, D. Van Nostrand Company, Inc. 1968
- CALLISTER JR., W. D. **Materials Science And Engineering - An Introduction.** 3a Edição, John Wiley & Sons. (1994), p. 444-507
- CANFVAROLO, JR. S. V. **Análise Dinâmico-Mecânica Para Sistemas Poliméricos.** Parte 1 - O Amortecimento (tan) **Polímero: Ciência e Tecnologia.** ABPol, maio de 1991, 36-40

- CANEVAROLO, JR. S. V. *Ciência Dos Polímeros*. Artiber Editora. (2002). pp 41-46
- CENNA, A.A.; ALLEN, S.; PAGE, N.W.; DASTOOR, P. Modelling the three-body abrasive wear of UHMWPE particle reinforced composites. *Wear*, 254 (2003), p. 581-588.
- CLERICO, M. A study of the friction and wear of Polyamida against metal. *Wear*, 13 (1969), p. 183-197
- COOPER, J.R., DOWSON, D. & FISHER, J. Macroscopic and microscopic wear mechanism in UHMWPE. *Wear*, 162-164 (1993) p. 378-384
- COURTNEY, T.H. *Mechanical Behaviour of Materials*. Mc Graw Hill, 2000.
- CZICHOS, H. Influence of adhesive and abrasive mechanism on the tribological behavior of thermoplastic polymer. *Wear*, 88 (1983), p. 27-43
- CZICHOS, Horst Influence of adhesive and abrasive mechanisms on the tribological behaviour of thermoplastics polymers. *Wear*, vol 88, 1983, pp. 27-43
- DA SILVA, C.H. *Estudo do comportamento tribológico do par polímero-corpo rígido visando a proposição de modelos matemáticos de coeficiente de atrito dinâmico e taxa de desgaste*. Tese de Doutoramento. PME-FPUSP, 2001.
- DA SILVA, C. H. *Estudo do Efeito da Carga Normal e da Velocidade no Coeficiente de Atrito do Par Polietileno de Alta Densidade e Aço Carbono Galvanizado*. *Dissertação de Mestrado*. Escola Politécnica da USP, 1998
- DICKENS, P. M., SULLIVAN, J. L. & LANCASTER, J. K. Speeds effects on the dry and lubricated wear of polymers. *Wear*, 1986, pp. 273-289
- DP UNION. *TA Instruments Dynamic Mechanical Analyzer*. Product Catalog. 2003.
- ERHARD, G. Sliding friction behavior of polymer-polymer material combinations. *Wear*, vol 84, 1983, pp. 167-181

- FARIAS, M. C. M. **Desgaste por deslizamento de Aços Inoxidáveis Austeníticos.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1999. 120p
- GARZON, C.M. **Caracterização microestrutural de aços inoxidáveis martensíticos nitrados em alta temperatura.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 2001.
- GILTRON, J. P. A relationship between abrasive wear and the cohesive energy of materials. *Wear*, 15 (1970) p. 71-78
- GREENWOOD, J.A. & WILLIAMSON, J. B. P. Contact of nominally flat rough surface. *Proceedings Royal Society London*, A295 (1966), p. 300-319
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction And Wear Of Engineering Materials.** Edward Arnold / London, (1992). Chapter 3: Friction of polymers, p.51-57
- ISO International Standard. Plastics – Determination of Hardness. ISO 2039-1 (E) part 1, 1997. pp 1-3
- JASTRZEBSKI, Z. D. **The nature and Properties of Engineering Materials.** John Wiley and Sons. (1987)
- KAR, M. K.; BAHADUR, S. Micromechanism of wear at polymer-metal sliding. *Wear*, 46 (1978) p. 189-202
- KESTENBACH, H.-J.; BOTTA FO, W. J. **Microscopia Eletrônica: transmissão e varredura.** São Paulo, ABM, 1994.
- KONG, H.; ASHBY, M.F. Wear mechanism in brittle solids - *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 40, n. 11 (1992) p. 2907-2920
- LANCASTER, J. K. Abrasive wear of polymers. *Wear*, 14 (1969) p. 223-239
- LANCASTER, J. K. Material-specific wear mechanisms: relevance to wear modelling. *Wear*, 141 (1990) p.159-183

LANCASTER, K. K. A Review of the influence of environment humidity and water on friction, lubrication and wear. *Tribology International*, vol 23, n° 6, 1990, pp.371389

LEE, L-H. Effect of surface energetics on polymer friction and wear. *ASTM, STP*, pp. 31-68

LUDEMA, K. C. & TABOR, D. The friction and the visco-elastic properties of polymeric solids. *Wear*, 9 (1966), p. 329-348

MA, K-X., HO, C-H., ZHU, F. & CHUNG, T-S. Investigation of surface energy for organic light emitting polymers and indium tin oxide. *Thin Solid Films*, vol 371, 2000, pp, 140-147

MAKINSOM, K. R. & TABOR, D. The friction and transfer of PTFE. *Proceedings Royal Society London*, ser A, 281 (1964) p. 49-61

MALAY, K. K. & BAHADUR, S. An investigation of the temperature rise in polymer-metal sliding. *Wear*, 82 (1982), p. 81-92

MANO, E. B. *Introdução Aos Polimeros*. Editora Edgard Blucher LTDA. (1994), p. 12-29

MARCUS, K., BALL, A & ALLEN, C. - The effect of the grinding direction on the nature of the transfer film formed during the sliding wear of UHMWPE against stainless steel. *Wear*, 151 (1991) p. 323-336

MATWEB. <http://www.matweb.com.co>.

MCLAREN, K. G. & TABOR, D. Friction of polymers at engineering speeds: influence of speed, temperature and lubricants. *Wear*, 8 (1965), p. 79-83

MCNICOL, A., DOWSON, D. & DAVIES, M. The effect of humidity and electrical fields upon the wear of high density polyethylene and polytetrafluoroethylene. *Wear*, vol 181-183 (1995), pp. 603-612

- MEYERS, M.A., CHAWLA, K.K. **Mechanical Behaviour of Materials**. Prentice Hall, 1999.
- MOORE, D. F. **Principles And Applications Of Tribology**. Pergamon Press, 1a Ed.,(1975),p. 1-86
- NEWBY, C. & WEAVER, G. **Materials Principals And Practice**. Butterworth-Heinemann Ltd (1990) p. 293-340
- OMAR, M. K., ATKINS, G. & LANCASTER, J. K. The role of crack resistance parameters in polymer wear. **Journal of Physics D: Applied Physics**, vol 19, 1986, pp. 177-195
- PINTAÚDE, G.; SINATORA, A. Avaliação da dureza como critério para determinação do regime de desgaste abrasivo In. **55° Congresso Anual Da ABM, 2000**, Rio de Janeiro 55° Congresso da ABM - CD Rom, 2000
- RABINOWICZ, E. Friction and wear of metals. **Metals Engineering Quarterly**. ASM, 1967, pp. 4-8
- RABINOWICZ, E. Influence of surface energy os friction and wear phenomena. **Journal of Applied Physics**, vol 32, n°8, 1961, pp. 14401445
- RABINOWICZ, E. Practical uses of the surface energy criterion. **Wear**, vol 7, 1964. pp. 9-22
- RAY, M. S. **Engineering Experimentation. Ideas, Techniques And Presentation**. McGraw-Hill Book Company (1988), p. 124-153
- RHEE, S. H. & LUDEMA, K. C. Mechanism of formation of polymeric transfer films. **Wear**, 46 (1978), p. 231-240.
- RUBEM, G. C., BLANCHET, T. A. & KENNEDY, F. E., Formation of UHMWPE polymeric transfer on sliding glass counterface: early and steady-state studied by

- transmission electron microscopy . *Journal of Materials Science* , 28 (1993) p. 1045-1058
- SANTNER, E. & CZICHOS, H. Tribology of polymers. *Tribology International*, 22 (1989) no 2, pp 103-109
- SILVA, C. H., TANAKA, D. K. & SINATORA, A. Friction coefficient between high density polyethylene on galvanized steel – preliminary results? *Wear*, vol. 225-229, 1999, parte I, pp. 339 a 342.
- SPEERSCHNEIDER, C. J. & LI, C. H. - Some observations on structure of PTFE. *Journal of Applied Physics*, vol 33, n. 5 (1962) p. 1871-1874
- STILLWELL, N.A., TABOR, D., Elastic recovery of conical indentations, *Proc. Phys. Soc. London*, v. 78, 1961, pp.169-179.
- SUH, N. P. & TURNER, A. L. *Elements of mechanical behavior solids*. Scripta Book Company / Washington, D.C. Chap. VI, p. 293-361: Visco-elastic-plastic deformation of polymers, Chap. X, p.526-536: friction behavior of polymers
- TANAKA, K. Transfer of semycrystalline polymers sliding against a smooth steel surface. *Wear*, 75 (1982) p. 183-199
- TANAKA, K., OCHIYAMA, Y. & TOYOOKA, S. - The mechanism of wear of PTFE. *Wear*, 23 (1973) p. 153-172
- TANAKA, K. & YAMADA, Y. Effect of sliding speed on transfer and wear of semicrystalline polymers sliding against smooth steel surface. *WOM*, p. 617-624
- TICONA LLC. *Technical Literature Library*. Version 1.0. Em CD-ROM. (2002)
- TSCHIPTSCHIN, A. P., BETANCUR, A. T., FALLEIROS, N. A., AMBROSIO FILHO, F., RODRIGUES, D., LIBERATTI, J. F. Resistência à corrosão de aços inoxidáveis nitrogenados obtidos por metalurgia do pó In: 55º Congresso anual da ABM, 2000, Rio de Janeiro. *Anais do 55º Congresso anual da ABM*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000

- THORP, J. Friction of some commercial polymer-based bearing materials against steel. *Tribology International*, April (1982), p. 69-74
- TORO, A. O. Microestrutura e propriedades de superfície de aços inoxidáveis martensíticos com elevado teor de nitrogênio. Tese de Doutorado. PMT-FPUSP, 2001.
- VINOGRADOV, G. V., MUSTAFAEV, V. A. & PODOLSKY, YU. YA. A study of heavy metal-to-plastic friction duties and of the wear of hardened steel in the presence of polymers, *Wear*, 8 (1965), p. 358-373
- WANG, Q., KONG, X. ZHU, L. & FAN, Y. A study on the tribological behavior of polyethylene. II. Effects of operating conditions on the friction behavior of polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, vol 58, 903-910, (1995)
- WEICK, B. L. & BRUSHAN, B. The relationship between dynamic mechanical behavior, transverse curvature and wear of magnetic tapes. *Wear*, 202 (1996) p. 17-29
- WEICK, B. L. & BRUSHAN, B. The tribological and dynamic behavior of alternative magnetic tape substrates. *Wear*, 190 (1995) p. 28-43
- WETTON, R. E.. *Development in Polymer Characterization* Vol. 5. Chapter 5 Dynamic Mechanical Thermal Analysis of polymer and related systems. Editado por Dalkins, J. V, Elsevier Applied Science Publishers, 1986, pp179-221
- WILLIAMS, *Engineering Tribology*. Oxford University Press, (1996).
- YAMAGUCHI, Y. *Tribology of plastic materials - Their characteristics and applications to sliding components*. Tribology series, 16. Elsevier Science Publishers B.V. (1990) - p. 93-143
- YOUNG, R. P.; LOVELL, P. A. *Introduction To Polymers*. Second Edition. Chapman & Hall, (1991), p. 310-428
- ZHANG. State of the art of polymers tribology. *Wear*, 190 (1998) p. 28-43

