

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

CARLOS HENRIQUE DA SILVA

**ESTUDO DO EFEITO DA CARGA NORMAL E DA VELOCIDADE NO
COEFICIENTE DE ATRITO DO PAR POLIETILENO DE ALTA
DENSIDADE E AÇO CARBONO GALVANIZADO**

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

**SÃO PAULO
1998**

of

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

CARLOS HENRIQUE DA SILVA

**ESTUDO DO EFEITO DA CARGA NORMAL E DA VELOCIDADE NO
COEFICIENTE DE ATRITO DO PAR POLIETILENO DE ALTA
DENSIDADE E AÇO CARBONO GALVANIZADO**

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. Amilton Sinatora

**SÃO PAULO
1998**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010164

**À MINHA ESPOSA ANDRÉA
AOS MEUS PAIS ANTONIO CARLOS E MARIA EPHYGÊNIA
ÀS MINHAS IRMÃS DENISE E LEILA CARLA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DO EFEITO DA CARGA NORMAL E DA VELOCIDADE NO COEFICIENTE DE ATRITO DINÂMICO DO PAR POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E AÇO CARBONO GALVANIZADO

Carlos Henrique da Silva

ERRATAS

Página 96

Tabela 4. 1 - Coeficiente de atrito dinâmico para diversas condições PV.

Carga [N]	Velocidade [m/s]	PV [kW/m ²]	Coeficiente de atrito
0,5	0,03	2	0.13
0,5	0,1	7	0.19
2	0,03	8	0.14
2	0,1	28	0.24
10	0,03	42	0.24
5	0,03	21	0.21
5	0,1	71	0.257
20	0,03	85	0.262
10	0,1	141	0.267
2	1	283	0.26
20	0,1	283	0.286
5	1	708	0,29
10	1	1415	0.33
20	1	2829	0.356

Página 97

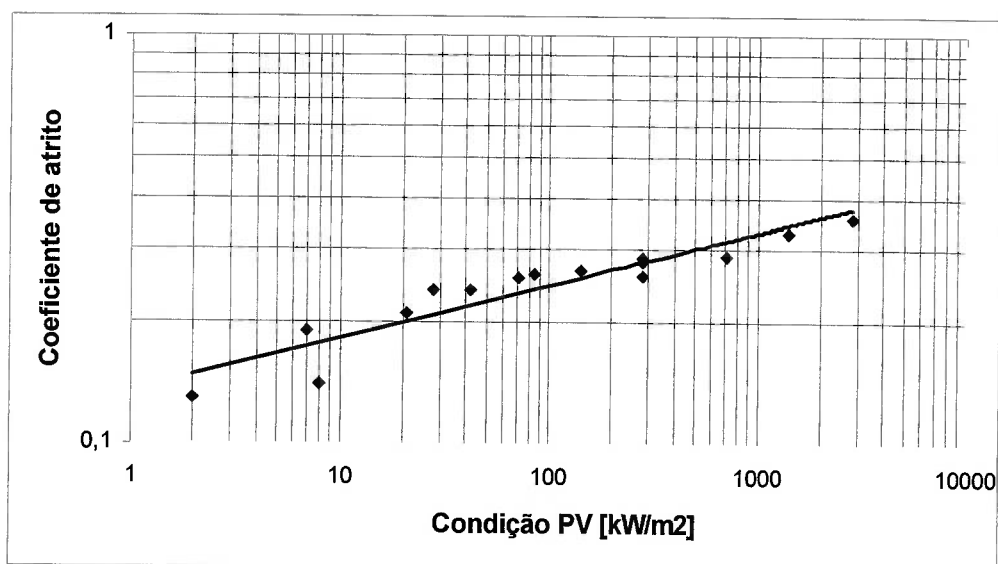


Figura 4. 1 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da condição PV.

Página 106

$$\mu = C \cdot \left(\frac{P}{E \cdot r^2} \right)^x \cdot \left(\frac{v \cdot \rho^2 \cdot \gamma^2}{\tau_e^2} \right)^{y/2} \cdot \left(\frac{v \cdot Cp^2}{k^2} \right)^{y/2} \quad \text{Eq. 4. 1}$$

Página 108

$$\mu = C \cdot \left(\frac{P}{E \cdot r^2} \right)^{0,152} \cdot \left(\frac{v \cdot \rho^2 \cdot \gamma^2}{\tau_e^2} \right)^{0,055} \cdot \left(\frac{v \cdot Cp^2}{k^2} \right)^{0,055} \quad \text{Eq. 4. 2}$$

Tabela 4. 2- Constante de atrito para cada valor de coeficiente de atrito dinâmico.

Velocidade [m/s]	Carga [N]	Coeficiente de atrito	Constante de atrito (C)
1	2	0,26	0,13
1	5	0,29	0,12
1	10	0,33	0,13
1	20	0,356	0,12
0,1	0,5	0,19	0,15
0,1	2	0,24	0,15
0,1	5	0,257	0,14
0,1	10	0,267	0,13
0,1	20	0,286	0,13
0,03	0,5	0,13	0,11
0,03	2	0,14	0,10
0,03	10	0,24	0,13
0,03	5	0,21	0,13
0,03	20	0,262	0,13

Da Tabela 4.11, tem-se que o valor da constante de atrito é:

$$C = 0,13 \pm 0,01$$

Página 109

$$\mu = (0,13 \pm 0,01) \cdot \left(\frac{P}{E \cdot r^2} \right)^{0,152} \cdot \left(\frac{v \cdot \rho^2 \cdot \gamma^2}{\tau_e^2} \right)^{0,055} \cdot \left(\frac{v \cdot Cp^2}{k^2} \right)^{0,055} \quad \text{Eq. 4. 3}$$

$$\begin{array}{ccc} \left(\frac{P}{E \cdot r^2} \right)^{0,152} & \left(\frac{v \cdot \rho^2 \cdot \gamma^2}{\tau_e^2} \right)^{0,055} & \left(\frac{v \cdot Cp^2}{k^2} \right)^{0,055} \\ \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow \\ \text{Deformação} & \text{Adesão} & \text{Térmico} \end{array}$$

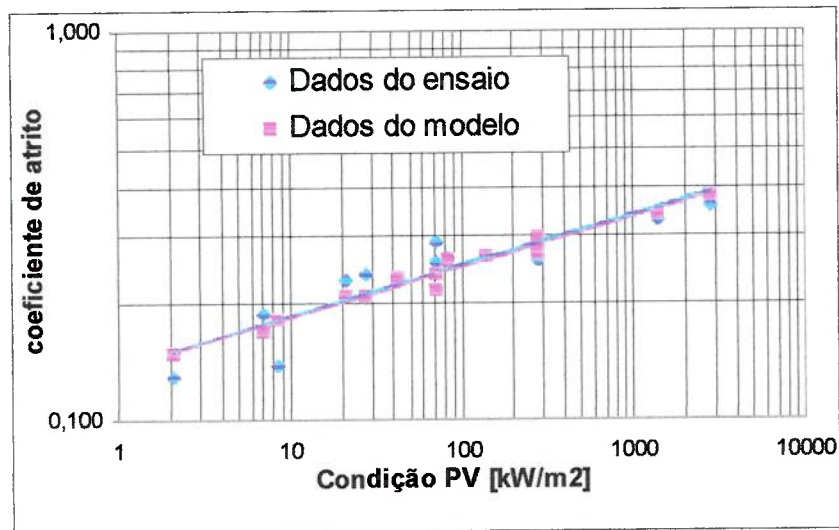


Figura 4. 2 - Comparação entre os resultados dos ensaios de coeficiente de atrito

▪ **Página 110 – 3ª linha**

A literatura tem mostrado que o coeficiente de atrito é diretamente proporcional à tensão de escoamento por cisalhamento^{10, 15, 21, 24, 27}, porém na determinação dos grupos adimensionais, esta variável está presente no denominador do modelo.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

RESUMO

“ABSTRACT”

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Os materiais poliméricos	4
2.1.1 Conceitos básicos	4
2.1.1.1 Classificação dos polímeros	5
2.1.1.2 Taticidade	7
2.1.1.3 Cristalinidade e orientação	8
2.1.1.4 Temperatura de fusão e temperatura de transição vítrea.	10
2.1.2 Comportamento Viscoelástico	11
2.1.2.1 Fluência	11
2.1.2.2 Recuperação	15
2.1.2.3 Relaxação de tensão	16
2.1.3 Espectro de energia de amortecimento	18

"O fato é um aspecto secundário da realidade"

Mario Quintana

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Amilton Sinatora, pela orientação e estímulo para a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Doutor Deniol Katsuki Tanaka, pela valiosa colaboração na realização deste trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Fenômenos de Superfície pelo apoio recebido.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pelo patrocínio no projeto temático nº 94/3529-0 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela bolsa de estudos concedida no processo 136086/95-0.

À PIRELLI CABOS S.A. pela colaboração, dentro do projeto de desenvolvimento de métodos de previsão de vida útil de produtos da linha petróleo-offshore, com a doação dos corpos-de-prova polimérico empregado na pesquisa.

Ao Professor Doutor Marcelo Carvalho Reis e ao Professor Doutor André Paulo Tschiptschin, pela colaboração nas discussões do trabalho.

Ao Professor Doutor Walter Francisco de Arruda Alves Filho, pela colaboração nos ensaios de rugosidade.

À equipe do Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, pela colaboração nas preparações de amostras e nas medições de dureza, em especial ao Professor Doutor André Paulo Tschiptschin e à técnica Márcia Ribeiro.

À equipe do Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, pela colaboração na realização das análises por calorimetria diferencial de varredura, em especial ao Professor Doutor Jorge Alberto Soares Tenório e ao Mestre em Engenharia Alexandre Martins Barros.

À equipe do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP, pela colaboração nas análises por microscopia eletrônica de varredura, em especial ao seu coordenador Professor Doutor Henrique Kahn e à Geóloga Sandra Garcia Gabas.

À equipe da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico Aeroespacial, pela colaboração nas análises por microscopia eletrônica de varredura, em especial à Doutora Mirabel Cerqueira Rezende e à Mestre em Ciências Elizabeth G. C. Salgado.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

2.1.4	Viscoplasticidade	23
2.1.4.1	Deformação plástica nos cristais de polímeros	23
2.1.4.2	Deformação plástica em polímeros semi-cristalinos	26
2.2	Atrito por deslizamento	28
2.3	Atrito nos polímeros	34
2.3.1	Introdução	34
2.3.2	Fatores que afetam o coeficiente de atrito	39
2.3.2.1	Velocidade de deslizamento	39
2.3.2.2	Carga aplicada	41
2.3.2.3	Temperatura de contato	42
2.3.2.4	Umidade Relativa	45
2.3.2.5	Rugosidade	46
2.4	Modelos de coeficiente de atrito dinâmico	47
2.4.1	Introdução	47
2.4.2	Modelos de coeficiente de atrito dinâmico da literatura	49
2.4.2.1	Modelo de SHOOTER (1952)	49
2.4.2.2	Modelo de KING; TABOR (1953)	50
2.4.2.3	Modelo de LODGE; HOWELL (1954)	50
2.4.2.4	Modelo de PASCOE; TABOR (1956)	52
2.4.2.5	Modelo de RABINOWICZ (1961)	53
2.4.2.6	Modelo de COHEN; TABOR (1966)	54
2.4.2.7	Modelo de BAHADUR; LUDEMA (1971)	55
2.4.2.8	Modelo de WEST; SENIOR (1972)	55
2.4.2.9	Modelo de SUH; TURNER (1976)	57

2.4.2.10	Modelo de SPURR (1982)	58
2.4.2.11	Modelo de MADAKSON (1983)	59
2.4.2.12	Modelo de BASSANI, DI PASQUALE; VITALI (1984)	61
2.4.2.13	Modelo de HUTCHINGS (1992)	64
2.4.3	Análise dos modelos da literatura	66
3	- MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1	Materiais	70
3.2	Métodos	71
3.2.1	Preparação dos pinos de PEAD	71
3.2.2	Preparação dos discos de aço galvanizado	73
3.2.3	Caracterização dos pinos de PEAD	73
3.2.4	Caracterização dos discos de aço galvanizado	74
3.2.5	Montagem do ensaio pino-contra-disco	75
3.2.6	Medição da temperatura no contato	79
4	- RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	Caracterização dos corpos-de-prova	81
4.2	Temperatura no contato	82
4.3	Análise da rugosidade dos discos	85
4.4	Efeito da carga e da velocidade no coeficiente de atrito dinâmico	88
4.4.1	Análise dos resultados de coeficiente de atrito dinâmico	88
4.4.2	Efeito da Condição PV (PRESSÃO-VELOCIDADE)	96
4.5	Efeito da umidade relativa no coeficiente de atrito	97
4.6	Discussão do modelo de LODGE & HOWELL	102
4.7	Modelo de coeficiente de atrito dinâmico	104

5 - COMENTÁRIOS FINAIS	111
6 - CONCLUSÕES	113
7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
ANEXO 1	116
ANEXO 2	119
ANEXO 3	121
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

Lista de Figuras

- Figura 1. 1 - Economias decorrentes do emprego de conceitos de tribologia, em milhões de libras esterlinas com valores de 1966. 1
- Figura 2. 1 – Representação esquemática de polímeros (a) linear, (b) ramificado, (c) com ligações cruzadas e (d) com estrutura molecular em rede. 6
- Figura 2. 2 – Estereotaticidade do propileno. (a) formação isotática, (b) Sindiotática e (c) atática. 7
- Figura 2. 3 - Modelo da micela franjeada. 8
- Figura 2. 4 - Modelos de polímeros semi-cristalinos. (a) estrutura esferulítica, com um esferulito em detalhe (b) modelo da cadeia dobrada. 9
- Figura 2. 5 - Representação esquemática do efeito da temperatura em função do volume. (a)material amorfo, (b)material semi-cristalino. 11
- Figura 2. 6 - Curva típica de fluência em ensaio a temperatura constante. 12
- Figura 2. 7 - Flexibilidade de fluência $J(t)$ em função do tempo. 15
- Figura 2. 8- Curva típica de relaxação de tensão. 16
- Figura 2. 9- Módulo de relaxação de tensão $G(t)$ em função do tempo de observação. 17
- Figura 2. 10 - Pêndulo de torção simples e curva amplitude-tempo para o livre decaimento de uma oscilação torcional. 18
- Figura 2. 11 – Variação da tensão e da deformação com o tempo para um material viscoelástico, mostrando o ângulo de fase δ e a frequência de oscilação ω . 19

Figura 2. 12 - Resposta dinâmica de um copolímero de estireno e butadieno, sem ligações cruzadas, revelando a dependência entre a temperatura e G' , G'' e Δ .	21
Figura 2. 13 - Espectro de energia de amortecimento de polímeros amorfos e semi-cristalinos com relação à temperatura de transição vítrea (T_g).	22
Figura 2. 14 – Representação esquemática de um cristal de polímero (a) e a estrutura do cristal após deslizamento em uma de suas direções (b).	24
Figura 2. 15 – Microscopia eletrônica de varredura mostrando uma macla em um cristal de poli(diacetileno).	25
Figura 2. 16 – Ilustração esquemática da mudança de morfologia do esferulito durante o estiramento a frio de um polímero semi-cristalino.	27
Figura 2. 17 – Representação esquemática dos mecanismos de deformação plástica atuando em um polímero semi-cristalino.	28
Figura 2. 18 - Fenômeno de crescimento de junção, sendo F - força tangencial e P - carga normal aplicada.	34
Figura 2. 19 - A origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica.	35
Figura 2. 20 - Coeficiente de atrito por rolamento e fator de perda viscoelástica $\delta/G-1/3$ em função da temperatura..	37
Figura 2. 21 - Modelo de deslizamento entre as macromoléculas de PE.	38
Figura 2. 22 - Comportamento da área real e da tensão de cisalhamento em função da velocidade de deslizamento.	40
Figura 2. 23- Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento para polímeros semi-cristalinos.	40

Figura 2. 24 – Relação entre coeficiente de atrito dinâmico e carga para várias velocidades de deslizamento (poliamida e aço).	41
Figura 2. 25 - Coeficiente de atrito em função da temperatura no contato para diversos polímeros em ensaios pino-contra-disco.	43
Figura 2. 26 - Curva de temperatura no contato (T) pelo tempo para condições PV cada vez mais elevadas.	44
Figura 2. 27 - Relação entre coeficiente de atrito dinâmico e umidade relativa para o Poliamida 6, Poliamida 12 e PEBD.	46
Figura 2. 28 - Variação do coeficiente de atrito com a carga normal de cilindros cruzados de PMMA com diferentes acabamentos superficiais: (a)torneado e (b)polido.	47
Figura 2. 29 - Coeficiente de atrito dinâmico entre aço inoxidável 316 e filme de poliéster para quatro diferentes tipos de ensaios.	48
Figura 2. 30 - Ensaios comumente utilizados para medir o coeficiente de atrito de plásticos.	48
Figura 2. 31 - contato entre uma superfície rugosa e um plano elástico (polímero).	62
Figura 3. 1 - Fotografia do disco de aço galvanizado (1), lixa d'água cortada em forma de disco (2) e pino de PEAD com 3 mm de diâmetro (3).	72
Figura 3. 2 - Equipamento de ensaio pino-contra-disco.	75
Figura 3. 3 - Sistema pino-contra-disco.	76
Figura 3. 4- Detalhes da célula de carga (1), sistema de carregamento (2) e sensor de nível de bolha (3).	78
Figura 3. 5 - Equipamento pino-contra-disco com campânula de acrílico.	79

Figura 3. 6 - Montagem para medição de temperatura na ponta do pino de PEAD com medidor de temperatura (1), fio de termopar (2) e mandril com pino (3).	80
Figura 3. 7 - Esquema mostrando termopar, pino e disco.	80
Figura 4. 1- Micrografia da camada galvanizada das chapas de aço, Nital 1% (500 x).	82
Figura 4. 2- Temperatura medida pelo termopar colocado a 1,5 mm da superfície do pino de PEAD em função do tempo de ensaio para ensaios com carga de 20 N e velocidade de deslizamento de 1 m/s.	83
Figura 4. 3 – Dependência dos estados físicos dos polímeros de acordo com T_m e T_g em função do peso molecular.	84
Figura 4. 4 - Detalhe da superfície de desgaste, mostrando ondulação provocada por deformação plástica (500 x). A seta indica o sentido de deslizamento.	85
Figura 4. 5 - Micrografia da superfície do disco apresentando a presença de filme de transferência de PEAD (1580 x).	87
Figura 4. 6 – Desgaste e coeficiente de atrito de termoplásticos em função da rugosidade da superfície do contra-corpo.	88
Figura 4. 7 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da distância de deslizamento para velocidade de 1 m/s e 0.5 N de carga aplicada.	90
Figura 4. 8 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da carga aplicada para 0,03 ; 0,1 e 1 m/s.	91
Figura 4. 9 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento do PEAD contra aço inoxidável.	91
Figura 4. 10 - Micrografia da superfície do pino de PEAD mostrando intensa deformação plástica e a propagação de trincas.	93

Figura 4. 11 – Espectro de energia de amortecimento ($\text{tg } \delta$) em função da temperatura para o PEAD, apresentando a T_g , T_m do PEAD e a faixa de temperatura alcançada durante os ensaios.	94
Figura 4. 12 - Classificação geral sobre mecanismos de dissipação de energia responsáveis pelo atrito e pelo desgaste de polímeros.	95
Figura 4. 13 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da condição PV.	97
Figura 4. 14 - Coeficiente de atrito dinâmico e umidade relativa em função da distância de deslizamento, (a) $P = 0,5 \text{ N}$, (b) $P = 2 \text{ N}$, (c) $P = 10 \text{ N}$ e (d) $P = 20 \text{ N}$.	99
Figura 4. 15 – Regimes de lubrificação para o deslizamento de metais em função do quociente entre a espessura do filme lubrificante e a rugosidade do contra-corpo.	101
Figura 4. 16 - Força de atrito em relação à carga aplicada, mostrando a curva de ajuste para 3 níveis de velocidade.	103
Figura 4. 17 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da carga aplicada para 3 níveis de velocidade.	106
Figura 4. 18 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento, para 4 níveis de carga aplicada.	107
Figura 4. 19 - Comparação entre os resultados dos ensaios de coeficiente de atrito dinâmico com o modelo proposto, em relação à condição PV.	109

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 - Regiões de transição de polímeros.	22
Tabela 2. 2 – Detalhes dos parâmetros da estrutura cristalina do polietileno.	26
Tabela 2. 3 - Tabela de parâmetros para o PE.	57
Tabela 2. 4 – Restrições aos modelos encontrados na literatura.	67
Tabela 2. 5 - Crítica aos modelos encontrados na literatura.	68
Tabela 3. 1- Propriedades do polietileno de alta densidade.	70
Tabela 3. 2- Propriedades do aço galvanizado.	71
Tabela 4. 1 - Propriedades medidas do PEAD.	81
Tabela 4. 2 - Propriedades do aço galvanizado.	81
Tabela 4. 3- Resultados da análise térmica por DSC para o PEAD.	83
Tabela 4. 4- Parâmetros de rugosidade da superfície da chapa de aço galvanizado antes dos ensaios.	86
Tabela 4. 5 – Valores médios e desvios-padrão do parâmetro de rugosidade Ra das pistas de contato medidos após os ensaios.	86
Tabela 4. 6 - Coeficiente de atrito dinâmico entre PEAD e aço galvanizado.	89
Tabela 4. 7 - Coeficiente de atrito dinâmico para diversas condições PV.	96
Tabela 4. 8- Valores médios de coeficiente de atrito dinâmico, umidade relativa e temperatura ambiente para diversas condições de velocidade e carga.	98

Tabela 4. 9- Coeficiente de atrito e índice de atrito para diversas velocidades de deslizamento.	103
Tabela 4. 10 - Valores dos expoentes x e y obtidos das funções de ajuste das Figuras 4.17 e 4.18.	107
Tabela 4. 11- Constante de atrito para cada valor de coeficiente de atrito dinâmico.	108

ABREVIACÕES

ASTM – American Society for Testing Materials

DSC – Calorimetria diferencial de varredura

HV – Dureza Vickers

LFS – Laboratório de Fenômeno de Superfície

PA – Poliamida

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEUAPM – Polietileno de ultra alto peso molecular

PMMA – Poli(metacrilato de metila)

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PTFE – Poli(tetraflúoro-etileno)

PVC – Poli(cloreto de vinila)

PMC-EPUSP – Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PMI-EPUSP – Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PMT-EPUSP – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PV – pressão-velocidade

U.R. – Umidade Relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω - adesão

Φ - amplitude de oscilação

δ - ângulo de fase

Θ - ângulo de inclinação das asperezas

μ - coeficiente de atrito dinâmico

ν - coeficiente de Poisson

α - constante

α_t - nível de significância

π - constante Pi

Δ - decremento das medidas de amortecimento

ε - deformação

ρ - densidade

σ - tensão

σ_{dp} - desvio padrão

γ - energia superficial

ω - frequência de pulsação

τ - tensão de cisalhamento

$\Delta\mu$ - incerteza de medição

τ' - tempo de atraso

σ' - tensão pulsante em fase com σ_0

τ'' - tempo de relaxação

σ'' - tensão pulsante fora de fase com σ_0

ε_0 - deformação provocada pela tensão pulsante

σ_{dp} - desvio-padrão

σ_0 - tensão pulsante

σ_A - constante que dependem da área de aplicação da força

β_a - fator de amortecimento

α_d - ângulo do deslizador cônico

β_d - fator de autocorrelação de decaimento

ΔE - diferença nos valores de entalpia de fusão

τ_e - resistência ao escoamento por cisalhamento

σ_e - tensão normal de escoamento

β_{ed} - fração de energia dissipada

β_f - índice força-área

β_h - constante hidrostática

μ_p - componente do coeficiente de atrito relativa à deformação

μ_r - coeficiente de atrito dinâmico por rolamento

μ_s - componente do coeficiente de atrito relativa à adesão

α_t - nível de significância do t de Student.

A - área real de contato

a,b - constantes de material

A_f - área de contato para uma da força de atrito

A_i - área aparente de contato inicial

A_o - área de contato sob carga normal

B_n, B_s e B_p - constantes que dependem de característica mecânicas dos polímeros e das condições de contato

C - constante de atrito

c.d.p. - corpo-de-prova

C_p - calor específico

CR - capacitivo - resistivo

C_t - constante topográfica

C_T - constante térmica

D - diâmetro

E - módulo de elasticidade

$E \{ \}$ - valor da esperança matemática

E^* - módulo de elasticidade absoluto

E' - módulo de armazenamento (em fase com E^*)

E'' - módulo de perda (fora de fase com E^*)

E_d - energia de deformação

F - força de atrito

f_a - fator de atrito

F_f - força de atrito finita

F_p - componente de sulcamento da força de atrito

F_s - componente de cisalhamento da força de atrito

G - Módulo de cisalhamento

$G(t)$ - módulo de relaxação de tensão

G' - módulo de cisalhamento em fase

G'' - módulo de cisalhamento fora de fase

G_r - módulo de relaxação de tensão

H - dureza

H - índice geométrico

H_1 - hipótese alternativa

H_o - hipótese existente

$J(t)$ - função flexibilidade de fluência

k - condutividade térmica

K_1, K_2, K_3 e K_4 - constantes dimensionais

k_c - parâmetro de contato

K_d - constante dependente das dimensões e propriedades de esferas ou cilindros

K_v - constante elástica volumétrica

L_c - comprimento de corte

L_m - comprimento de medição

L_r - comprimento de ruptura

m_2 - segundo momento espectral do perfil de distribuição de altura de asperezas

m_4 - terceiro momento espectral do perfil de distribuição de altura de asperezas

m_0 - momento espectral zero do perfil de distribuição de altura de asperezas

n - índice de atrito

N - número de asperezas em contato

n_1 e n_2 - número de amostras da população

P - carga normal aplicada

P^* - pressão normal aplicada

Pe - número de PECLET

P_{HV} - penetração em ensaio de dureza Vickers

Q - área deformada

R - raio

R^2 - coeficiente de correlação

r - raio das asperezas

R_a (CLA) - rugosidade média do perfil de alturas a partir de uma linha média

R_q (RMS) - rugosidade média quadrática o perfil de alturas

R_y - altura máxima entre pico e vale

$RzDIN$ - média das alturas de pico à vale

s - resistência ao escoamento por cisalhamento das junções

s_1 e s_2 - variância das amostras

S_m - distância média entre cristas do perfil na linha média

T - período de oscilação

t - tempo

T_b - temperatura do volume (bulk) a uma distância a da superfície de contato

T_c - temperatura no contato

T_g - temperatura de transição vítrea

T_j - tempo necessário para rompimento das junções

T_m - temperatura de fusão

T_{me} - temperatura média do volume abaixo da região de contato

T_o - tempo necessário para rompimento do corpo de prova no ensaio de tração

T_R - parâmetros envolvendo forças de superfície

v - velocidade

W_{ab} - trabalho de adesão

x , y e z - coeficientes de inclinação

x_1 e x_2 - média da população

RESUMO

Com o objetivo de verificar a influência da carga aplicada e da velocidade de deslizamento, no coeficiente de atrito dinâmico, foram realizados ensaios com um tribômetro do tipo pino-contra-disco, na configuração de pino de polietileno de alta densidade (PEAD) e disco de aço carbono galvanizado.

A temperatura na interface, calculada segundo o modelo de ARCHARD, não ultrapassou 45 °C e, a análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC) mostrou que não houve fusão na superfície do pino. Por outro lado, a diminuição na entalpia de fusão, indica a possibilidade de diminuição na cristalinidade, alteração da orientação das cadeias moleculares ou quebra de cadeias durante os ensaios.

A dissipação de energia produzida pelo atrito dinâmico, pode ter ocorrida por mecanismos de deformação viscoelástico ou viscoplástico, além do mecanismo de adesão, com a ocorrência esporádica de filmes de transferência na superfície do disco.

O coeficiente de atrito dinâmico pode ser influenciado pela umidade relativa do ambiente dependendo das condição PV (pressão-velocidade).

Também foi realizada uma revisão dos modelos de coeficiente de atrito dinâmico da literatura e proposto um modelo baseado nos resultados experimentais do presente trabalho.

ABSTRACT

In order to verify the influence of applied load and sliding velocity on dynamic friction coefficient pin-on-disk tribometer with high-density polyethylene (HDPE) pin on galvanized steel disc configuration was used.

The interface temperature calculated applying Archard model was below 45 °C and differential scanning calorimetry (DSC) results showed no melting on polymer surface. On the other hand, decrease on fusion enthalpy could indicate decrease on crystallinity degree, on molecular chain alignment modification or chain rupture during the tests.

The dynamic friction energy dissipation could occur via viscoelastic or viscoplastic deformation mechanisms, with occasional polymer film transfer from pin surface to the galvanized steel disk by adhesion mechanism.

The dynamic friction coefficient can be affected by ambient relative humidity depending on PV (pressure times velocity) values.

It is also presented review of friction coefficient models from the literature and it is proposed a friction coefficient model based on these work experimental results.

1 - INTRODUÇÃO

A tribologia é definida como a ciência que estuda o atrito, a lubrificação e o desgaste de superfícies de engenharia, com o objetivo de entender as interações entre os materiais em contato, podendo assim maximizar a sua aplicação.¹ O tribologista trabalha com o conceito de interdisciplinaridade, pois necessita integrar conhecimentos de física, química, mecânica, termodinâmica e ciências dos materiais.

Com os avanços tecnológicos do fim do milênio e com a crescente preocupação com os recursos energéticos do planeta, o estudo da tribologia torna-se essencial. A Figura 1.1 mostra um estudo realizado em 1966 na Inglaterra sobre a economia de recursos da indústria local, com investimento em tribologia.²

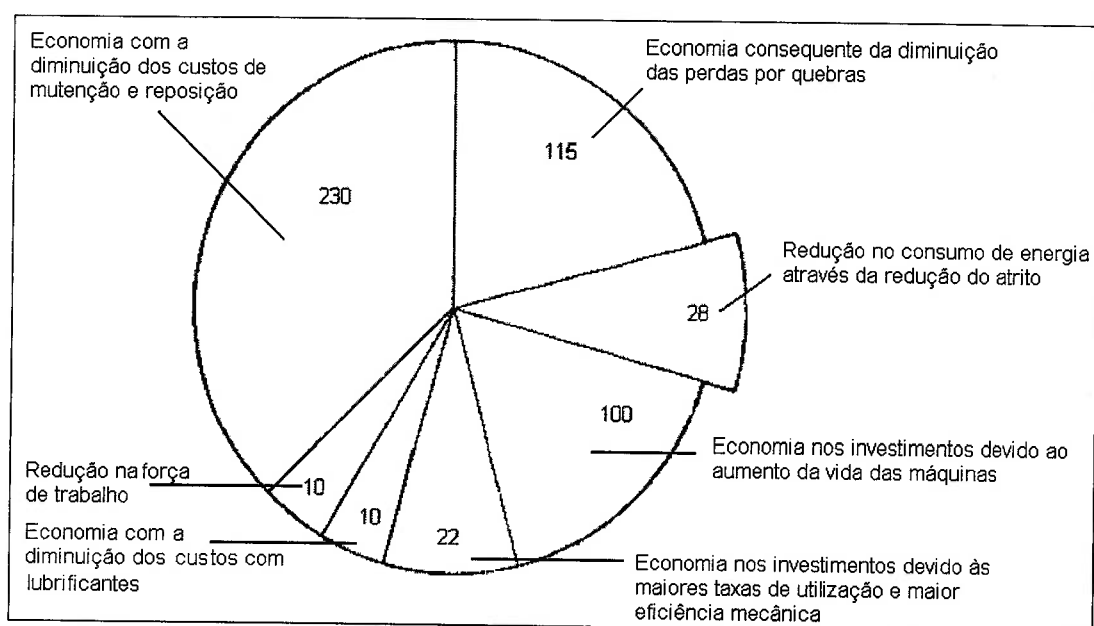


Figura 1. 1 - Economias decorrentes do emprego de conceitos de tribologia, em milhões de libras esterlinas com valores de 1966.²

Nas últimas décadas, tem-se visto uma crescente aplicação de materiais poliméricos em substituição aos materiais tradicionais, principalmente os metais. No Brasil, o segmento da indústria de plásticos tem consumido a média anual de 2,6 bilhões

de toneladas de termoplásticos na produção de artefatos que vão desde itens convencionais, como utensílios domésticos, aos mais sofisticados. Dentre estes, as aplicações em engenharia ocupam papel importante no desenvolvimento do país.³

Um setor de grande destaque que vem ano a ano investindo na aplicação de polímeros em seus produtos é a indústria automobilística. O Poliamida 6.6, por exemplo, é utilizado em componentes que suportam elevadas temperaturas nos compartimentos cada vez menores dos motores veiculares. É também utilizado nos coletores de admissão, tampas de comando de válvulas e jogos de pedais. Atualmente, sabe-se que 50% da produção de Poliamida 6 (PA6) está sendo empregada na produção de autopeças.⁴

Entre as aplicações de materiais poliméricos em componentes de sistemas tribológicos podem ser citados os rotores de bombas, válvulas, engrenagens, fusos, mancais, freios, cames, anéis de pistão, selos e pisos, além de aplicações agrárias e na indústria siderúrgica. A utilização de polímeros em prótese de articulações e válvulas cardíacas artificiais são alguns exemplos de aplicação destes materiais nas ciências médicas. Não se pode esquecer da vasta aplicação dos elastômeros, principalmente na fabricação de pneus e na indústria de mineração, onde sua utilização em correias, classificadores e separadores, reduz o desgaste a quase zero.⁵

Os modelos matemáticos que representam o comportamento de pares tribológicos podem ser usados como ferramentas para a seleção de materiais, projeto de equipamentos e em sistemas de manutenção preditiva e produtiva.

Atualmente, ainda são utilizados em aplicações com polímeros modelos de atrito propostos inicialmente para o contato entre metais. Porém, a tendência é buscar a determinação de novos modelos que considerem as propriedades mecânicas, físicas e

químicas dos polímeros, conseguindo assim melhores resultados quanto à previsão dos valores de coeficiente de atrito. No projeto de tubos para a extração de petróleo em plataformas *off-shore* é extremamente importante a modelagem do comportamento tribológico dos polímeros, uma vez que a obtenção de dados em protótipos seria muito demorada e onerosa.

Esses tubos são fabricados com camadas alternadas e coaxiais de materiais poliméricos e metálicos. Em campo, os movimentos provocados pelas ondas e correntes marítimas, provocam internamente ao tubo, movimento relativo entre camadas, e conseqüentemente o atrito entre partes metálicas e poliméricas. Logo, o estudo do atrito e do desgaste destes materiais é bastante relevante para o projeto estrutural e para a análise da estabilidade dinâmica dos cabos.

O objetivo deste trabalho é estabelecer relações entre o coeficiente de atrito dinâmico, a carga normal e a velocidade de deslizamento entre polietileno de alta densidade (PEAD) e aço carbono galvanizado, materiais constitutivos dos tubos para a extração de petróleo.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os materiais poliméricos

Dentre os materiais utilizados em diversas aplicações de engenharia, os polímeros vêm assumindo um papel de destaque, devido às suas características mecânicas e físico-químicas, tais como: baixa densidade, melhor processabilidade, possibilidade de reciclagem, resistência à corrosão, baixo custo, reprodutibilidade dimensional e resistência a ataques químicos.

Apesar das diferenças químicas e físicas entre materiais metálicos e poliméricos, muitas vezes são aplicados princípios baseados no comportamento dos metais na determinação de características tribológicas dos polímeros. Não é considerado também, que os metais possuem um comportamento elástico à temperatura ambiente, enquanto que os polímeros têm características de materiais elásticos e viscosos; sendo por isso denominados viscoelásticos. O comportamento viscoelástico não depende apenas do estado de tensões a cada instante, mas também de toda a história do carregamento imposto ao componente polimérico.

Descreve-se a seguir as características dos polímeros responsáveis pelo seu comportamento diferenciado em relação aos metais e, em particular, no que se refere ao coeficiente de atrito.

2.1.1 Conceitos básicos

Polímero é uma palavra de origem grega e significa: muitos membros (partes), ou seja, estes materiais possuem moléculas longas constituídas de diversas unidades de repetição ou meros (monômeros).⁶ O número de moléculas de monômeros que se

combinam para formar as moléculas de polímeros são da ordem de 100.000. Assim o termo macromolécula é frequentemente aplicado aos polímeros. O peso molecular de um polímero é um parâmetro importante que tem forte influência nas suas propriedades.

O processo que promove a união dos monômeros para a formação dos polímeros é chamado de polimerização. A reação de polimerização pode ocorrer por adição ou por condensação.⁷

2.1.1.1 Classificação dos polímeros

Os polímeros podem ser classificados, dependendo das ligações atômicas das macromoléculas, da seguinte maneira:⁸

a) Polímeros lineares: são aqueles nos quais os monômeros se unem linearmente em cadeias simples. Estas cadeias são flexíveis e podem ser representadas esquematicamente como mostra a Figura 2.1 (a). As cadeias adjacentes, porém, se mantêm juntas por ligações secundárias relativamente fracas (forças de Van der Waals).

b) Polímeros ramificados: durante a polimerização, pequenos ramos se conectam à cadeia principal (Figura 2.1 (b)). Estes ramos são considerados partes das cadeias principais resultantes de reações laterais que ocorrem durante a sintetização do polímero.

c) Polímeros com ligações cruzadas: nestes polímeros, as cadeias laterais adjacentes se ligam a outras cadeias em várias posições através de ligações covalentes (Figura 2.1 (c)). O processo é conseguido durante a polimerização ou por reações químicas irreversíveis em altas temperatura, que adicionam átomos ou moléculas a estrutura polimérica.

d) Polímeros em rede: os monômeros com três ligações covalentes ativas ou trifuncional, formam polímeros com estrutura tridimensional (Figura (d)). Este tipo de estrutura limita fortemente o escorregamento entre as moléculas.

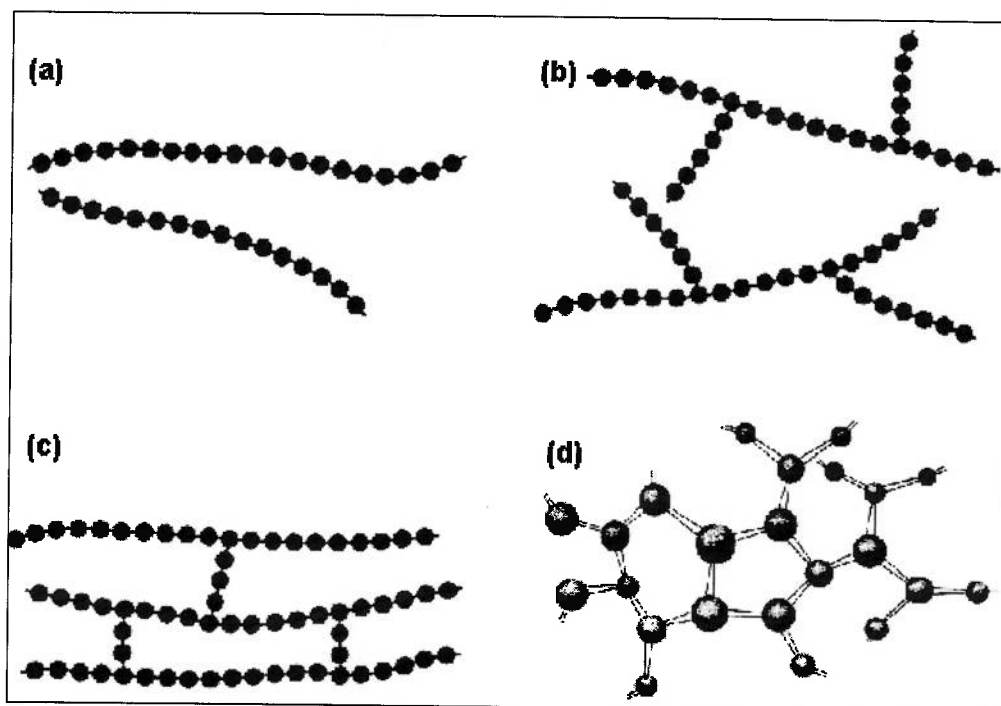


Figura 2. 1 – Representação esquemática de polímeros (a) linear, (b) ramificado, (c) com ligações cruzadas e (d) com estrutura molecular em rede.⁸

Nos polímeros as ligações primárias entre os átomos da cadeia são ligações fortes devido ao compartilhamento de elétrons entre seus átomos. De modo geral e, em especial para os termoplásticos, a intensidade das ligações entre cadeias podem estar associadas ao coeficiente de atrito. Quanto maior o nível de ligações cruzadas mais difícil será o movimento entre cadeias adjacentes e assim, as propriedades mecânicas e o atrito serão profundamente alteradas. A classificação de polímeros mencionada anteriormente tem uma relação muito forte com a frequência de ligações cruzadas, pois os termoplásticos, teoricamente, não apresentam ligações cruzadas, ao contrário dos termorrígidos que possuem uma estrutura tridimensional. Já os elastômeros possuem um nível intermediário de ligações cruzadas.

2.1.1.2 Taticidade

Polímeros com a mesma composição química, podem apresentar configurações macromoleculares diferentes em relação à cadeia principal. Estas diferenças de configurações são descritas pela palavra taticidade.^{6,9}

Existem três maneiras pelas quais um grupo lateral assimétrico pode se agrupar com relação à cadeia principal, mostradas na Figura 2.2 .

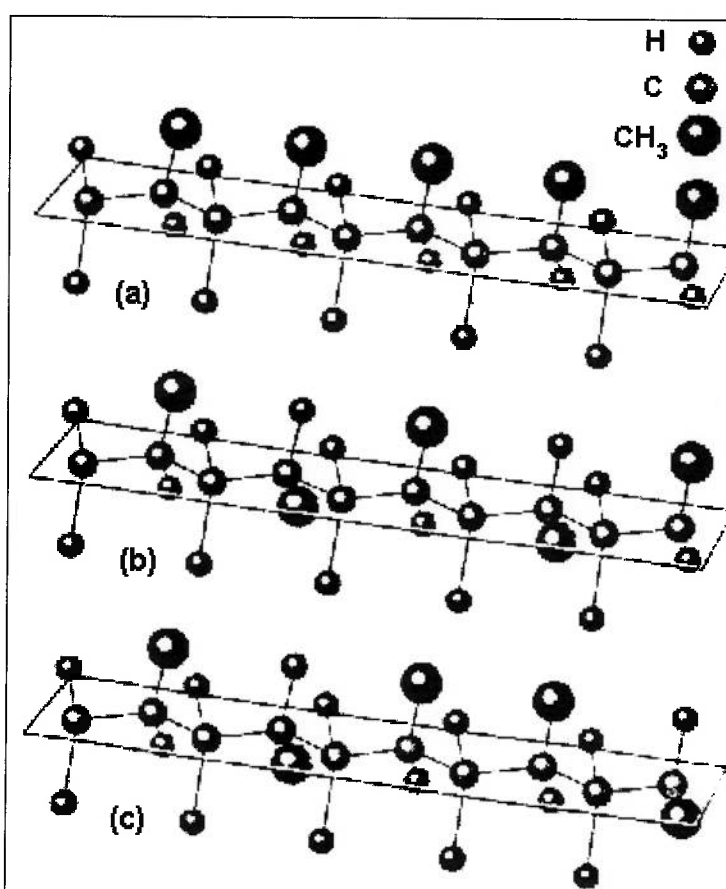


Figura 2. 2 – Estereotaticidade do propileno. (a) formação isotática, (b) Sindiotática e (c) atática.⁹

A taticidade possui papel fundamental, tanto no grau de cristalinidade do polímero, quanto no coeficiente de atrito. sabe-se que polímeros com configurações atáticas apresentam maior dificuldade de deslizamento entre suas moléculas, conduzindo assim, a maiores valores de coeficiente de atrito.¹⁰

2.1.1.3 Cristalinidade e orientação

Uma propriedade muito importante nos termoplásticos é o seu grau de cristalinidade. Regiões cristalinas (cristalitos) são formadas quando um número suficiente de cadeias se aproximam uma das outras de forma que as forças de ligação secundárias possam sobrepor o efeito desordenante da energia térmica.⁶

Cristalitos são regiões ou volumes de matéria em que as unidades estruturais, sejam átomos, íons, meros ou moléculas, são arranjadas em um sistema regular geométrico.¹¹ Os cristalitos são da ordem de várias centenas de nanômetros.

Um modelo de cristalinidade que tem sido utilizada há muito tempo é o da micela franjeada (Figura 2.3).

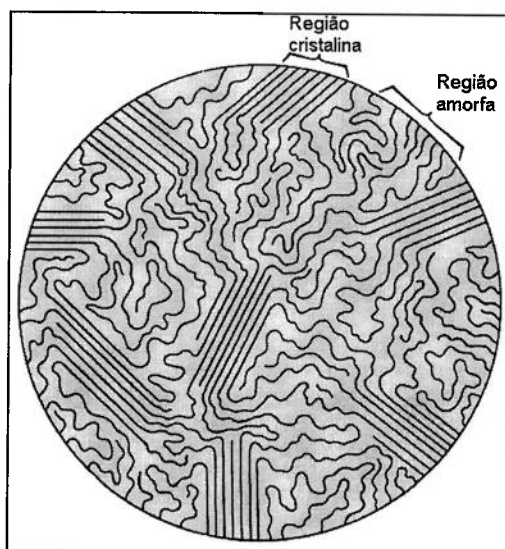


Figura 2. 3 - Modelo da micela franjeada.¹²

As cadeias poliméricas são muito maiores que as dimensões de um cristalito, podendo uma cadeia passar de uma região cristalina para uma região amorfa, e atingir novamente uma outra região cristalina. Uma vez que uma cadeia polimérica individual passa aleatoriamente de uma região cristalina para outra, o modelo da micela franjeada explica porque um cristal polimérico perfeito nunca pode ser alcançado.⁷

A literatura mostra que monocristais de polímeros podem ser desenvolvidos através da cristalização lenta de uma solução polimérica diluída.⁷ Estes cristais se apresentam na forma de estrias finas ou lamelas com espessura de cerca de 10 nm. Por difração de elétrons pode ser observado que a cadeia do polímero nestas lamelas é perpendicular às faces planas da estria. 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 2.4 (b).

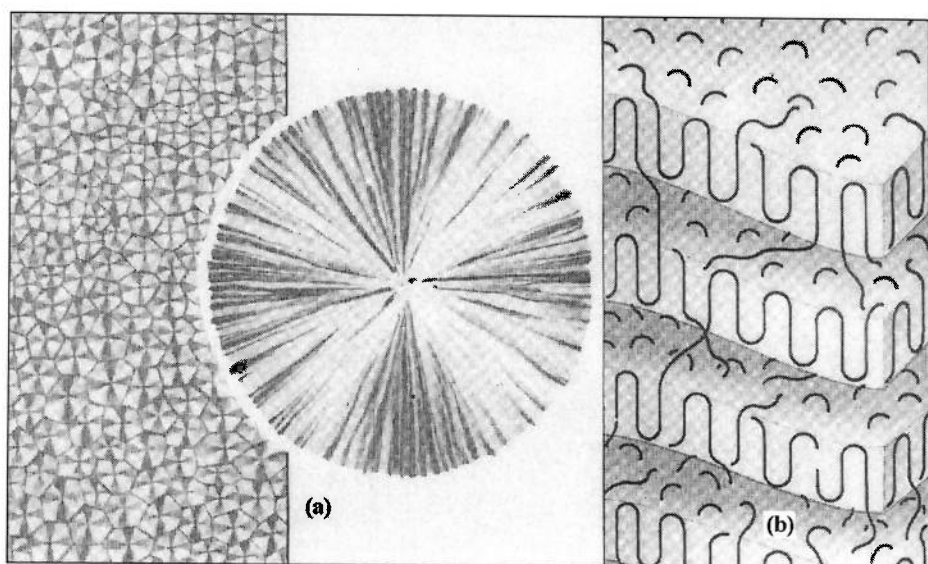


Figura 2. 4 - Modelos de polímeros semi-cristalinos. (a) estrutura esferulítica, com um esferulito em detalhe (b) modelo da cadeia dobrada.¹³

Os polímeros podem se cristalizar a partir do estado líquido em uma forma maciça através da formação de esferulitos. O esferulito é uma formação esférica que consiste de um agrupamento de cristais e regiões amorfas, que crescem radialmente a partir de um ponto de nucleação. Os esferulitos são formados por lamelas de cadeias dobradas, que ao se combinarem, formam uma unidade maior.

Eventualmente, os esferulitos tomam formas poliédricas devido a interferência mútua no crescimento, assemelhando-se aos grãos de um material policristalino. Cada

esferulito consiste de um grande número de cristalitos, enquanto que cada grão em um metal é um monocristal (Figura 2.4 (a)).

A cristalinidade possui papel importante no comportamento tribológico dos polímeros, principalmente no sentido de apresentar menores coeficientes de atrito em polímeros altamente cristalinos, como o PEAD, que pode apresentar até 95% de cristalinidade.¹¹

A orientação das cadeias moleculares além de aumentar a resistência mecânica e a dureza dos polímeros, provocam a diminuição no coeficiente de atrito. Fibras têxteis são orientadas mecanicamente pelo processo de estiramento ao longo do eixo da fibra. Isto é comumente chamado de estiramento (*drawing*) a frio ou a quente.^{14,15} A orientação mecânica de um polímero é usualmente feita próxima à temperatura de transição vítrea (T_g).

2.1.1.4 Temperatura de fusão e temperatura de transição vítrea.

A temperatura de transição vítrea é aquela na qual a mobilidade das cadeias moleculares se torna restrita pela coesão intermolecular, assim o material torna-se mais rígido. É nesta temperatura que o polímero faz a transição do estado de borracha ou viscoso para o estado vítreo (Figura 2.5).

Abaixo da T_g , as moléculas estão em um estado onde os movimentos moleculares como a rotação e a vibração são limitados. Acima de T_g , as moléculas possuem maiores níveis de energia e são possíveis movimentos de segmentos de uma molécula.

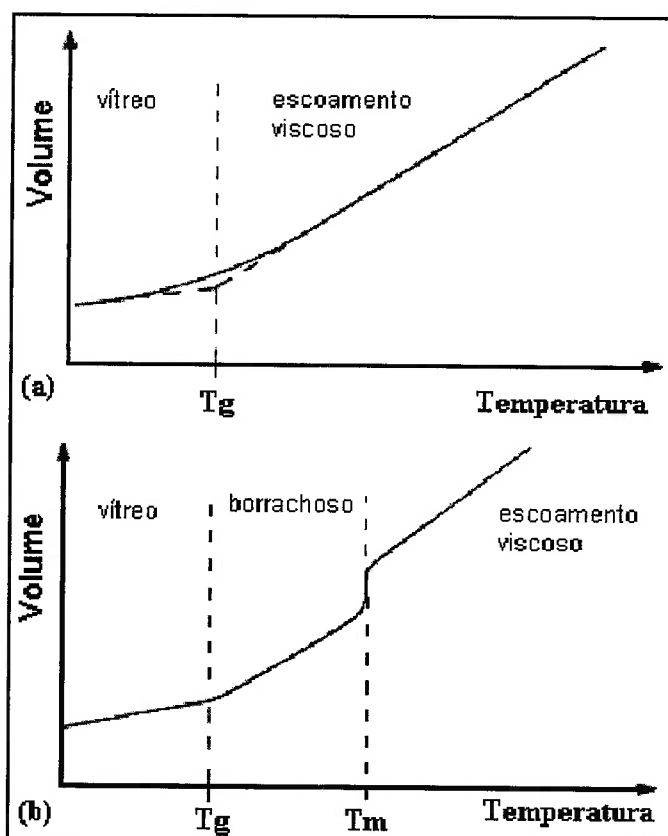


Figura 2. 5 - Representação esquemática do efeito da temperatura em função do volume. (a)material amorfo, (b)material semi-cristalino.⁹

A temperatura de fusão (T_m) é aquela na qual toda a cristalinidade desaparece, onde os cristalitos e esferulitos se desagregam e fundem.

Os polímeros amorfos não apresentam T_m , passando diretamente do estado vítreo para o de escoamento viscoso (Figura 2.5 (a)), já os polímeros semi-cristalinos apresentam o estado borrachoso entre T_g e T_m (Figura 2.5 (b)).

2.1.2 Comportamento Viscoelástico

2.1.2.1 Fluência

Fluência pode ser definida como uma lenta deformação plástica dependente do tempo, que ocorre em certos materiais quando submetidos a um carregamento constante.

Entre os materiais que apresentam este comportamento podem ser citados os metais a altas temperaturas, polímeros, concreto e outros.¹⁶

Um dos ensaios mais simples para se descrever o comportamento viscoelástico de materiais é o ensaio de fluência, no qual um carregamento trativo ou compressivo (constante durante o tempo de ensaio) é aplicado instantaneamente em um corpo-de-prova (c.d.p.), medindo-se a deformação deste corpo em função do tempo. Uma curva típica de fluência é mostrada na Figura 2.6.

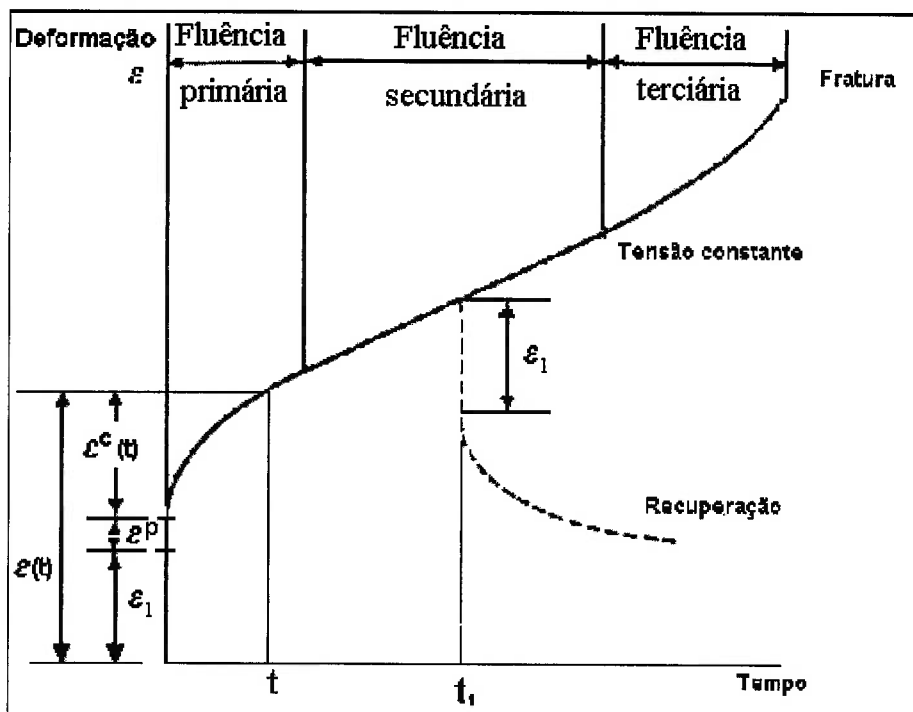


Figura 2. 6 - Curva típica de fluência em ensaio a temperatura constante.¹⁶

Verifica-se que a deformação inicial tem uma componente elástica ϵ_1 e, no caso da tensão aplicada exceder a tensão de escoamento do material, uma componente plástica ϵ^p . 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, $\epsilon^c(t)$.

Nota-se que a curva de fluência pode ser dividida em três partes distintas, conforme mostra a Figura 2.6. Na primeira parte da curva, onde se observa uma taxa de deformação de fluência decrescente no tempo, tem-se a região de fluência primária, (ou fluência transiente). Essa componente de deformação (ε_2) é devida à capacidade de alinhamento das cadeias moleculares quando submetidas a uma tensão.

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*). Essa componente de deformação (ε_3) está associada ao comportamento viscoso do material, decorrente do deslizamento entre as moléculas.

Finalmente, na terceira região, verifica-se um aumento na taxa de deformação, causado pela redução da área do c.d.p., até a fratura do material. Essa componente de deformação é denominada por ε^{ft} .

Desta forma tem-se:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 + \varepsilon^p + \varepsilon^c(t) \quad \text{Eq. 2. 1}$$

onde:

$$\varepsilon^c(t) = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon^{ft} \quad \text{Eq. 2. 2}$$

Para o modelamento do comportamento sob tensão com fluência, a componente de deformação plástica (ε^p) e a deformação sofrida na terceira região (ε^{ft}) foram desprezadas e assim, redefiniu-se a deformação total $\varepsilon(t)$ pela soma das três parcelas $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 , sendo definidas por:

ε_1 = deformação elástica instantânea;

ε_2 = deformação elástica atrasada;

ε_3 = deformação viscosa.

Se o material exibir um comportamento viscoelástico linear, a magnitude das deformações $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 será proporcional à magnitude da tensão aplicada. Pode-se então ser definida uma função flexibilidade de fluência $J(t)$, a qual será uma função apenas do tempo:

$$\varepsilon(t)/\sigma = J(t) = J_1 + J_2 + J_3 \quad \text{Eq. 2. 3}$$

onde J_1 , J_2 e J_3 correspondem a $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 , respectivamente.

A parcela J_3 é definida como escoamento viscoso e poderá ser desprezada para os seguintes casos:

- * polímeros rígidos a temperatura ambiente;
- * polímeros lineares amorfos a temperaturas abaixo de T_g ;
- * polímeros que apresentam muitas ligações cruzadas;
- * polímeros que apresentam alto grau de cristalinidade.

Os diversos estados físicos dos polímeros também podem ser visualizados através do tempo de observação do ensaio, mantendo-se a temperatura constante. A Figura 2.7 apresenta esquematicamente, a variação da flexibilidade de fluência $J(t)$ em função do tempo de ensaio, a uma temperatura constante, para um polímero idealizado que possui um único tempo de transição (tempo de atraso - τ').

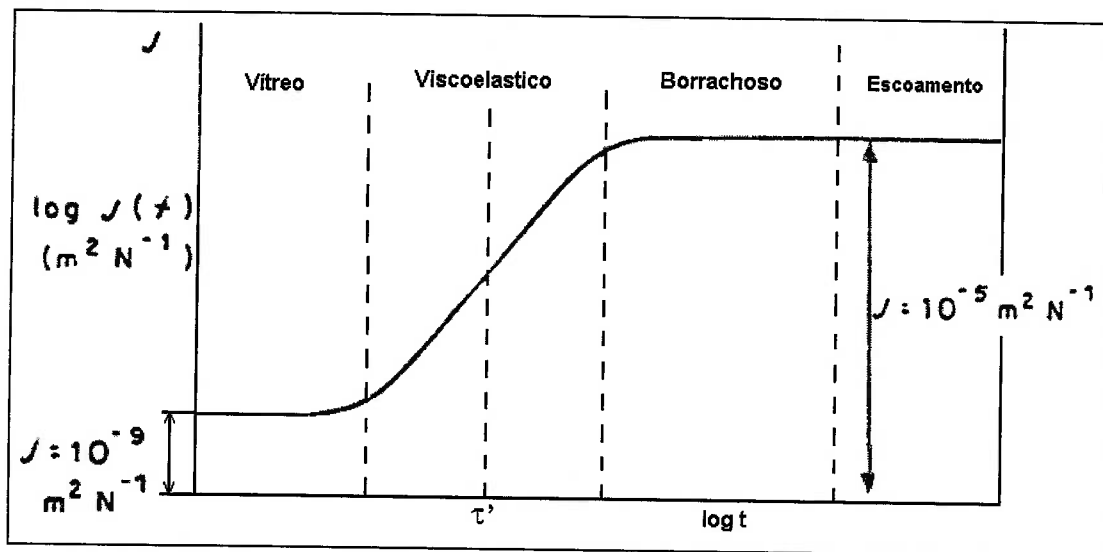


Figura 2.7 - Flexibilidade de fluência $J(t)$ em função do tempo.¹⁶

Nesta figura observa-se que para tempos muito pequenos a flexibilidade de fluência correspondente é da ordem de $10^{-9} m^2/N$, ou seja, aquela observada em polímeros no estado vítreo, a qual independe do tempo. Por outro lado, para tempos muito longos, a flexibilidade de fluência é da ordem de $10^{-5} m^2/N$, sendo novamente independente do tempo. Finalmente, para tempos de observações intermediários, a flexibilidade de fluência situa-se entre esses valores e é dependente do tempo, caracterizando o comportamento viscoelástico do material.

Isto sugere que o comportamento depende da escala do tempo com relação a um parâmetro temporal, que no caso da fluência, é chamado tempo de atraso τ' (*retardation time*) e seu valor, para um dado polímero, está relacionado a sua estrutura molecular.

2.1.2.2 Recuperação

Na Figura 2.6, mostra-se que com a remoção da carga em um instante genérico t_1 , o material irá recuperar parte da deformação sofrida, caracterizando o fenômeno da recuperação (*creep recovery*).

A curva de recuperação (linha tracejada) mostra que a deformação elástica ε_1 será recuperada instantaneamente, enquanto que apenas a parcela ε_2 será recuperada com o decorrer do tempo.

Dependendo da magnitude da tensão aplicada e do seu tempo de aplicação t_1 , a parcela correspondente ao escoamento viscoso ε_3 , não será recuperada e o material apresentará uma deformação permanente.

2.1.2.3 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). Medindo-se a tensão $\sigma(t)$, necessária para manter essa deformação em função do tempo, obtém-se uma curva como a da Figura 2.8.

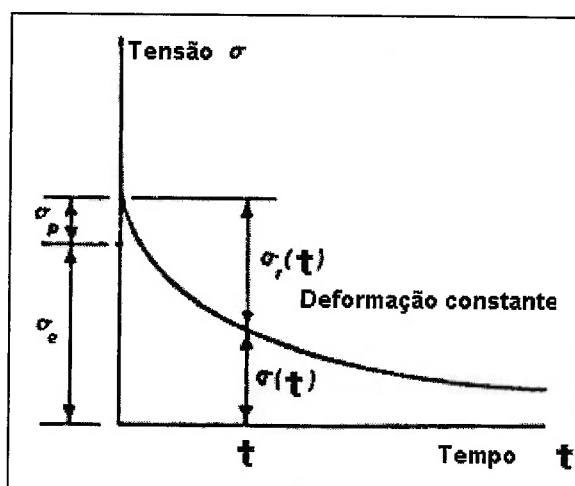


Figura 2. 8- Curva típica de relaxação de tensão.¹⁶

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, dada pela Equação 2.4:

$$G(t) = \sigma(t) / \varepsilon \quad \text{Eq. 2. 4}$$

No caso da relaxação de tensão, verifica-se que a presença ou ausência de deformação viscosa irá afetar o valor limite da tensão atuante no material.

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”.

A Figura 2.9 apresenta um diagrama esquemático do módulo de relaxação de tensão em função do tempo à temperatura constante, para um polímero ideal.

Nesta figura é definido um parâmetro temporal τ'' (tempo de relaxação) que irá caracterizar a escala do tempo para o comportamento viscoelástico do material.

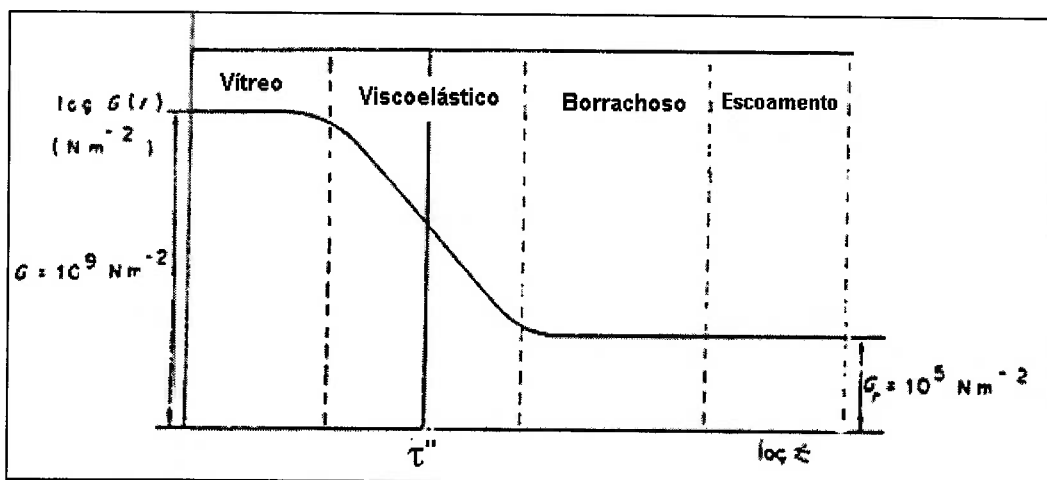


Figura 2. 9- Módulo de relaxação de tensão $G(t)$ em função do tempo de observação ¹⁶.

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.

2.1.3 Espectro de energia de amortecimento

Os ensaios dinâmicos são realizados para examinar os módulo de elasticidade dependente do tempo e os mecanismos de dissipação de energia.

Dois diferentes tipos de ensaios dinâmicos têm sido utilizados pelos pesquisadores.⁸ Um envolve a vibração livre de uma amostra, associada a um pêndulo torcional como mostrado na Figura 2.10.

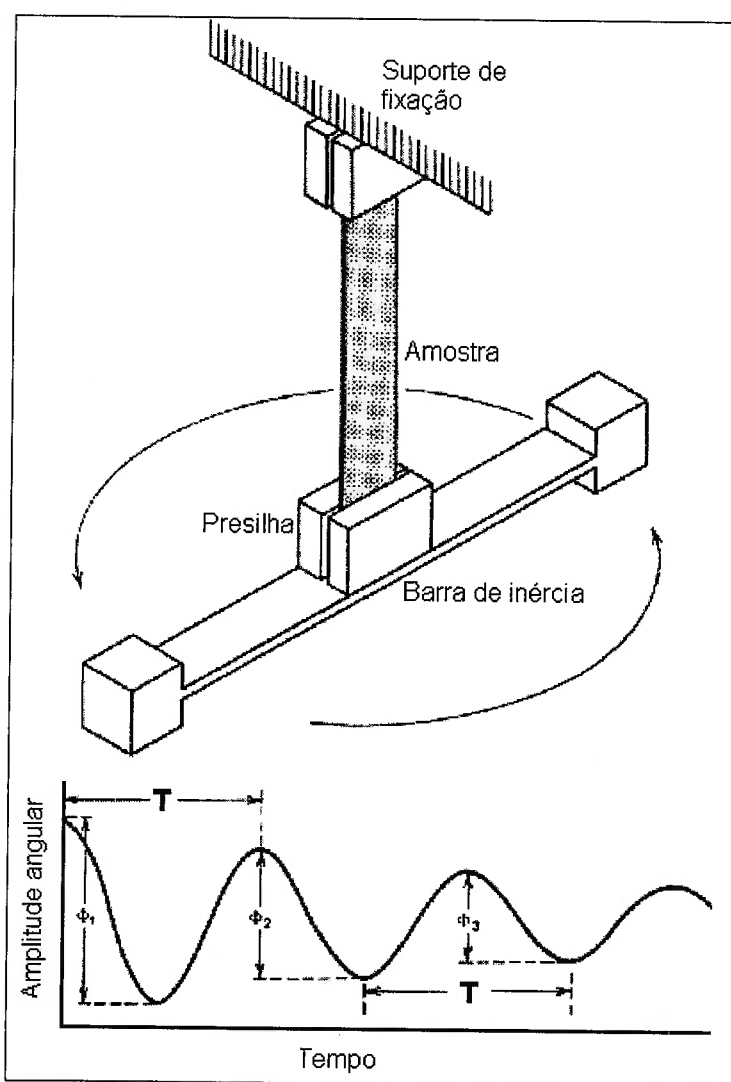


Figura 2. 10 - Pêndulo de torção simples e curva amplitude-tempo para o livre decaimento de uma oscilação torcional.⁸

A presilha é rotacionada para determinado ângulo e então é solta. Isto provoca uma oscilação da amostra, com um decréscimo de amplitude, para sucessivas oscilações. Esse decréscimo dado por:

$$\Delta = \ln \Phi_1/\Phi_2 = \ln \Phi_2/\Phi_3 = \dots = \ln \Phi_n/\Phi_{n-1} \quad \text{Eq. 2. 5}$$

onde : Δ = logaritmo neperiano do decremento das medidas de amortecimento;

$\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_n$ = amplitude de sucessivas oscilações da amostra oscilando livremente.

Desta forma, determina-se a rigidez da amostra para um período de oscilação T , o módulo de cisalhamento G varia com o inverso do quadrado de T .⁸

Em outro tipo de ensaio dinâmico, aplica-se em uma amostra uma força de vibração com diferentes frequências. O amortecimento é determinado através da relação entre a deformação e a tensão aplicada.

A relação entre os valores de tensões e de deformações são mostrados esquematicamente, na Figura 2.11. Nota-se que a deformação ϵ_o está atrasado em relação a tensão σ_o pelo ângulo de fase δ .

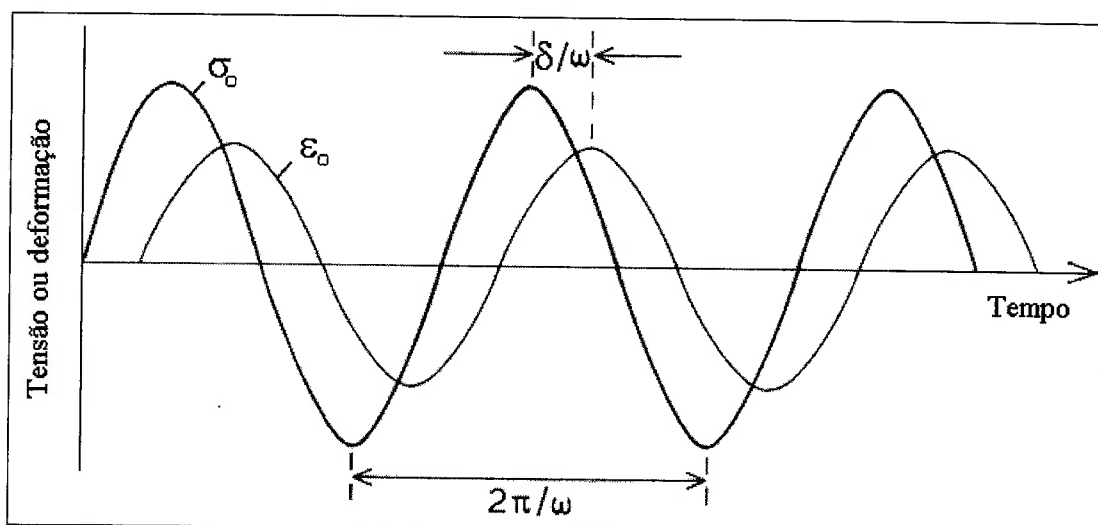


Figura 2. 11 – Variação da tensão e da deformação com o tempo para um material viscoelástico, mostrando o ângulo de fase δ e a frequência de oscilação ω .

Separando-se o vetor de tensão em componentes defasadas de 90° , tem-se:

$$\sigma' = \sigma_0 \cdot \cos \delta \text{ (componente da tensão em fase)} \quad \text{Eq. 2. 6}$$

$$\sigma'' = \sigma_0 \cdot \sin \delta \text{ (componente da tensão fora de fase)} \quad \text{Eq. 2. 7}$$

Os correspondentes módulos de elasticidade em fase e fora de fase com a deformação são determinados diretamente das equações 2.6 e 2.7:

$$E' = \sigma' / \varepsilon_0 = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cdot \cos \delta = E^* \cdot \cos \delta \quad \text{Eq. 2. 8}$$

$$E'' = \sigma'' / \varepsilon_0 = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cdot \sin \delta = E^* \cdot \sin \delta \quad \text{Eq. 2. 9}$$

onde:

$$E^* = \text{módulo de elasticidade absoluto} = (E'^2 + E''^2)^{1/2} \quad \text{Eq. 2. 10}$$

O módulo de elasticidade em fase com a deformação (E') reflete a resposta elástica do material, onde as componentes de tensão e deformação estão em fase. E' é chamado de módulo de armazenamento. Esta parte da energia de deformação, é introduzida no sistema pela aplicação de σ_0 . 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.

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

$$E''/E' = (E^* \cdot \sin \delta) / (E^* \cdot \cos \delta) = \text{tg } \delta \quad \text{Eq. 2. 11}$$

Por comparação com o ensaio do pêndulo torcional: ⁸

$$G''/G' \approx \Delta / \pi \quad \text{Eq. 2. 12}$$

Resultando em:

$$\Delta \approx \pi \cdot \text{tg } \delta \quad \text{Eq. 2. 13}$$

Sabe-se que os valores dos módulos de armazenamento e perda e a capacidade de amortecimento variam muito com a temperatura. A Figura 2.12, mostra uma correlação entre a queda em G' e a variação em G'' .

A Figura 2.12, mostra que a curva de amortecimento apresenta um valor máximo de acordo com o comportamento dos módulos G' e G'' com a variação de temperatura.

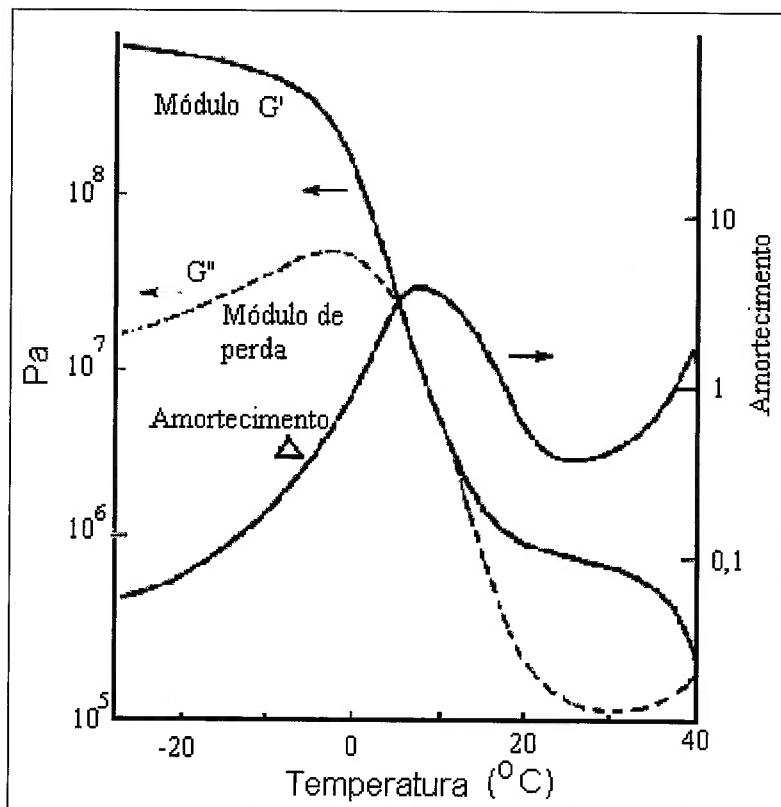


Figura 2. 12 - Resposta dinâmica de um copolímero de estireno e butadieno, sem ligações cruzadas, revelando a dependência entre a temperatura e G' , G'' e Δ .⁸

Quando os ensaios são realizados sobre uma ampla faixa de temperaturas, um dos múltiplos picos de relaxação secundários coincide com o pico de T_g . Na Figura 2.13, nota-se que a resposta de relaxação para polímeros amorfos e semi-cristalinos podem ser separados convenientemente em quatro regiões.

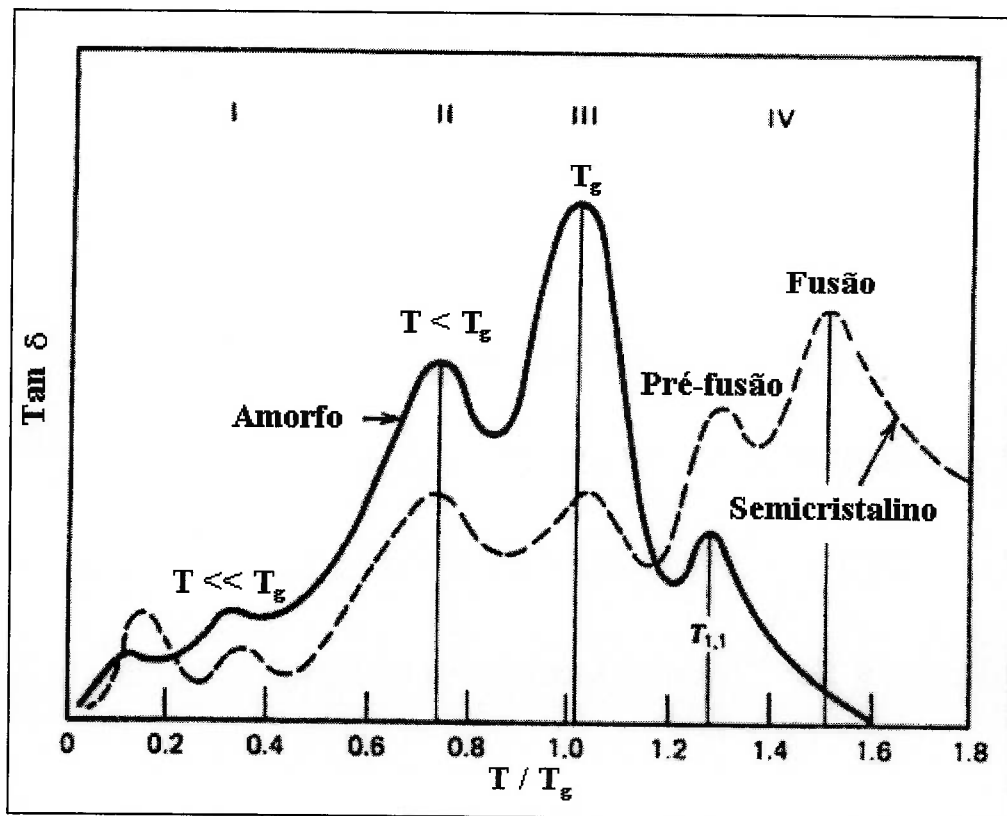


Figura 2. 13 - Espectro de energia de amortecimento de polímeros amorfos e semicristalinos com relação à temperatura de transição vítrea (T_g).⁸

A Tabela 2.1 apresenta uma relação entre os picos de relaxação com movimentos moleculares. No caso de polímeros cristalinos, é muito difícil explicar o comportamento viscoelástico (posição dos picos de relaxação) devido à complexidade de uma estrutura bifásica.

Tabela 2. 1 - Regiões de transição de polímeros.⁸

Região	Tempo de ocorrência	Causa
I	$T \ll T_g$ (pico γ)	Movimentos de pequenos grupos de moléculas
II	$T < T_g$ (pico β)	Movimento de 2 - 3 unidades de repetição
III	$T = T_g$ (pico α)	Movimentos coordenados de 10 - 20 unidades de repetição
IV	$T > T_g$	Movimentos moleculares em larga escala

2.1.4 Viscoplasticidade

As deformações que ocorrem num material qualquer ou são elásticas ou plásticas. Como o polímero apresenta comportamento viscoso este é designado viscoelástico quando a análise focaliza a região elástica da curva tensão deformação. Quando esta análise se concentra na região plástica da curva é conhecida como análise viscoplástica.

No deslizamento de polímeros semi cristalinos contra metais, a interface de deslizamento dos polímeros pode, dependendo dos esforços e da rugosidade, sofrer intensa deformação viscoplástica. Para o entendimento desta faz-se, a seguir uma breve apresentação dos mecanismos de deformação atuantes nos polímeros semi-cristalinos.

2.1.4.1 Deformação plástica nos cristais de polímeros

Existe evidências que os cristais poliméricos são capazes de se deformar plasticamente de forma similar a outros sólidos cristalinos, como metais e cerâmicas, apresentando mecanismos como: escorregamento, movimento de discordâncias, maclação e transformação martensítica.¹⁷ A principal diferença entre metais e polímeros está no fato da deformação plástica nos polímeros promover uma distorção nos cristalitos e não um rompimento deste, na realidade ocorre um rompimento nas ligações secundárias de Van der Waals.

A seguir, discute-se os mecanismos de deformação plástica dos cristais de polímeros. Posteriormente serão apresentados os mecanismos de deformação plástica dos polímeros semi-cristalinos:

- **Mecanismo de Escorregamento**

Assim como para os metais, a ductilidade dos polímeros depende muito do número de sistemas de escorregamentos presentes, porém a acomodação das moléculas nos cristais poliméricos, limita o número de planos e direções de deslizamento.

A Figura 2.14 mostra esquematicamente como as moléculas de polímero deslizam na direção paralela ao eixo de ordenação do cristal. Este fato pode ser verificado também na presença de altas deformações plásticas, como no estiramento a quente ou a frio, com a mudança de direção das moléculas.¹⁷

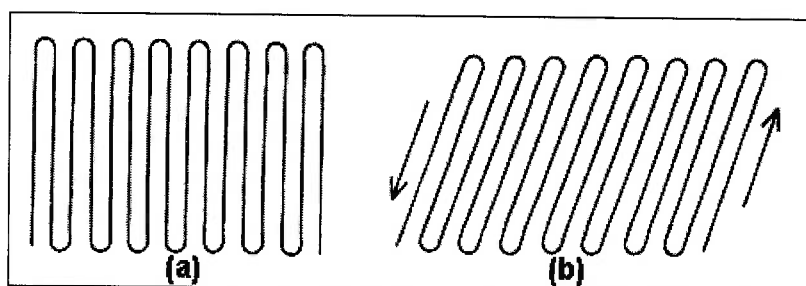


Figura 2. 14 – Representação esquemática de um cristal de polímero (a) e a estrutura do cristal após deslizamento em uma de suas direções (b).¹⁷

- **Movimentação de Discordâncias**

No estudo de cristais poliméricos, verifica-se a presença de defeitos pontuais (lacunas e átomos intersticiais) e discordâncias (cunha e hélice). Consequentemente, a aplicação de esforços neste cristais provoca deformação plástica por movimentação de discordância.

Assim como para os metais, no estudo da deformação plástica dos polímeros por movimentação de discordância, empregam-se conceitos como vetor de Burgers, cálculo de energia da discordância e direção de movimento.¹⁷ Sabe-se que este defeito ocorre favoravelmente em cristais com pequena espessura, onde o comprimento das linhas de

discordância são pequenos. As discordâncias ocorrem também em polímeros com baixo módulo de cisalhamento.

- **Maclação e Transformação Martensítica**

No estudo da deformação plástica de materiais metálicos e cerâmicos, são bastante conhecidos os mecanismos de maclação e transformação martensítica. Porém, no caso dos polímeros, ainda não está sedimentada uma teoria sobre como ocorrem estes mecanismos.

Atualmente, sabe-se que as maclas são formadas por cisalhamento sem rompimento ou distorção exagerada nas moléculas dos cristais de polímeros.¹⁷ Um bom exemplo de formação de maclas em cristais polimérico é obtido pela deformação de cristais de poli(diacetileno).¹⁷ A Figura 2.15 mostra a micrografia desses cristais indicando claramente a presença de macla, onde a direção das estrias definem o eixo das moléculas.

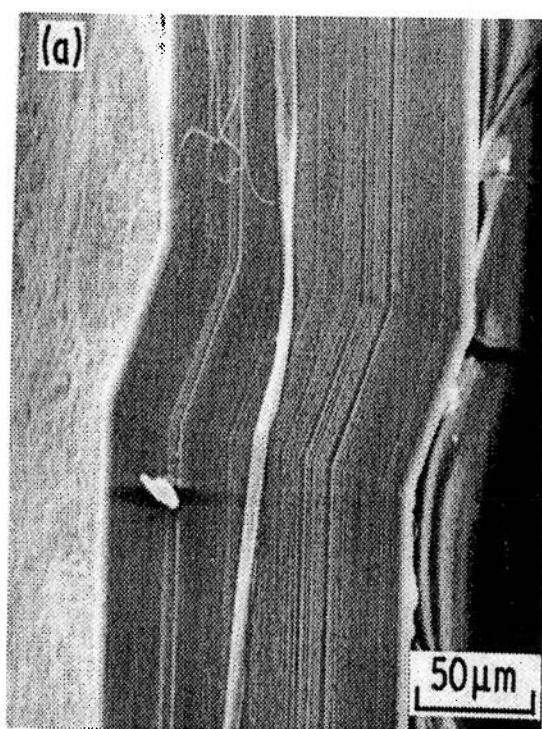


Figura 2. 15 – Microscopia eletrônica de varredura mostrando uma macla em um cristal de poli(diacetileno).¹⁷

A transformação martensítica tem sido pouco pesquisada em cristais poliméricos, mas sabe-se que é um mecanismo muito importante na deformação plástica do polietileno (PE).¹⁷

Durante o processo de cristalização do PE o polímero adquire a estrutura ortorrômbica. Após a atuação de intensa deformação plástica, verifica-se através de técnicas de difração de raios-X, que a estrutura cristalina do PE, antes ortorrômbica, transforma-se em estrutura monoclinica. A transformação ocorre devido ao cisalhamento da estrutura ortorrômbica. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros cristalinos do PE para a estrutura ortorrômbica e monoclinica.¹⁷

Tabela 2.2 – Detalhes dos parâmetros da estrutura cristalina do polietileno.¹⁷

Macromolécula	Sistema cristalino	Unidade	Unidade	Nº de unidades	Densidade
	Grupo espacial	Célula	Célula		(g/cm ³)
	Mol. em Hélice	Eixo	ângulos		
Polietileno I	Ortorrômbico	7,418	90 ^o	4	0,9972
-CH ₂ -	Pnam	4,946	90 ^o		
	1*2/1	2,546	90 ^o		
Polietileno II	Monoclinico	8,09	90 ^o	4	0,998
-CH ₂ -	C2/m	2,53	107,9 ^o		
	1*2/1	4,79	90 ^o		

2.1.4.2 Deformação plástica em polímeros semi-cristalinos

Os polímeros semi-cristalinos possuem uma estrutura complexa, consistindo de regiões cristalinas e amorfas. Os polímeros que apresentam esta configuração (ex.: PEAD) possuem uma região de trabalho entre as temperaturas T_g e T_m, pois abaixo de

T_g, estes materiais são muito frágeis e acima de T_m, se comportam como líquidos viscosos.

A Figura 2.16 mostra uma curva de tensão-deformação na região de trabalho, para um polímero semi-cristalino, indicando as mudanças que ocorrem na estrutura do esferulito, com a aplicação de esforços de tração.

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

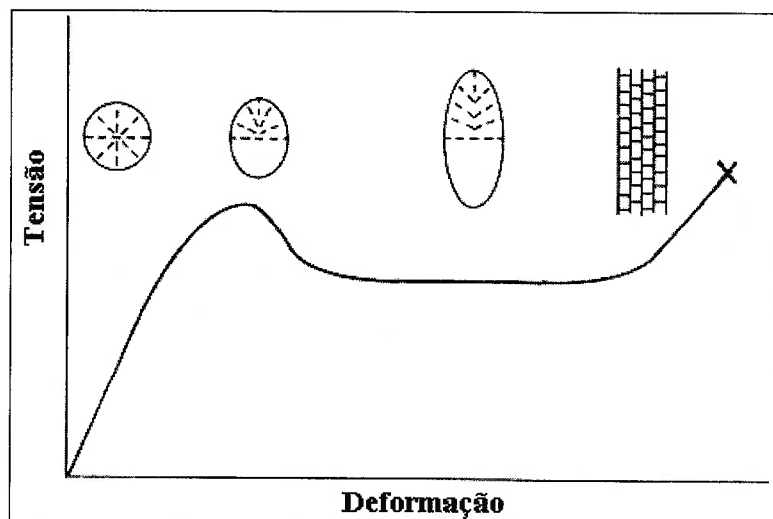


Figura 2. 16 – Ilustração esquemática da mudança de morfologia do esferulito durante o estiramento a frio de um polímero semi-cristalino.¹⁷

Quando os esferulitos são deformados homogeneamente, a deformação ocorre pela combinação de mecanismos de escorregamento, maclação e transformação martensítica.¹⁷ Além disto, a presença de regiões amorfas, facilitam o cisalhamento dos cristais.

A Figura 2.17 apresenta um possível mecanismo de deformação plástica para polímeros semi-cristalinos. O modelo apresenta uma dinâmica de deformação em quatro estágios:

- A – região cristalina antes da deformação;
- B – cristais deformando por escorregamento, maclação e transformação martensítica;
- C – quebra de cristais poliméricos e rompimento das moléculas;
- D – realinhamento da cadeias poliméricas na direção de deformação e formação de estrutura fibrilar.

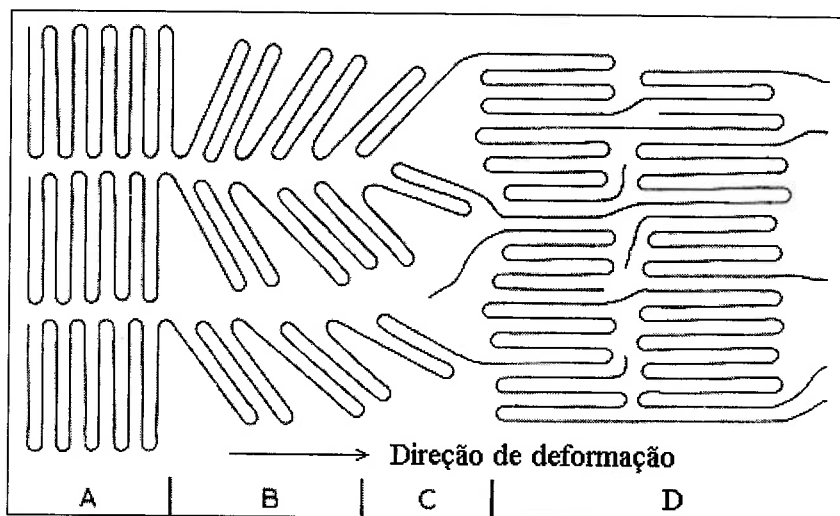


Figura 2. 17 – Representação esquemática dos mecanismos de deformação plástica atuando em um polímero semi-cristalino.¹⁷

Discute-se a seguir o atrito por deslizamento dos metais e polímeros com ênfase nos últimos.

2.2 Atrito por deslizamento

O fenômeno de atrito é conhecido desde os tempos mais remotos. Os egípcios utilizavam técnicas de lubrificação para diminuir o atrito entre os blocos de pedra utilizados na construção das pirâmides.¹⁸ DOWSON¹⁹ fez uma retrospectiva do desenvolvimento das teorias de atrito desde Leonardo Da Vinci, reconhecidamente o primeiro pesquisador do assunto.

O desenvolvimento cronológico do entendimento do atrito até o início do século XIX pode ser descrito esquematicamente da seguinte maneira:¹⁹

→ Leonardo Da Vinci (1495)

- força de atrito é proporcional à força normal;
- força de atrito independe da área de contato;
- força de atrito é igual a 0,25 da força normal.

→ Robert Hooke (1685)

- atrito por rolamento é menor para materiais com maiores módulo de elasticidade.

→ Isaac Newton (1687)

- atrito em sistemas lubrificadas depende das propriedades viscosimétricas do fluido.

→ Guillame Amontons (1699)

- confirma a independência entre atrito e área de contato;
- materiais diferentes apresentam valores de atrito diferentes;
- atrito é causado pela interferência entre asperezas.

→ J. T. Desagulies (1725)

- forma o primeiro banco de dados sobre atrito para vários pares de materiais;
- introduz o conceito de coesão entre superfícies.

→ Leonnard Euler (1750)

- introduz o uso do símbolo “ μ ” para o coeficiente de atrito;
- conceitua o atrito estático;
- estabelece que o coeficiente de atrito estático é maior que o dinâmico.

→ A. Coulomb (1785)

- sugere que atrito possui uma componente de adesão e outra de deformação;
- analisa o tempo de resposta da força de atrito;
- sugere que a força de atrito é causada pelo intertravamento de asperezas.

→ G. Rennie (1825)

- estima que coeficiente de atrito entre metais de elevada dureza é igual a 1/6;
- propõe que metais de baixa dureza apresentam maiores coeficiente de atrito;
- estabelece que o coeficiente de atrito de metais lubrificados dependem do lubrificante e não do metal.

Esta evolução pode ser resumida no que são hoje conhecidas como as três leis clássicas do atrito:¹

- i) A força de atrito é proporcional à carga aplicada;
- ii) O coeficiente de atrito independe da área aparente de contato;
- iii) O coeficiente de atrito independe da velocidade de deslizamento.

A força e o coeficiente de atrito são definidos pela norma ASTM G 40-93²⁰ da seguinte forma:

- Força de atrito é a força tangencial resistente, atuante na interface entre dois corpos, resultante da ação de uma força externa de um corpo que se move ou tende a se mover sobre o outro.
- Coeficiente de atrito é a razão da força tangencial, resistente ao movimento entre dois corpos, e a força normal, aplicada a estes corpos.

Estas leis têm sobrevivido inalteradas e inquestionavelmente por muitos anos, e são de uso corrente em engenharia mecânica, porém, à luz dos grandes avanços científicos, tem-se mostrado que estas leis necessitam de algumas correções, especialmente para explicar o atrito em polímeros como se verá mais adiante.

Resumidamente, as principais teorias que explicam a natureza do atrito no deslizamento a seco são:

a) **Teoria do intertravamento de asperezas**

A força de atrito é resultante do intertravamento entre as asperezas dos dois corpos. Esse mecanismo explica a existência de coeficiente de atrito estático e dinâmico.¹

b) Teoria da atração molecular

A força de atrito relaciona-se com a dissipação de energia dos átomos de um material quando estes são atraídos pelos da outra superfície.¹

c) Teoria das forças eletrostáticas

De acordo com esta teoria, o atrito pode ser explicado pela formação de uma rede de elétrons, os quais produzem uma grande quantidade de cargas de polaridade oposta na interface. Essas cargas fazem com que as superfícies fiquem juntas por atração eletrostática.¹

d) Teoria da energia superficial

RABINOWICZ²¹ considera que a energia superficial é o fator preponderante da componente de adesão do atrito. RABINOWICZ propôs um índice chamado trabalho de adesão, que é uma relação entre as energias superficiais dos corpos em contato.

e) Teoria da soldagem - cisalhamento - sulcamento:

A teoria de BOWDEN; TABOR²² propõe que as altas pressões desenvolvidas nos pontos de contato são responsáveis por uma micro-soldagem, em seguida, ocorre o cisalhamento das junções devido ao movimento entre as superfícies. O sulcamento ocorre quando a aspereza do material mais duro sulca a outra superfície.²³

f) Teoria de crescimento de junção

Proposta por TABOR²³, tornou-se uma das teorias com maior credibilidade no estudo do atrito, relacionando fenômenos que ocorrem a nível das asperezas dos corpos (Figura 2.18)

Quando se aplica uma força tangencial de baixa intensidade em um dos corpos, ocorre um pequeno escorregamento e verifica-se que a área de contato aumenta de três a quatro vezes o seu valor inicial. Isto ocorre devido ao escoamento plástico das junções ser controlado por um efeito combinado da pressão normal (P) e da tensão tangencial (τ), de acordo com o seguinte critério de escoamento (equação 2.14):

$$P^2 + \alpha \cdot \tau^2 < P^{*2} \quad \text{Eq. 2. 14}$$

onde α assume o valor três quando se aplicada o critério de escoamento de Von Misses e quatro para o critério de Tresca. O crescimento das junções é interrompido quando os dois termos da equação se igualam.

A Figura 2.18 mostra o fenômeno de crescimento de junções quando uma das superfícies é perfeitamente lisa, onde A_i representa esquematicamente a área de contato antes da aplicação da força tangencial e $A_i + \Delta A_i$ representa a área de contato após a aplicação da força tangencial.

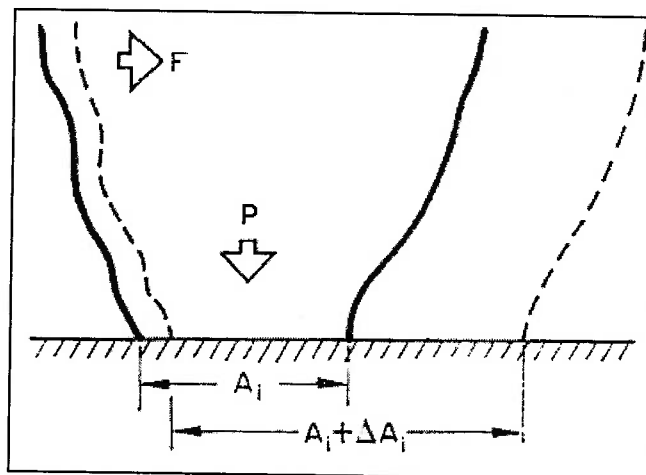


Figura 2. 18 - Fenômeno de crescimento de junção, sendo F - força tangencial e P - carga normal aplicada.⁵

A seguir serão apresentadas as teorias de atrito idealizadas especificamente para polímeros.

2.3 Atrito nos polímeros

2.3.1 Introdução

A maioria das teorias de atrito para polímeros segue conceitos tribológicos aplicados aos metais, porém, devido às características viscoelásticas e microestruturais dos polímeros, deve-se tomar muito cuidado quando da aplicação dessas teorias.

Quando os polímeros deslizam sobre outros materiais, metálicos e não-metálicos, o atrito tende a ser determinado pelas propriedades do material polimérico. Com isso, a natureza do contra-corpo torna-se menos importante.

O contato entre polímeros, ou entre polímero e metal, é predominantemente elástico e é neste aspecto fundamental que os polímeros se diferenciam dos metais.

Além disto, podem ser salientadas as seguintes diferenças entre o atrito nos metais e nos polímeros:¹⁵

- o coeficiente de atrito nos polímeros é sensível à componente da tensão hidrostática e, esta, depende da carga normal aplicada;
- o coeficiente de atrito dos polímeros é mais sensível a mudanças na temperatura;
- o comportamento mecânico dos polímeros possui forte influência do tempo.

O atrito entre polímeros, assim como para metais, também é atribuído a dois mecanismos principais, o de deformação e o de adesão.^{24, 25} A Figura 2.19 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).

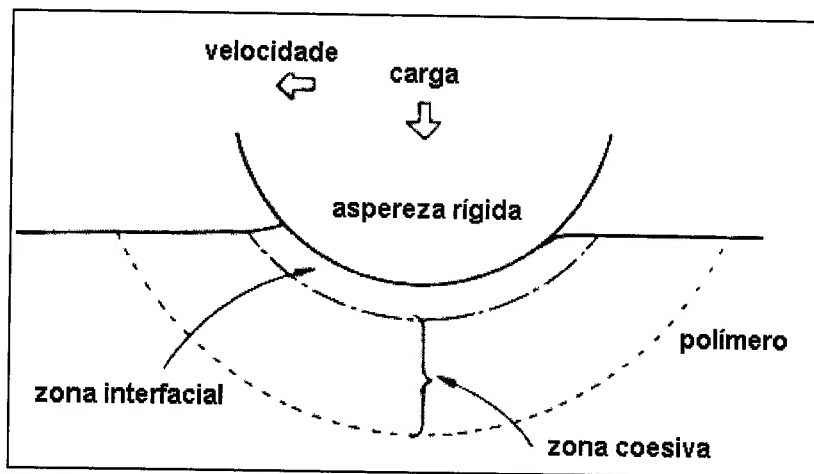


Figura 2. 19 - A origem do atrito associado ao deslizamento de uma aspereza dura deslizando contra uma superfície polimérica.²⁶

O mecanismo de deformação envolve dissipação completa de energia em volta da área de contato, provocando sulcamento. Este mecanismo possui forte dependência com o nível de rugosidade do contra-corpo

O mecanismo de adesão é proveniente das fracas forças de ligações atômicas responsáveis pela coesão entre as cadeias poliméricas. Este mecanismo está relacionado com o cisalhamento das junções e a deposição de filmes de transferência.

A distinção entre os componentes de adesão e deformação é de certo modo muito artificial e muitas vezes não pode ser feita uma separação bem clara. Entretanto, em alguns casos especiais, a determinação aproximada destas componentes poderá ser feita das seguintes maneiras:²²

- Componente de deformação

- ensaio de rolamento utilizando uma esfera;
- no deslizamento na presença de um bom lubrificante.

- Componente de adesão

- no deslizamento sem lubrificação.

A Figura 2.20 mostra o resultado do ensaio de rolamento de uma esfera de aço contra uma superfície de poli(tetraflúoro-etileno) - (PTFE) em uma ampla faixa de temperaturas. Nota-se uma correlação direta entre a energia específica absorvida no movimento das moléculas, representada por $\delta/G^{-1/3}$ (ver item 2.1.3), com o coeficiente de atrito por rolamento do polímero. Além disso, a figura deixa claro a forte influência da temperatura no comportamento tribológico do PTFE.

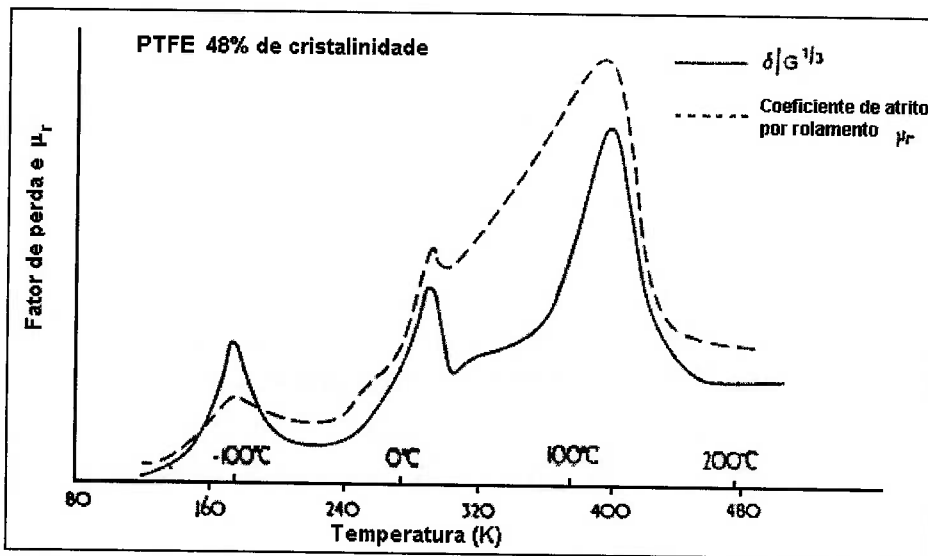


Figura 2. 20 - Coeficiente de atrito por rolamento e fator de perda viscoelástica $\delta/G^{1/3}$ em função da temperatura..²⁷

Desta figura, conclui-se que a energia específica absorvida nas moléculas possui uma correlação direta com a componente de deformação do coeficiente de atrito dinâmico.

A magnitude das forças relativas à componente de adesão pode ser descrita em termos de energia superficial entre o polímero e o contra-corpo. As energias de superfície de polímeros apolares são tipicamente entre 20 e 30 [mJ/m²],²⁷ enquanto que, para polímeros polares, como o poliestireno (PS), poli(cloreto de vinila) - (PVC) e o poli(metacrilato de metila) - (PMMA), esses valores são até duas vezes maiores. As junções formadas pela adesão mostram muita semelhança com as formadas no atrito dos metais. O rompimento das junções tende a ocorrer mais no corpo do polímero do que na interface. Mesmo ocorrendo crescimento de junção, não são observados nos polímeros os altos valores do coeficiente de atrito associados com o extensivo crescimento de junções nos metais.

Muitos polímeros transferem filmes quando deslizam contra um contra-corpo rígido. A formação e o comportamento desses filmes de transferência são fatores importantes no atrito e no desgaste dos polímeros, pois ocorrerão interações entre a superfície do polímero e a camada transferida. Em um deslizamento posterior, o polímero poderá continuar a desgastar pela adição de material a esse filme, pois as ligações na interface são tão fortes quanto as do próprio polímero, acarretando um aumento no coeficiente de atrito no decorrer do tempo.

Polímeros lineares como PEAD e o PTFE exibem um baixo coeficiente de atrito e por isso são muito utilizados como lubrificantes sólidos e assentos de mancais. As estruturas moleculares desses materiais são caracterizadas pela linearidade de suas cadeias, conduzindo a ligações intermoleculares fracas e um alto grau de cristalinidade.²⁵ Os filmes de transferência são geralmente muito finos (1 a 40 nm) e apresentam cadeias moleculares fortemente orientadas na direção de deslizamento.²⁸

A Figura 2.21 mostra, esquematicamente, o aspecto microscópico do atrito entre superfícies de aço e de polietileno (PE).¹⁰ 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.

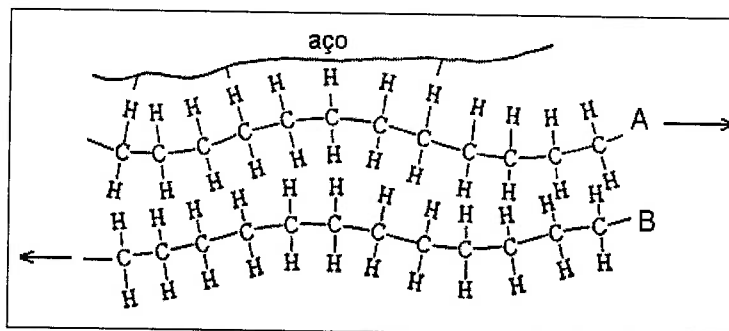


Figura 2. 21 - Modelo de deslizamento entre as macromoléculas de PE.¹⁰

2.3.2 Fatores que afetam o coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito dinâmico, para o deslizamento a seco, é afetado pela velocidade de deslizamento, carga aplicada, temperatura, umidade relativa e rugosidade do contra-corpo. A seguir será discutido como reage o coeficiente de atrito dinâmico com a variação destes parâmetros.

2.3.2.1 Velocidade de deslizamento

No contato deslizante entre um material polimérico e um corpo rígido, a velocidade relativa entre os materiais, é, juntamente com a carga, uma variável do sistema tribológico que determina a temperatura na superfície de contato.

Devido à natureza viscoelástica do material, a variação na velocidade de deslizamento poderá provocar mudanças significativas nos mecanismos de atrito desses materiais.

Com o objetivo de explicar a influência da velocidade no coeficiente de atrito, LUDEMA; TABOR²⁴ verificaram que o aumento da velocidade de deslizamento provoca um aumento na tensão de cisalhamento.

Além disto, da análise do contato entre superfícies rugosas proposta por GREENWOOD; WILLIAMSON²⁹, sabe-se que a área de contato é proporcional a $E^{2/3}$ (E = módulo de elasticidade), e que este diminui com o aumento da velocidade.

Estes dois fatores são considerados na Figura 2.22. Esta mostra a análise proposta por LUDEMA; TABOR que utilizam a hipótese de BOWDEN; TABOR²² para a força de atrito, onde esta é expressa pela tensão de cisalhamento na superfície aplicada à área de real de contato ($F = \tau \cdot A$).

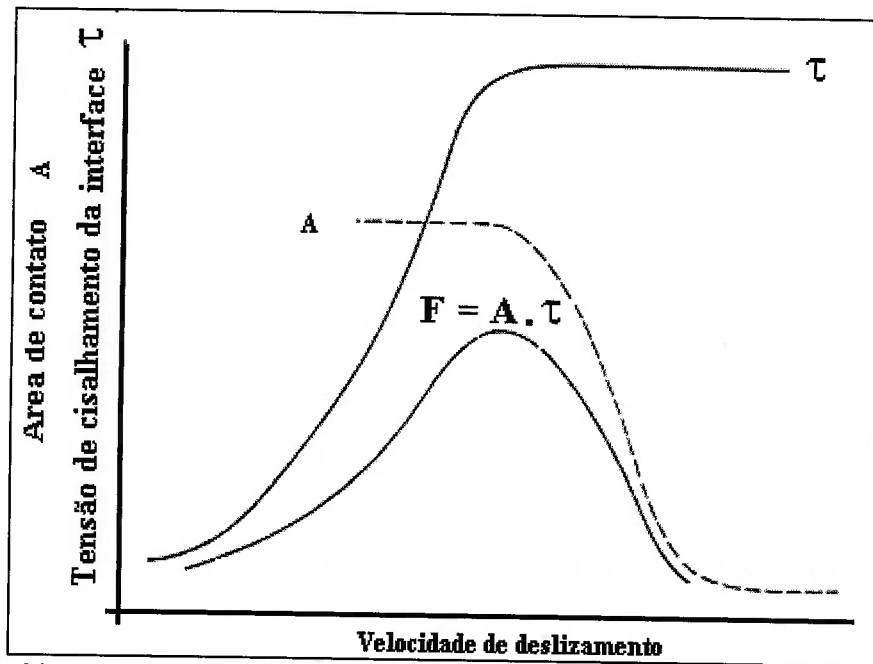


Figura 2. 22 - Comportamento da área real e da tensão de cisalhamento em função da velocidade de deslizamento.²⁴

A Figura 2.23 mostra o comportamento do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento do polietileno, polipropileno e poliamida.

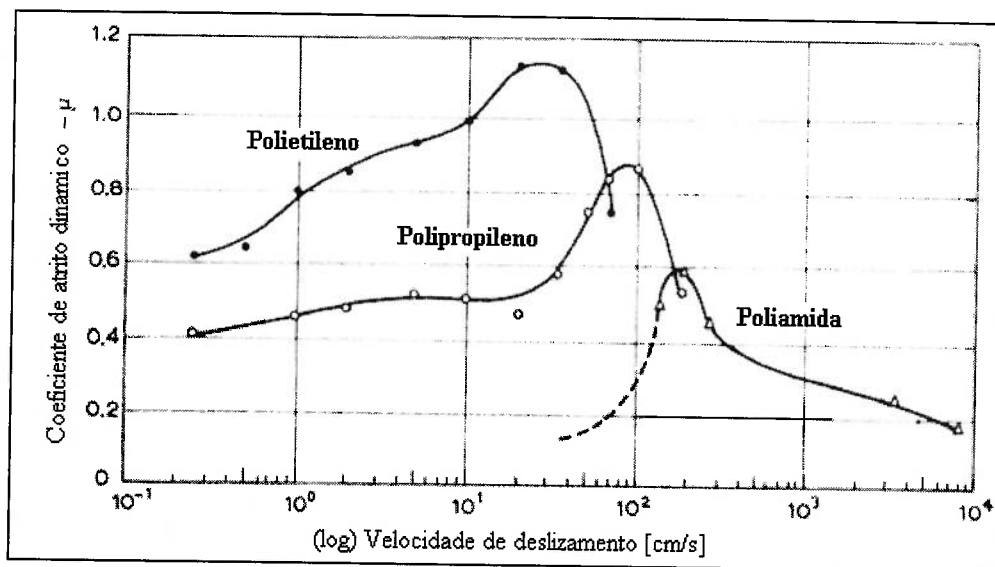


Figura 2. 23- Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento para polímeros semi-cristalinos.³⁰

Portanto, 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 dependendo da faixa de velocidade estudada.^{31, 32}

THORP³³ verificou que a presença de lubrificante diminui, mas não elimina, a influência da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito.

2.3.2.2 Carga aplicada

O estudo do comportamento tribológico dos polímeros em função da carga aplicada tem sido foco de estudo de muitos pesquisadores. SANTNER; CZICHOS³⁴, BRENTNALL; LANCASTER³⁵ e CLERICO³⁶ observaram que o coeficiente de atrito dinâmico de polímeros ou compósitos poliméricos, quando atritados contra metais, diminui à medida em que se eleva a carga. Exatamente opostos, foram os resultados obtidos por VINOGRADOV et al³⁷.

No entanto, YAMAGUCHI¹⁰ mostra que para o deslizamento entre poliamida sobre aço, o coeficiente de atrito dinâmico em função da carga aplicada, apresenta um comportamento similar ao encontrado para a variação da velocidade (Figura 2.24).

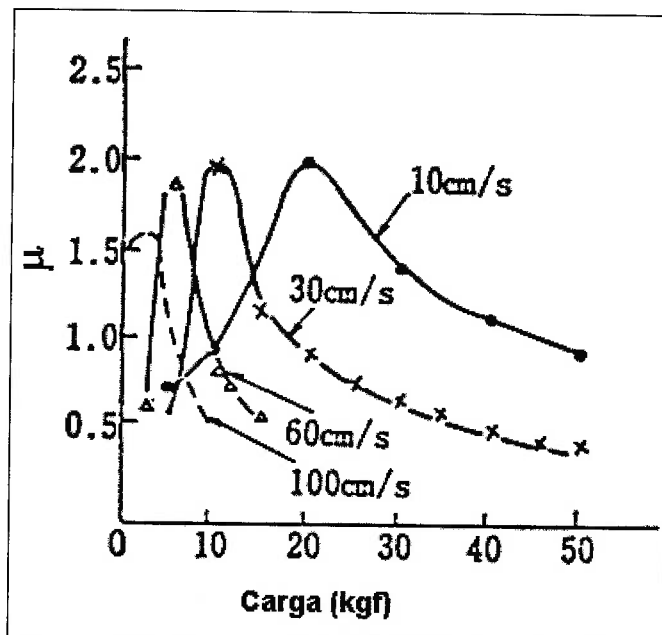


Figura 2. 24 – Relação entre coeficiente de atrito dinâmico e carga para várias velocidades de deslizamento (poliamida e aço).¹⁰

Com isto, pode-se supor que os pesquisadores que verificaram que o coeficiente de atrito é inversamente proporcional a carga aplicada, realizaram seus experimentos nas regiões onde o comportamento do coeficiente de atrito é decrescente em relação a carga. O mesmo raciocínio pode ser feito para os resultados dos pesquisadores que encontraram comportamentos exatamente opostos.

Conclui-se desta maneira, que a influência tanto da carga quanto da velocidade de deslizamento devem ser analisadas em conjunto, pois são estes os principais parâmetros que definem a temperatura de contato.

2.3.2.3 Temperatura de contato

O comportamento mecânico, físico e químico dos polímeros possui forte dependência da temperatura. Assim, com o comportamento tribológico, não poderia ser diferente.

Em aplicações onde não há sistema de refrigeração, o aumento da velocidade de deslizamento irá provocar um aquecimento na região de contato e, conseqüentemente, um aumento na temperatura.

MALAY; BAHADUR³⁸, em seu trabalho de investigação da influência da temperatura em sistemas tribológicos, mostram que, para o PEAD deslizando contra aço, o aumento da temperatura provoca um crescimento no coeficiente de atrito dinâmico.

Além dos níveis de carga e velocidade empregados durante o deslizamento, o tipo de polímero utilizado irá influenciar no mecanismo de atrito presente. SAIBEL apud BUDINSKI³⁹, mostra na Figura 2.25, o comportamento de diversos polímeros em função da temperatura no contato.

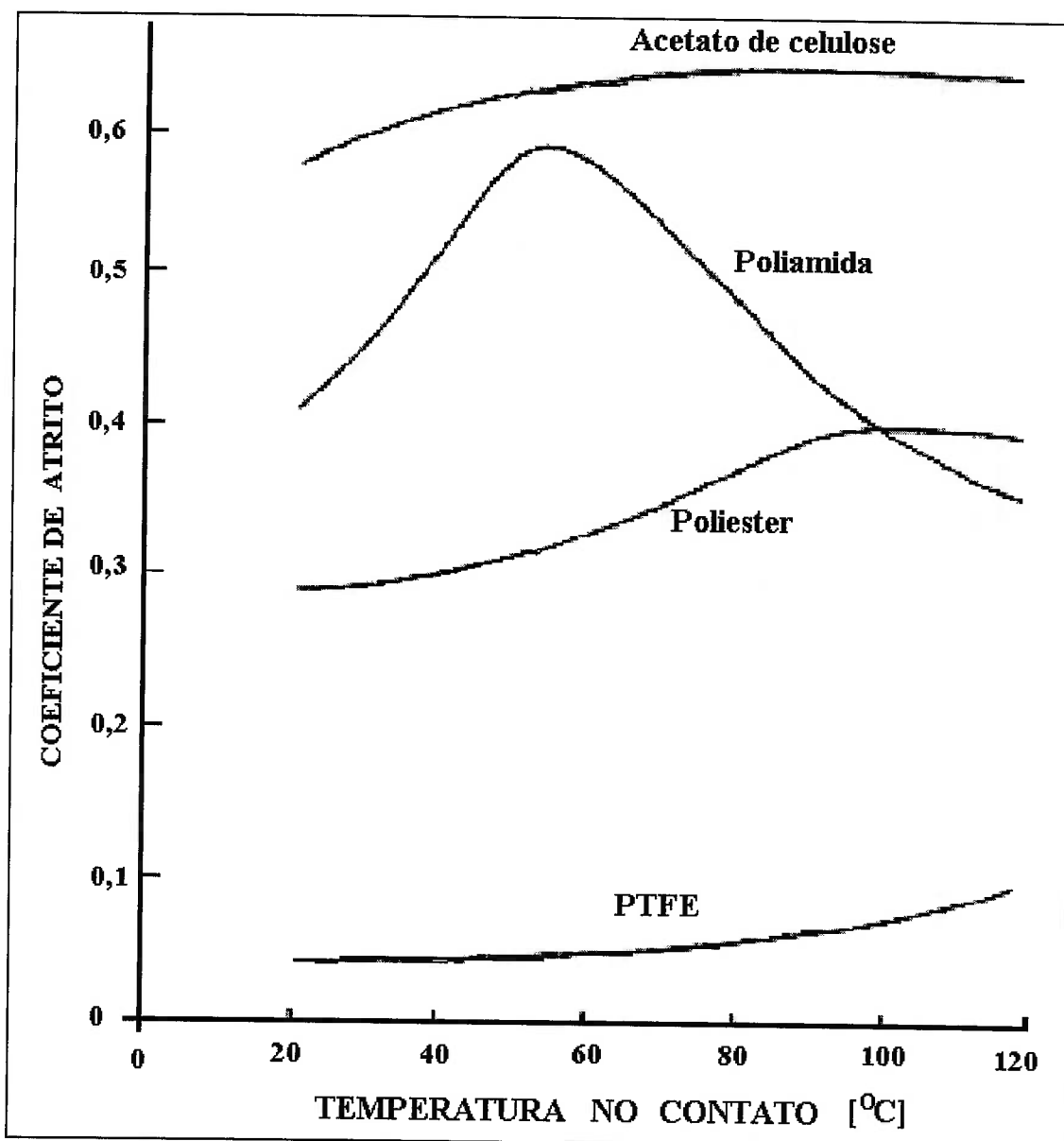


Figura 2. 25 - Coeficiente de atrito em função da temperatura no contato para diversos polímeros em ensaios pino-contra-disco.³⁹

CLERICO³⁶, utilizando o contato entre poliamida e aço, mostrou que a temperatura de contato se elevava com a carga aplicada e ocorria uma diminuição no coeficiente de atrito. Estes resultados correspondem a região a esquerda do pico na curva do coeficiente de atrito para a poliamida na Figura 2.25.

Na seleção de mancais de rolamento ou deslizamento, um fator de grande importância é a chamada condição PV ou pressão-velocidade. Esta condição representa o grau de severidade dos esforços na região de contato e limita a utilização dos

materiais, de acordo com a condição PV limite do material. Apesar dos materiais poliméricos apresentarem baixa condutividade térmica, o que dificultaria sua aplicação em mancais, suas características de auto-lubrificação a seco permitem a utilização destes materiais em aplicações especiais.

A Figura 2.26 mostra que a temperatura no contato estabilizará em patamares cada vez mais elevados quanto mais severas forem as condições PV. A condição $PV_{\text{máx}}$ representa a condição em que a temperatura no contato não se estabiliza e o material atingirá temperaturas elevadíssimas, fundindo ou provocando uma intensa oxidação na região de contato.

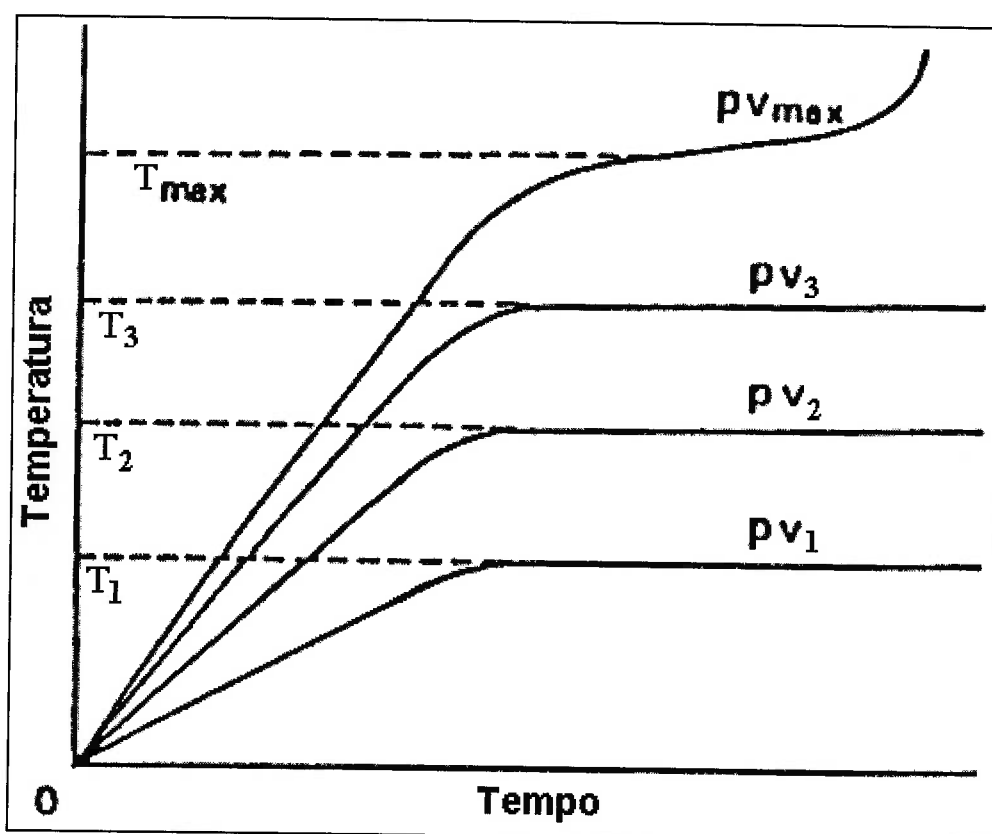


Figura 2. 26 - Curva de temperatura no contato (T) pelo tempo para condições PV cada vez mais elevadas.¹⁰

Estes dados em conjunto com os referentes ao efeito da velocidade e carga aplicada, mostram que o aumento da temperatura na superfície de contato, provocado

tanto pelo aumento da carga aplicada como da velocidade de deslizamento, deve ser o parâmetro que determina a resposta tribológica do material.

2.3.2.4 Umidade Relativa

A triboquímica estuda o efeito das reações químicas entre superfícies e o meio ambiente, como o atrito, lubrificação e o desgaste. Além da umidade relativa, a triboquímica estuda a influência da oxidação, formação de filme, adesão, lubrificação e aditivos.⁴⁰

A importância da umidade relativa em sistemas tribológicos pode ser verificada no trabalho de CZICHOS⁴¹, onde foi tomado um cuidado especial nas medidas de coeficiente de atrito dinâmico de termoplásticos contra aço e verificou-se que a capacidade higroscópica dos polímeros afeta substancialmente o seu comportamento quanto ao desgaste. CZICHOS observou também que este comportamento dos polímeros não pode ser entendido como propriedade do material e sim como propriedade do sistema tribológico.

A dependência do coeficiente de atrito dinâmico em relação à umidade relativa do ambiente ainda não está muito clara, mas a Figura 2.27 mostra um resultado experimental obtido por WATANABE apud YAMAGUCHI¹⁰ para a poliamida 6, 12 e o polietileno de baixa densidade (PEBD).

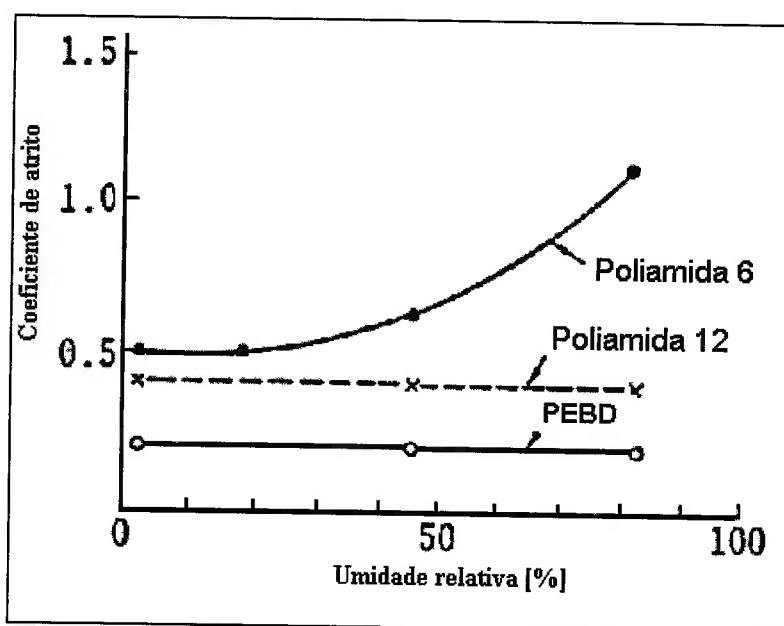


Figura 2. 27 - Relação entre coeficiente de atrito dinâmico e umidade relativa para o Poliamida 6, Poliamida 12 e PEBD.¹⁰

2.3.2.5 Rugosidade

Sabe-se que quanto menor a rugosidade do contra-corpo, maior será a adesão entre os corpos, porém, quanto mais rugosa a superfície, maior será a penetração da aspereza do corpo rígido no polímero. Portanto, o efeito da rugosidade depende de mecanismos concorrentes que atuam na determinação do coeficiente de atrito dinâmico dos polímeros.

ARCHARD apud HUTCHINGS²⁷ discute a influência da carga e da rugosidade no coeficiente de atrito entre cilindros cruzados de PMMA. A Figura 2.28 (b) mostra que o coeficiente de atrito entre cilindros torneados é inversamente proporcional a carga aplicada para a toda faixa de carga estudada, porém, a Figura 2.28 (a) mostra que o coeficiente de atrito entre cilindros polidos independe da carga para valores abaixo de 100 N.

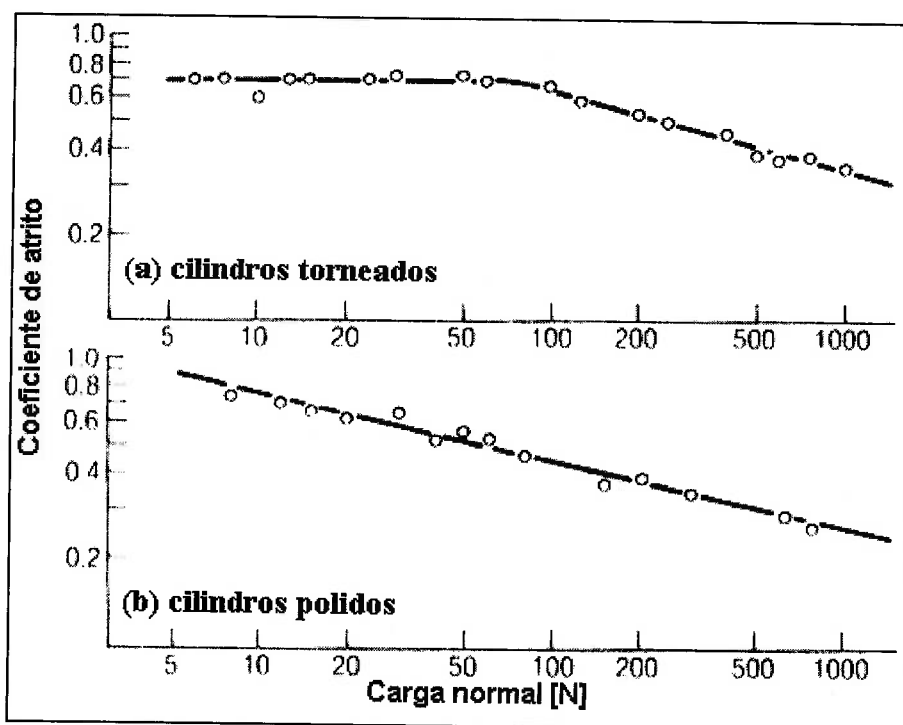


Figura 2. 28 - Variação do coeficiente de atrito com a carga normal de cilindros cruzados de PMMA com diferentes acabamentos superficiais: (a)torneado e (b)polido.²⁷

ARCHARD acredita que, apesar da área real de contato permanecer diretamente proporcional à força de atrito, não há proporcionalidade entre carga aplicada e área real de contato, para valores elevados de carga e para superfícies muito lisas.²⁷

2.4 Modelos de coeficiente de atrito dinâmico

2.4.1 Introdução

Uma particularidade significativa do atrito dos materiais poliméricos é que os valores de coeficiente de atrito, tanto estático como dinâmico, dependem fortemente da técnica de ensaio utilizada. A Figura 2.29 mostra como a técnica de ensaios afeta a o coeficiente de atrito dinâmico em função da carga e da velocidade de deslizamento para o atrito entre poliéster e aço inoxidável 316 e na Figura 2.30 os tipos de ensaio para a determinação de coeficiente de atrito dinâmico.³⁹

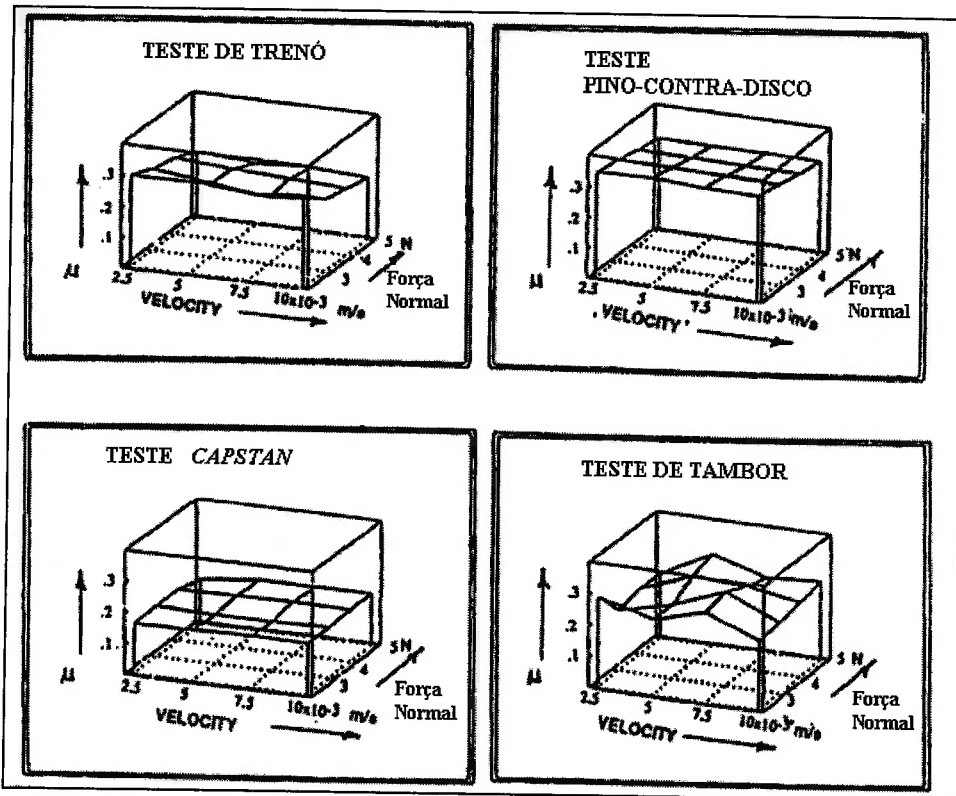


Figura 2.29 - Coeficiente de atrito dinâmico entre aço inoxidável 316 e filme de poliéster para quatro diferentes tipos de ensaios.³⁸

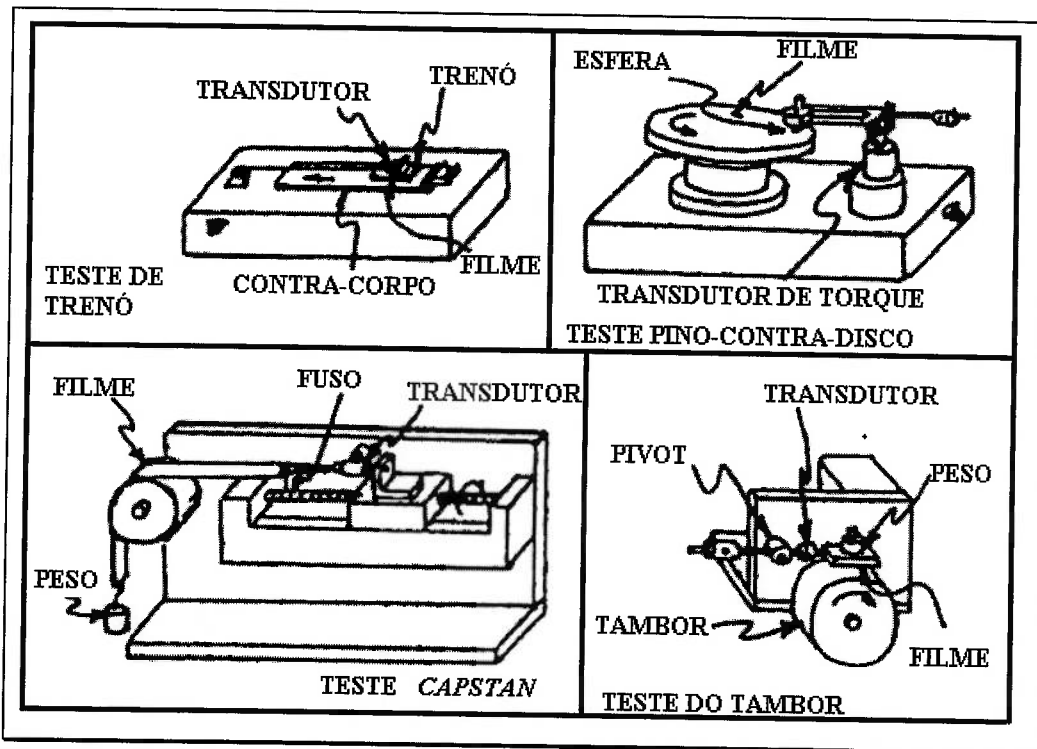


Figura 2. 30 - Ensaios comumente utilizados para medir o coeficiente de atrito de plásticos.³⁹

Estes resultados ilustram bem as dificuldades em se comparar os valores de coeficiente de atrito dinâmico de sistemas tribológicos medidos com técnicas experimentais diferentes. Isto dificulta o desenvolvimento de modelos matemáticos que sejam representativos, quanto ao comportamento do polímero em sua aplicação.

A escolha de parâmetros adequados, os cuidados com a preparação, tanto do experimento quanto dos c.d.p.s, além de uma análise criteriosa dos resultados, são fatores essenciais no desenvolvimento de um modelo para coeficiente de atrito dinâmico.

Durante a pesquisa bibliográfica, verificou-se que os modelos de coeficiente de atrito dinâmico encontrados, apresentam falhas na escolha de parâmetros que representem o comportamento destes materiais e na descrição das hipóteses feitas durante o desenvolvimento dos modelos.

2.4.2 Modelos de coeficiente de atrito dinâmico da literatura

A seguir serão apresentados um resumo dos modelos de coeficiente de atrito dinâmico para materiais poliméricos encontrados na literatura.

2.4.2.1 Modelo de SHOOTER (1952)⁴²

Segundo o autor, o atrito dos polímeros, podem ser explicadas pela teoria de BOWDEN; TABOR²² desenvolvida para metais, apenas para velocidades muito baixas, onde a área real de contato é proporcional à carga aplicada.

O modelo de coeficiente de atrito proposto é o seguinte:

$$\mu = \frac{\tau_e}{H} \quad \text{Eq. 2. 15}$$

onde: τ_e = resistência ao cisalhamento do polímero

H = dureza

2.4.2.2 Modelo de KING; TABOR (1953)⁴³

Os autores propuseram o seguinte modelo para explicar o atrito de polímeros:

$$\mu = \frac{\tau_e}{H} \cdot \left(\frac{\gamma - 15}{11} \right) \quad \text{Eq. 2. 16}$$

onde: H = dureza Vickers

τ_e = tensão de escoamento por cisalhamento

γ - energia superficial

2.4.2.3 Modelo de LODGE; HOWELL (1954)⁴⁴

Este modelo foi proposto com o intuito de modificar a lei clássica do atrito, onde a força de atrito (F) é proporcional à carga aplicada (P), e aplica-se à metais de baixa dureza e materiais não metálicos:

$$\mu = \frac{F}{P^n} \quad \text{Eq. 2. 17}$$

onde: $n = 2/3 \Rightarrow$ deformação totalmente elástica

$n = 1 \Rightarrow$ deformação totalmente plástica

Assim, a área de deformada é determinada pelas características viscoelásticas do material.

Durante a elaboração do modelo, os autores assumiram as seguintes hipóteses:

i) os planos tangentes à região de contato entre as asperezas são paralelos à superfície;

- ii) a deformação é puramente elástica em cada contato e é governada pela forma modificada da equação de Hertz;
- iii) a aplicação da força de atrito não afeta a magnitude da área de contato determinada pela teoria de Hertz;
- iv) a mesma lei de atrito serve para cada ponto de contato;
- v) o atrito torna-se limite para todas as regiões de contato simultaneamente;
- vi) todas as regiões de contato são circulares.

Com base nestas hipóteses, estes autores expandiram o modelo da Equação 2.17 para o contato entre superfícies planas e superfícies circulares, mediante o cálculo da área de contato segundo Hertz para cada caso. Estes modelos estão apresentados a seguir:

2.4.2.3.1 Modelo para superfícies planas

Para o caso de superfícies planas, os autores desenvolveram o seguinte modelo:

$$\mu = \frac{F \cdot k_v^{n-1}}{P^{\beta_f(1-n)+n} \cdot N^{(1-n)(1-\beta_f)}} \cdot \frac{(1+h \cdot n)}{(h+1)^n} \quad \text{Eq. 2. 18}$$

onde: k_v = constante elástica volumétrica do material

F = força de atrito

β_f = índice força-área

n = índice de atrito

P = carga aplicada

N = número de asperezas em contato

h = índice geométrico

2.4.2.3.2 Modelo para superfícies circulares

Para o caso de superfícies circulares, os autores desenvolveram o seguinte modelo:

$$\mu = \frac{F \cdot k_v^{n-1} \cdot (1 + \beta_f (1 - n) + n)}{P [2 + \beta_f (1 - n) + n]^{1/3} \cdot 2^{3/2} \cdot (1 - n) \beta_f + n} \cdot \frac{(1 + h \cdot n)}{(h + 1)^n} \cdot (\kappa_d \cdot \sigma_A)^{(n-1)(1-\beta_f)}$$

Eq. 2. 19

onde: κ_d = constante dependente das dimensões e constantes elásticas das esferas ou cilindros;

σ_A = constante dependente da área de aplicação da força de reação.

2.4.2.4 Modelo de PASCOE; TABOR (1956)⁴⁵

Segundo os autores, o atrito dos polímeros difere em relação aos metais pois:

- não ocorre o mecanismo de crescimento de junções (ou ocorre muito pouco) durante o deslizamento, fazendo com que a área das junções cisalhadas seja a mesma área de contato formada sob carregamento estático;
- estado das propriedades de indentação estática dos polímeros mostra que a deformação não é puramente elástica nem puramente plástica, e sim intermediária para uma grande faixa de deformações.

Segundo o “Princípio da similaridade geométrica” ou “Lei de Meyer”⁴⁹, a área real de contato para um penetrador esférico pode ser expressa por:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1}{a}\right)^{2/b} \cdot P^{2/b} \cdot D^{(2b-4)/b}$$

Eq. 2. 20

Como a força de atrito pode ser expressa pela tensão de cisalhamento na interface aplicada a área real de contato, o modelo de coeficiente de atrito proposto é:

$$\mu = \frac{s.A}{P} = \frac{\pi}{4} .s. \left(\frac{1}{a} \right)^{2/b} .P^{(2-b)/b} .D^{(2b-4)/b} \quad \text{Eq. 2. 21}$$

onde: A - área de contato

P - carga aplicada

D - diâmetro do penetrador

a - constante do material

b - constante do material \Rightarrow para b = 2, deformação totalmente plástica

para b = 3, deformação totalmente elástica

s – tensão de escoamento por cisalhamento das junções (mesma ordem de magnitude da tensão de escoamento por cisalhamento volumétrica do polímero).

2.4.2.5 Modelo de RABINOWICZ (1961)²¹

Utilizando o modelo de asperezas cônicas e o princípio da energia necessária para penetrar no material, o autor propõe o seguinte modelo de coeficiente de atrito:

$$\mu = \frac{\tau_e}{H} \left(1 + \frac{2.W_{ab} \cdot \cot \Theta}{H.r} \right) \quad \text{Eq. 2. 22}$$

onde: r - raio das asperezas

Θ - ângulo de inclinação das asperezas

W_{ab} - trabalho de adesão ($W_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab}$)

γ_a e γ_b - energia superficial dos materiais a e b

H - dureza do material menos duro

τ_e – tensão de escoamento por cisalhamento do polímero

2.4.2.6 Modelo de COHEN; TABOR (1966)⁴⁶

Na construção deste modelo, os autores assumiram que:

$$F = \tau_e \cdot A \quad \text{Eq. 2. 23}$$

onde: τ_e – tensão de escoamento por cisalhamento do polímero

A – área real de contato

Para a determinação da área real, foi utilizado os cálculos da área de contato segundo Hertz para o contato de uma esfera contra um plano.

Com isso, tem-se o seguinte modelo:

$$\mu = a \cdot \frac{\tau_e}{P} \cdot n \left(1 - \frac{2}{b}\right) \cdot r \left(2 - \frac{4}{b}\right) \cdot \left(\frac{P}{E}\right) \left(\frac{4}{b} - \frac{4}{b^2}\right) \cdot R^2 \left(1 - \frac{2}{b}\right)^2 \quad \text{Eq. 2. 24}$$

$$\frac{1}{E} = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad \text{Eq. 2. 25}$$

onde: a, b - constantes do material polimérico

τ_e – tensão de escoamento por cisalhamento do polímero

n - número de asperezas em contato

r - raio das asperezas

R - raio da esfera

E_1 – módulo de elasticidade da esfera

E_2 - módulos de elasticidade do plano

ν_1 – coeficiente de Poisson da esfera

ν_2 - coeficiente de Poisson do plano

P - carga aplicada

2.4.2.7 Modelo de BAHADUR; LUDEMA (1971)⁴⁷

Durante o desenvolvimento deste modelo, os autores determinaram a força de atrito segundo a Equação 2.23 e utilizaram o cálculo da área de contato de Hertz para um penetrador esférico contra um plano. Assim, a área de contato é dado por:

$$A = \pi \left[\frac{3.P.R.(1-\nu)}{8.G} \right]^{2/3} \quad \text{Eq. 2. 26}$$

Logo, o modelo de coeficiente de atrito dinâmico será:

$$\mu = \frac{A.\tau_e}{W} = \frac{\pi.\tau_e}{P} \left[\frac{3.P.R.(1-\nu)}{8.G} \right]^{2/3} \quad \text{Eq. 2. 27}$$

onde: P- carga aplicada

R - raio do penetrador esférico

ν - coeficiente de Poisson

G - Módulo de cisalhamento

τ_e – tensão de escoamento por cisalhamento do polímero

2.4.2.8 Modelo de WEST; SENIOR (1972)⁴⁸

Os autores propuseram três modelos para o coeficiente de atrito do polietileno contra aço.

O primeiro utiliza propriedades mecânicas para representar o atrito deste material da seguinte maneira:

$$\mu = k_1.P_{HV} \cdot \frac{E_r}{L_r} = k_1.P_{HV} \cdot f_a \quad \text{Eq. 2. 28}$$

onde: P_{HV} - Dureza Vickers (varia com a temperatura)

E_r - energia de rompimento (curva σ - δ)

L_r - comprimento de ruptura (ensaio de tração)

K_1 - constante dimensional do material

O segundo modelo acrescenta ao primeiro uma componente de adesão representada pela energia superficial da seguinte maneira:

$$\mu = k_2 \cdot P_{HV} \cdot f_a \cdot (\gamma - 15) \quad \text{Eq. 2. 29}$$

onde : γ - energia superficial (mN/m)

Com o objetivo de utilizar parâmetros referentes ao comportamento viscoelástico dos polímeros, os autores propuseram ainda o seguinte modelo:

$$\mu = k_3 \cdot P_{HV} \cdot \sigma_e \cdot (1 + C_T)(\gamma - 15) \quad \text{Eq. 2. 30}$$

sendo:

$$C_T = - \frac{T_j}{\tau_e} \left(1 - e^{-\frac{T_j}{\tau_e}} \right) \quad \text{Eq. 2. 31}$$

onde: T_j - tempo necessário para rompimento das junções = $k_4 T_0$

T_0 - tempo necessário para rompimento do c.d.p. no ensaio de tração

τ_e - tensão de escoamento por cisalhamento

σ_e - tensão de escoamento por tração

K_3 e k_4 - constantes do material

A Tabela 2.3 ilustra como utilizar esses modelos para o polietileno.

Tabela 2. 3 - Tabela de parâmetros para o PE.

Temperatura (°C)	P _{HV} (μm)	f _a (MPa)	L (mm)	τ _e (MPa)
20	17	10,9	233	9,0
30	19.5	10,0	229	8,6
40	22	8,8	228	7,5
50	24	7,6	218	6,9
60	27	6,2	217	5,6
70	29	5,2	183	4,9
80	32	4,2	186	3,9
90	45	3,0	172	2,9

2.4.2.9 Modelo de SUH; TURNER (1976) ¹⁵

Na determinação de um modelo para o coeficiente atrito dos polímeros, os autores apresentaram a seguinte seqüência de substituições:

$$F = \tau_e \cdot A_r$$

$$\tau_e = \alpha + \beta_h \cdot p \longrightarrow p \approx H \longrightarrow \tau = \alpha + \beta_h \cdot H$$

onde: α - constante do material (referente parcela desviadora das tensões)

β_h - parâmetro relacionado com o campo hidrostático das tensões

H - dureza

Do cálculo da área de contato segundo GREENWOOD; WILLIAMSON ²⁹, tem-se:

$$A_r = C_t \cdot \frac{P}{H}$$

Substituindo tem-se:

$$F = (\alpha + \beta_h \cdot H) \left(C_t \cdot \frac{P}{H} \right) \longrightarrow F = C_t \cdot P \cdot \left(\frac{\alpha}{H} + \beta_h \right)$$

como $\mu = \frac{F}{P} \longrightarrow \mu = C_t \left(\frac{\alpha}{H} + \beta_h \right)$

empregando o princípio da similaridade geométrica, temos:

$$\mu = C_t \left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{\alpha \cdot D^2}{P} + \beta_h \right) \quad (2.41)$$

onde: P - carga aplicada

C_t - constante que representa as características topográficas (GREENWOOD; WILLIAMSON)

D - diâmetro do penetrador esférico

Obs.: Este modelo foi atribuído à SUH; TURNER, pois estes autores apresentaram este modelo no livro "ELEMENTS OF MECHANICAL BEHAVIOR SOLIDS" e não fizeram citações durante o desenvolvimento do texto.

2.4.2.10 Modelo de SPURR (1982)⁴⁹

Durante o desenvolvimento deste modelo, o autor concorda com a teoria de crescimento de junção aplicada a polímeros e admite que para velocidades baixas os efeitos elásticos não são tão importantes quanto os efeitos plásticos e que não há efeito térmico no contato.

A equação 2.32 apresenta o modelo desenvolvido pelo autor.

$$\mu = \frac{\sigma_e}{H} \cdot \cot \Psi \quad \text{Eq. 2. 32}$$

onde:

σ_e - tensão de escoamento por tração

H - dureza

Ψ - parâmetro envolvendo forças de superfícies

e

$$\cos \Psi_{12} = \cos \Psi_1 + \cos \Psi_2$$

$$\cos \Psi = \frac{\Omega}{T_R} \text{ ou } \cos \Psi = \frac{\tau_e}{\sigma_e} \longrightarrow \cos \Psi \propto \gamma$$

sendo:

Ω - adesão

T_R - resistência à tração

τ_e - tensão de escoamento por cisalhamento média

σ_e - tensão de escoamento por tração

γ - energia superficial

2.4.2.11 Modelo de MADAKSON (1983)⁵⁰

Para o desenvolvimento deste modelo, o autor utiliza técnicas de análise dimensional. Através da aplicação do Teorema Π obtém-se os grupos adimensionais que o modelo deve apresentar.

Os parâmetros do modelo consideram os seguintes fatores:

- meio ambiente;
- propriedades dos materiais;
- rugosidade superficial;
- área real de contato;
- parâmetros dinâmicos;
- energia de superfície e de deformação.

Os grupos adimensionais encontrados foram:

$$F = \phi \left(P, \frac{\rho \cdot V^2 \cdot A}{P}, \frac{\gamma}{H \cdot V^2}, \frac{E_d \cdot Q}{P \cdot A \cdot r} \right) \cdot C$$

Separando a componente da força de atrito pela carga aplicada, obtém-se o modelo de coeficiente de atrito, o qual está apresentado na equação 2.34.

$$\mu = \frac{F}{P} = C \cdot \left(\frac{\rho \cdot A \cdot v^2}{P} \right)^x \cdot \left(\frac{\gamma}{H \cdot V^2} \right)^y \cdot \left(\frac{E_d \cdot Q}{P \cdot A \cdot r} \right)^z \quad \text{Eq. 2. 33}$$

onde: ρ - densidade

v - velocidade de deslizamento

A - área real de contato

P - carga normal aplicada

γ - energia superficial

H- dureza

E_d - energia de deformação

Q- área deformada

r - rugosidade

x - coeficiente do fator de adesão

y- coeficiente do fator de energia superficial

z - coeficiente do fator de energia de deformação

C - constante dependente da temperatura, meio ambiente e sistema tribológico

Este modelo contém uma imprecisão, pois, ao fazer a análise dimensional do modelo, verifica-se que o grupo adimensional referente à energia superficial possui a seguinte dimensão: $[T^2 L^{-1}]$, sendo T a dimensão de tempo e L de comprimento. Portanto, para a utilização deste modelo, são necessárias mudanças de parâmetros neste grupo adimensional.

2.4.2.12 Modelo de BASSANI, DI PASQUALE; VITALI (1984)⁵¹

Durante o desenvolvimento de um modelo probabilístico, os autores verificaram que:

- seria necessária uma análise estatística geométrica de uma superfície isotrópica gaussiana;
- o comportamento tribológico depende muito dos raios dos picos das asperezas;
- o contato deve ser considerado quase elástico.

O modelo mecânico utilizado no desenvolvimento do modelo de atrito, está apresentado na Figura 2.31.

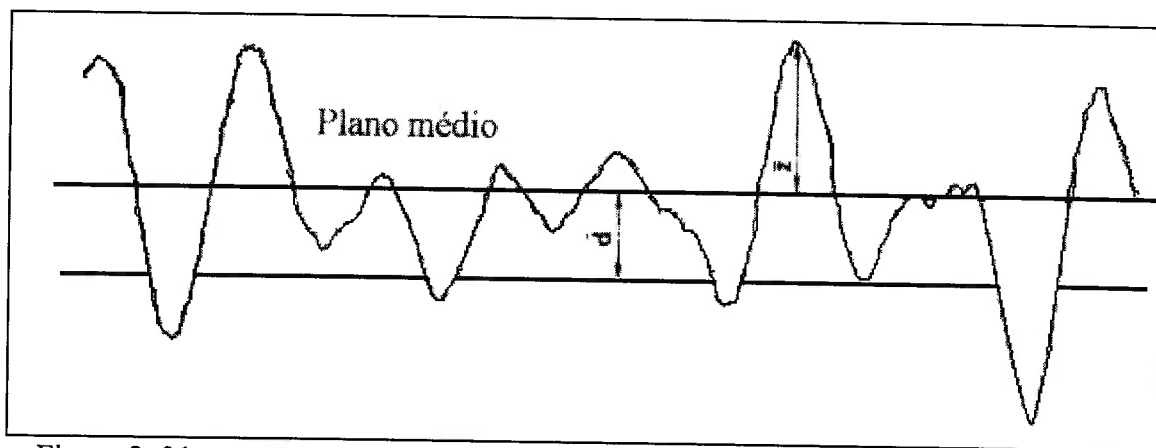


Figura 2. 31 - contato entre uma superfície rugosa e um plano elástico (polímero).²⁵

As forças envolvidas no modelo mecânico apresentado são:

$$F = F_s + F_p \quad \text{Eq. 2. 34}$$

onde: F - força de atrito

F_s - componente de cisalhamento (devido à adesão)

F_p - componente de sulcamento (devido à deformação)

P - carga normal aplicada

Sabe-se que o coeficiente de atrito dinâmico é definido por:

$$\mu = \frac{F}{P} \quad \text{Eq. 2. 35}$$

Da análise estatística da superfície rugosa, temos:

$$\begin{aligned} P &= 0,04.D. \frac{m_0^{3/4} \cdot m_4^{3/4}}{m_2} \cdot \int_d^\infty p_1(z) dz \cdot \int_d^\infty dz \cdot \int_{-\infty}^0 \frac{(z-d)^{3/2}}{k_e^{1/2}} \cdot p_1(z, k_e) dz \\ F_s &= 0,19 \cdot \tau_e \cdot \frac{m_0^{1/2} \cdot m_4^{1/2}}{m_2} \cdot \int_d^\infty p_1(z) dz \cdot \int_d^\infty dz \cdot \int_{-\infty}^0 \frac{(z-d)}{k_e} \cdot p_1(z, k_e) dz \\ F_p &= 0,03.D. \frac{m_0 \cdot m_4}{m_2} \cdot \int_d^\infty p_1(z) dz \cdot \int_d^\infty dz \cdot \int_{-\infty}^0 (z-d)^2 \cdot p_1(z, k_e) dz. \end{aligned} \quad \text{Eqs. 2. 36}$$

$$D = \frac{E}{1 - \nu_p^2} \quad \text{Eq. 2. 37}$$

onde: E - módulo de elasticidade do polímero

ν - coeficiente de Poisson do polímero

τ_e - resistência ao cisalhamento do polímero

z, d e k_e - parâmetros de contato (Figura 2.32)

$m_0 = E(z^2)$ - momento espectral zero do perfil

$m_2 = E \left\{ \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right\}$ - segundo momento espectral do perfil

$m_4 = E \left\{ \left(\frac{d^2z}{dx^2} \right)^2 \right\}$ - terceiro momento espectral do perfil

E { } - valor da esperança matemática.

Os valores de m_0 , m_2 e m_4 são equivalentes à média quadrática da altura, inclinação e derivada segunda do perfil de distribuição das alturas das asperezas em uma direção arbitrária, respectivamente.⁵²

Combinando as equações temos:

$$P = B_n \cdot \frac{\sigma_{dp}}{\beta_d}, \quad F_p = B_p \cdot \frac{\sigma_{dp}^2}{\beta_d^2} \quad \text{e} \quad F_s = B_s \quad \text{Eq. 2. 38}$$

onde: β_d - fator de autocorrelação de decaimento

σ_{dp} - desvio-padrão

B_n , B_s e B_p – constantes que dependem das características mecânicas dos polímeros e das condições de contato.

Assim, o modelo de coeficiente de atrito dinâmico proposto é:

$$\mu = \mu_s + \mu_p = \frac{F_s}{P} + \frac{F_p}{P} \quad \longrightarrow \quad \mu = \frac{B_s}{B_n} \cdot \frac{\beta_d}{\sigma_{dp}} + \frac{B_p}{B_n} \cdot \frac{\sigma_{dp}}{\beta_d} \quad \text{Eq. 2. 39}$$

2.4.2.13 Modelo de HUTCHINGS (1992)²⁷

Para o cálculo do coeficiente de atrito, muitas vezes torna-se conveniente separá-lo em duas componentes: deformação e adesão.

Ou seja:

$$\mu = \mu_s + \mu_p \quad \text{Eq. 2. 40}$$

logo:

$$\mu = (F_s + F_p) / W \quad \text{Eq. 2. 41}$$

onde: F_s = componente de adesão da força de atrito

F_p = componente de deformação da força de atrito

A seguir estas componentes serão analisadas separadamente.

2.4.2.13.1 Componente de deformação

i) Utilizando o modelo de deslizador esférico sobre um plano polimérico, temos:

$$F_p = 0,17\beta_{ed}P^{4/3}R^{-2/3}(1-\nu^2)^{1/3}E^{-1/3} \quad \text{Eq. 2. 42}$$

onde: β_{ed} - fração de energia dissipada durante o movimento

ν - coeficiente de Poisson

P - carga normal aplicada

R - raio da esfera

E - parte real do módulo de elasticidade

ii) Utilizando o modelo de deslizador cônico sobre um plano polimérico temos:

$$F_p = \left(\frac{\beta_a \cdot P}{\pi} \right)^{1/3} \cdot \cot \alpha_d \quad \text{Eq. 2. 43}$$

onde: β_a - dois a três vezes o fator de amortecimento do material

α_d - semi-ângulo do deslizador cônico

P - carga normal aplicada

2.4.2.13.2 Componente de adesão

A tensão cisalhante de escoamento τ_e varia com a pressão hidrostática aplicada P da seguinte maneira:

$$\tau_e = \tau_0 + \alpha P \quad \text{Eq. 2. 44}$$

Logo:

$$\mu = \frac{F_s}{P} = \frac{A \cdot \tau_e}{P \cdot A} = \frac{\tau_e}{P} = \frac{\tau_o + \alpha \cdot P}{P} \longrightarrow \mu = \frac{\tau_o}{P} + \alpha \quad \text{Eq. 2. 45}$$

onde: P- pressão hidrostática aplicada

τ_o e α - constantes do material

A equação acima possui boa concordância com polímeros que formam filmes de transferência. Para muitos polímeros, substitui-se P pela dureza volumétrica dos polímeros.

Obs.: Este modelo foi atribuído à HUTCHINGS, pois este autor apresenta estes modelos no livro "TRIBOLOGY: FRICTION AND WEAR OF ENGINEERING MATERIALS" e não faz citações durante o desenvolvimento do texto.

A seguir, serão apresentadas as críticas aos modelos coeficiente de atrito dinâmico desta seção.

2.4.3 Análise dos modelos da literatura

Durante a pesquisa bibliográfica, foram encontrados diversos tipos de modelos matemáticos utilizados para o cálculo do coeficiente de atrito dinâmico entre materiais poliméricos e um contra-corpo rígido.

Os modelos encontrados na literatura podem ser considerados simplificados, pois desconsideram algumas variáveis importantes para o contato polímero-metal.

Esses modelos podem ser agrupados em três categorias:

- Tipo I - Modelos empíricos;
- Tipo II - Modelos teóricos;

- Tipo III - Modelos empíricos que utilizam modelos teóricos de determinação da área de contato

Os modelos de coeficiente de atrito encontrados na literatura apresentaram uma série de restrições, por desconsiderar alguns parâmetros referentes aos materiais poliméricos. A Tabela 2.4 lista as restrições detectadas nos modelos da literatura

Tabela 2. 4 – Restrições aos modelos encontrados na literatura.

Problema	Descrição dos problemas apresentados pelos modelos da literatura
1	Omissão do parâmetro referente à componente hidrostática das tensões.
2	Omissão da energia superficial dos corpos como parâmetro do modelo.
3	Não considerar as propriedades viscoelásticas dos polímeros (E' , E'' , δ , etc.).
4	Não considerar parâmetros de superfície (rugosidade, raio de asperezas, função distribuição de altura de asperezas, etc.).
5	Dependência da área de contato do sistema tribológico.
6	Dependência da geometria de contato do sistema tribológico.
7	Considerar a dureza, medida por indentação, como parâmetro relevante.
8	Não considerar a umidade relativa como parâmetro do modelo.
9	Omissão da contribuição da condição PV no contato (prop. térmicas, equivalente mecânico do calor, equação de Arrhenius, etc.).
10	Não utilizar técnicas estatísticas e probabilísticas durante o modelamento.
11	Não considerar parâmetros de deformação.
12	Não considerar a influência da velocidade de deslizamento.

Na Tabela 2.5 estão apresentados os modelos e as críticas quanto aos parâmetros não considerados.

Tabela 2. 5 - Crítica aos modelos encontrados na literatura.

Ano	Autor / Tipo	Modelo	Crítica
1952	Shooter, K. V. Tipo I	$\mu = \frac{\tau_e}{H}$	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11 e 12
1953	King, R.F, e Tabor,D. Tipo II	$\mu = \frac{\tau_e}{H} \cdot \left(\frac{\gamma - 15}{11} \right)$	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11 e 12
1956	Lodge, A. S. e Howell, H. G. Tipo III	Superfícies Planas $\mu = \frac{F \cdot k_v^{n-1}}{P^{\beta_f(1-n)+n} \cdot N^{(1-n)(1-\beta_f)}} \cdot \frac{(1+h \cdot n)}{(h+1)^n}$	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9 e 10
		Superfícies Esféricas $\mu = \frac{F \cdot k_v^{n-1} \cdot (1 + \beta_f(1-n) + n)}{P^{[2+\beta_f(1-n)+n]^{1/3}} \cdot 2^{3/2 \cdot (1-n)\beta_f+n}} \cdot \frac{(1+h \cdot n)}{(h+1)^n} \cdot (\kappa_d \cdot \sigma_A)^{(n-1)(1-\beta_f)}$	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10 e 12
1956	Pascoe, M. W. e Tabor,D. Tipo III	$\mu = \frac{\pi}{4} \cdot s \cdot \left(\frac{1}{a} \right)^{2/b} \cdot P^{(2-b)/b} \cdot D^{(2b-4)/b}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8,9 ,10 e 12
1961	Rabinowicz, E. Tipo II	$\mu = \frac{\tau_e}{H} \left(1 + \frac{2 \cdot W_{ab} \cdot \cot \Theta}{H \cdot r} \right)$	1, 3, 7, 8, 9, 10, 11 e 12
1966	Cohen, S. C. e Tabor,D. Tipo III	$\mu = k \cdot \frac{s}{W} \cdot n \cdot \left(1 - \frac{2}{m} \right) \cdot r \cdot \left(2 - \frac{4}{m} \right) \cdot \left(\frac{W}{E} \right) \left(\frac{4}{m} - \frac{4}{m^2} \right) \cdot R \cdot 2 \left(1 - \frac{2}{m} \right)^2$	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10 e 12
1971	Bahadur, S. e Ludema, K. C. Tipo III	$\mu = \frac{A_h \cdot s}{W} = \frac{\pi \cdot s}{W} \left[\frac{3 \cdot W \cdot r \cdot (1-\rho)}{8 \cdot G} \right]^{2/3}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 e 12
1972	West, G. H. e Senior, J. M. Tipo II	$\mu = k_1 \cdot P_{HV} \cdot f_a$ $\mu = k_2 \cdot P_{HV} \cdot f_a \cdot (\gamma - 15)$ $\mu = k_3 \cdot P_{HV} \cdot \sigma_e \cdot (\gamma - 15)(1 + C_T)$	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10 e 12
1976	Suh, N.P. e Turner, A. L. Tipo II	$\mu = C_t \left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{\alpha \cdot D^2}{P} + \beta_h \right)$	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12
1982	Spurr, R. T. Tipo I	$\mu = \frac{\sigma_e}{H} \cdot \cot \Psi$	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 e 12

Tabela 2..5 - Crítica aos modelos encontrados na literatura (continuação)

1983	Madakson, P. B. Tipo II	$\mu = K \cdot \left(\frac{\rho \cdot A \cdot V^2}{P} \right)^x \cdot \left(\frac{\gamma}{H \cdot V^2} \right)^y \cdot \left(\frac{E_d \cdot Q}{P \cdot A \cdot r} \right)^z$	1, 7, 8 e 10
1984	Bassani, R., Di Pasquale, E. Vitali, C. Tipo II	$\mu = \frac{B_s}{B_n} \cdot \frac{\beta_d}{\sigma} + \frac{B_p}{B_n} \cdot \frac{\sigma}{\beta_d}$	1, 2, 3, 8, 9, 11 e 12
1992	Hutchings, I. M. Tipo II	Componente de adesão $\mu = \frac{\tau_o}{P} + \alpha$	2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 e 12
		Comp. de deformação da força de atrito $F_p = 0,17 \beta_{ed} P^{4/3} R^{-2/3} (1 - \nu^2)^{1/3} E^{-1/3}$ $F_p = \left(\frac{\beta_a \cdot P}{\pi} \right)^{1/3} \cdot \cot \alpha_d$	1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11 e 12

A partir das críticas feitas aos modelos, conclui-se que nenhum dos modelos encontrados foi capaz de descrever completamente o comportamento dos polímeros quanto ao atrito e que um modelo criterioso deve considerar parâmetros dinâmicos (carga e velocidade), propriedades dos materiais (mecânicas e físico-químicas), propriedades do contra-corpo (rugosidade e energia de superfície) e condições ambientais (umidade relativa e temperatura ambiente).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Nos ensaios para a determinação do coeficiente de atrito dinâmico foram utilizados pinos de PEAD e discos de aço galvanizado como corpo e contra-corpo, respectivamente.

Os pinos foram fornecidos pela Pirelli Cabos S.A., na forma de tirantes com 3mm de diâmetro, extrudados a partir do PEAD produzido pela POLISUL sob o nome comercial de Hostalen R, código 5010-T2.

As principais propriedades do polietileno de alta densidade estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1- Propriedades do polietileno de alta densidade.⁵³

Propriedades	Unidade	Valor
Densidade (ρ)	[Kg/m ³]	924 - 965
Peso Molecular (PM)	-	120000
Energia Superficial (γ)	[J/m ²]	0,31
Módulo de Elasticidade (E)	[GPa]	1,04 – 1,09
Tensão de Esc. Por Cisalhamento (τ_e)	[MPa]	6 - 12
Tensão de Escoamento por Tração (σ_e)	[MPa]	18 - 35
Temperatura de Transição Vítrea (Tg)	[°C]	-80
Condutividade Térmica (k)	[W/m oC]	3,76 - 5,02*
Difusividade Térmica (D)	[m ² /s]	0,192 x 10 ⁻⁵ *
Calor Específico (Cp)	[J/Kg.K]	2100 – 2700*

* Dados obtidos da referência ⁵⁴

Os discos foram obtidos a partir de uma chapa de aço carbono galvanizado por imersão a quente, com 2 mm de espessura, do almoxarifado do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (PMC-EPUSP).

Algumas propriedades de chapas de aço carbono galvanizado estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2- Propriedades do aço galvanizado.⁵³

Propriedades	Unidades	Valor
Condutividade Térmica (k)	[W/m oC]	54
Difusividade Térmica (D)	[m ² /s]	1,474 x 10 ⁻⁵

3.2 Métodos

Durante a realização dos ensaios foi feita preparação dos c.d.p_s para a caracterização dos materiais e medição de coeficiente de atrito dinâmico.

Para a caracterização dos materiais foram feitos exames por microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), calorimetria diferencial de varredura (DSC), medições de rugosidade e de dureza.

Para a determinação do coeficiente de atrito dinâmico foi realizado ensaio de pino-contra-disco.

3.2.1 Preparação dos pinos de PEAD

Os tirantes de PEAD foram confeccionados na forma de pinos com 23 mm de comprimento no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do PMC-EPUSP.

Para que a superfície de contato do pino estivesse paralela ao plano do disco foi realizado um processo de abrasão contra lixa d'água (grana 400) no equipamento de ensaio pino-contra-disco, até que fosse atingida a planicidade desejada.

O lixamento foi realizado sob carga de 4 N, com rotação de 150 rpm em trajetória espiral. Outro objetivo de utilizar o próprio equipamento de ensaio na

preparação da superfície do pino foi o de se obter sempre o mesmo acabamento em todos os pinos.

Os pinos foram armazenados em dissecador e, antes de cada ensaio, limpos com álcool etílico absoluto.

A Figura 3.1 apresenta uma amostra do pino de PEAD, do disco de aço galvanizado e a lixa d'água utilizada no acabamento da superfície do pino.

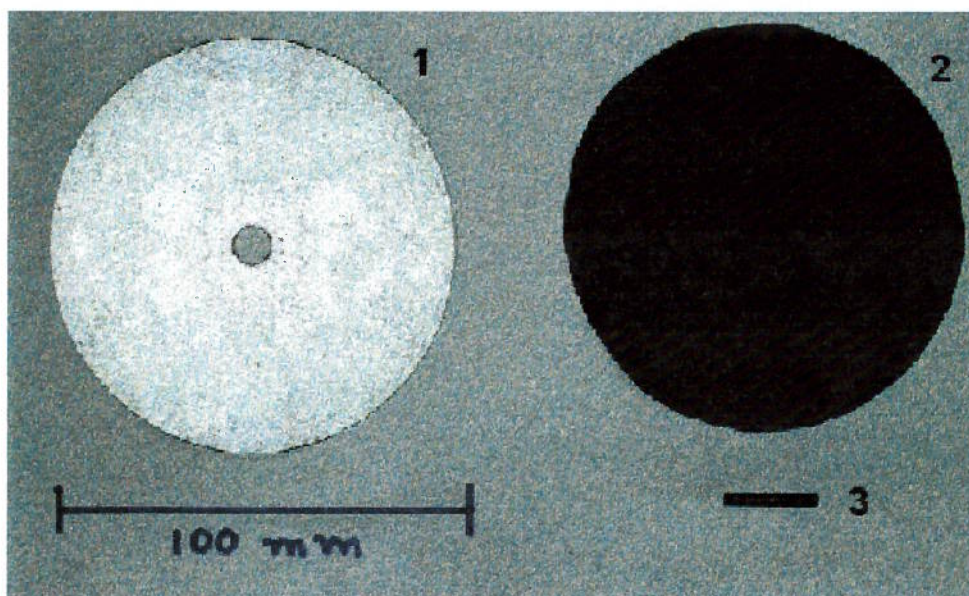


Figura 3. 1 - Fotografia do disco de aço galvanizado (1), lixa d'água cortada em forma de disco (2) e pino de PEAD com 3 mm de diâmetro (3).

A perpendicularidade entre pino e disco foi verificada por meio de um relógio comparador, marca Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm, posicionado à 40 mm do centro do disco. Esta manteve-se dentro do limite máximo de $\pm 1^\circ$ como recomendado pela norma ASTM G99-90 (Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus).⁵⁹

3.2.2 Preparação dos discos de aço galvanizado

Para a remoção de óxidos superficiais no disco, foi utilizada uma solução de hidróxido de amônia (NH_4OH) à 10%, conforme recomendação da norma ASTM G1 (Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimen).⁵⁵ Em seguida foi realizada uma limpeza com álcool etílico absoluto ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) e secagem com jato de ar quente.

A chapa de aço galvanizado foi cortada em placas quadradas com 102 mm de aresta e, posteriormente, torneadas até o diâmetro de 100 mm.

3.2.3 Caracterização dos pinos de PEAD

A determinação da temperatura de fusão do PEAD e a verificação de uma possível degradação ou mudança estrutural da superfície do polímero ao longo do ensaio, foram realizadas análises por calorimetria diferencial de varredura (DSC) no laboratório de polímeros do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP (PMT-EPUSP). O equipamento utilizado foi o modelo DSC-50, marca SHIMADZU. As análises deram-se em ambiente de argônio com um fluxo de 20ml por minuto.

As análises por DSC foram realizadas a partir de três pinos, sendo três amostras da superfície de contato e três da extremidade oposta.

Para a determinação de dureza do PEAD foram feitas oito medidas com carga de 5 kg.⁵⁶ O equipamento utilizado foi um durômetro Vickers, de fabricação ZWICK do Laboratório de Metalografia do PMT-EPUSP.

O exame das superfícies de desgaste dos pinos foi feito por MEV no equipamento LEICA STEREOSCAN 440 do Laboratório de Caracterização

Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP (PMI-EPUSP) e no equipamento LEO da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico Aeroespacial (IAE-CTA).

3.2.4 Caracterização dos discos de aço galvanizado

O teor de zinco da chapa galvanizada foi determinado utilizando-se de uma solução de ácido clorídrico diluído (1:1), segundo a norma ASTM A90-69 (Standard test methods for weight of coating on zinc-coated (galvanized) iron or steel articles).⁵⁷

Para o exame metalográfico da camada galvanizada, realizou-se polimento tradicional até pasta de diamante de 1 μm , seguido de ataque com reagente Nital 1%.

O exame da camada galvanizada⁵⁸ foi feito por MO no microscópio modelo BX60M, marca OLIMPUS, do LFS-PMC-EPUSP. Para determinar a espessura da camada galvanizada utilizou-se a escala graduada da lente ocular deste equipamento.

Foram realizadas vinte medições de rugosidade antes dos ensaios de atrito e oito após. O equipamento utilizado foi um rugosímetro modelo SURTRONIC 3+, de fabricação RANK TAYLOR HOBSON.

Os parâmetros de rugosidade medidos foram:

- Ra (CLA) = rugosidade média do perfil de alturas a partir de uma linha média
- Rq (RMS) = rugosidade média quadrática o perfil de alturas
- RzDIN (R_{tm}) = média das alturas de pico à vale
- Ry = altura máxima entre pico e vale
- Sm = distância média entre cristas do perfil na linha média

Os parâmetros de medição de rugosidade foram:

- Comprimento de corte – $L_c = 0,8$ mm
- Comprimento de medição – $L_m = 4,0$ mm
- Filtro capacitivo-resistivo (CR)

Para a medição de microdureza do substrato e da camada galvanizada, foram realizadas dez medidas com carga de 50 mN. O equipamento utilizado foi um durômetro modelo H100-V HCU-FISCHERSCOPE, de fabricação FISCHER.

3.2.5 Montagem do ensaio pino-contra-disco

Para a medida do coeficiente de atrito dinâmico foi utilizada um equipamento do tipo pino-contra-disco modelo TE-79 de fabricação PLINT & PARTNERS LTD, no LFS-PMC-EPUSP. A Figura 3.2 apresenta este equipamento.



Figura 3. 2 - Equ.

O equipamento de ensai partes principais: microcomputador que utiliza um software para controlar os parâmetros de ensaio e fazer aquisição de resultados, a máquina pino-contra-disco propriamente dita e a interface que promove a comunicação entre as partes.

aquisição de resultados, a máquina pino-contra-disco propriamente dita e a interface que promove a comunicação entre as partes.

A configuração da máquina mostrando os principais componentes do sistema pino-contra-disco pode ser visto na Figura 3.3.

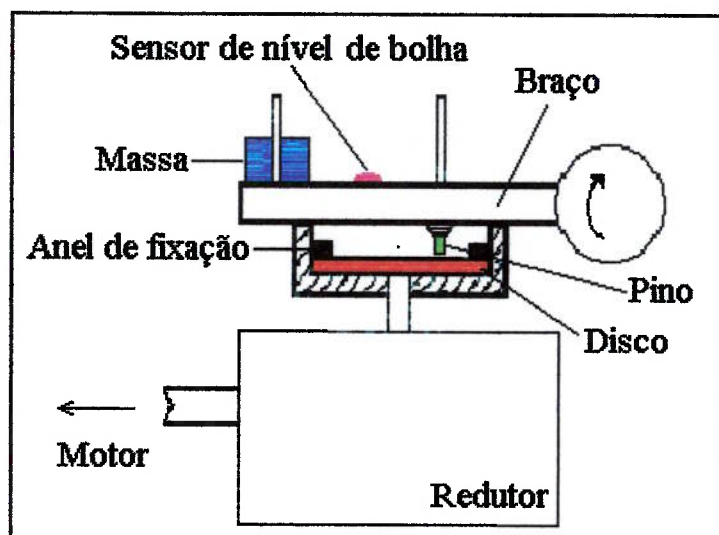


Figura 3.3 - Sistema pino-contra-disco.

O equipamento faz aquisição automática das medidas de força de atrito, número de rotações do disco, temperatura e umidade relativa do ambiente, além de calcular a velocidade tangencial e a distância percorrida. Os ensaios podem ser realizados com velocidade angular de 0 a 400 rpm e carga de 0,1 a 20 N.

Pode-se manter a velocidade tangencial constante durante ensaios em espiral, mediante a medida da translação relativa do pino e do controle da velocidade angular do disco. Todos os ensaios foram realizados a seco e seguindo as recomendações da Norma ASTM G-99.⁵⁹

Os principais requisitos desta Norma são:

- promover a limpeza dos c.d.p_s antes de cada ensaio;
- perpendicularidade entre os eixos de centro do disco e do pino de $\pm 1^\circ$;
- paralelismo entre a superfície de contato do pino com o plano do disco;

- iniciar o ensaio com o pino em contato com o disco;
- os ensaios devem ser repetidos com amostras adicionais.

Para a determinação do comportamento tribológico do par em questão foram realizados ensaios variando a carga aplicada e a velocidade de deslizamento, sendo que cada ensaio foi repetido 3 vezes. As cargas aplicadas foram: 0,5, 2 e 20 N e as velocidades de 0,03; 0,1 e 1 m/s.

Alguns ensaios complementares com cargas de 5 e 10 N também foram realizados, porém sem repetições.

Os valores de coeficiente de atrito foram obtidos após a estabilização do coeficiente de atrito dinâmico em função distância percorrida, este período é denominado de *running-in*. A distância total de deslizamento foi de 5.000 metros.

A taxa de aquisição de dados de coeficiente de atrito foi de um a cada 30 segundos de ensaio, para as velocidades tangenciais de 0,1 e 1 m/s, e a cada 45 segundos no ensaio de 0,03 m/s.

A Figura 3.4 mostra em detalhe a célula de carga utilizada na medição da força tangencial do pino, o sistema de carregamento (peso morto) e o sensor de nível de bolha utilizado para o ajuste de planicidade da superfície do pino com a do disco.

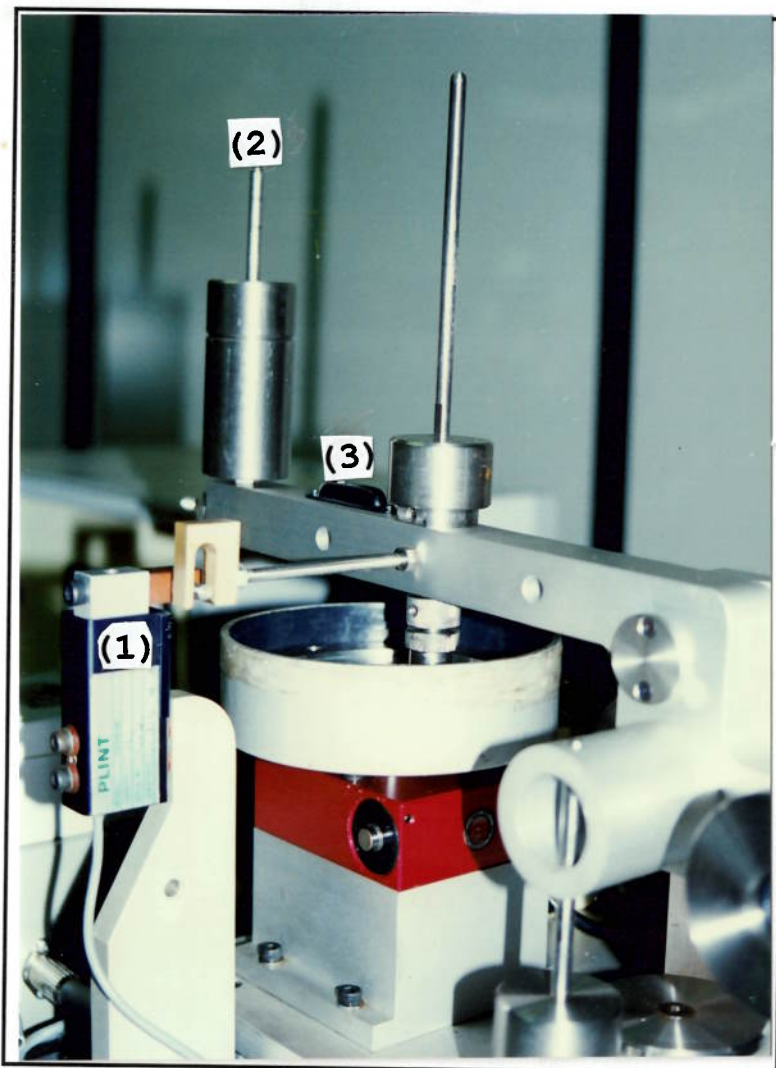


Figura 3. 4- Detalhes da célula de carga (1), sistema de carregamento (2) e sensor de nível de bolha (3).

Durante os ensaios foram monitoradas a temperatura e a umidade relativa do ambiente de ensaio. Para evitar variações bruscas da umidade relativa durante os ensaios foi utilizada uma campânula de acrílico fornecida pelo fabricante do equipamento, como pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3. 5 - Equipamento pino-contra-disco com campânula de acrílico.

3.2.6 Medição da temperatura no contato

Para a medição da temperatura média da superfície do pino durante os ensaios com a maior condição PV ($P = 20 \text{ N}$ e $v = 1 \text{ m/s}$), foi utilizado um medidor de temperatura modelo MT-914, marca MINIPA, com termopar do tipo k (cromel-alumel)⁶⁰. Foram realizadas medições em três ensaios. A Figura 3.6 mostra o arranjo experimental para a medição da temperatura de contato.

A correção dos valores de temperatura foi feita mediante a formulação de ARCHARD⁶¹ para o contato entre uma superfície circular deslizando contra um plano e os cálculos estão apresentados no ANEXO 1.

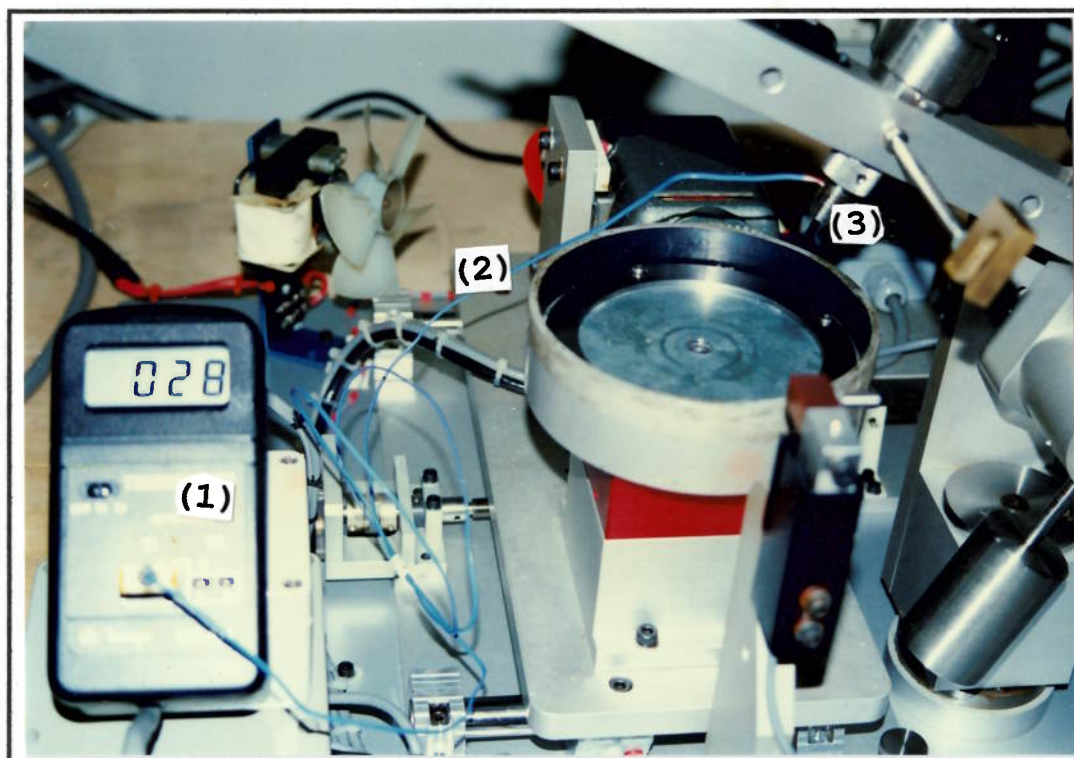


Figura 3. 6 - Montagem para medição de temperatura na ponta do pino de PEAD com medidor de temperatura (1), fio de termopar (2) e mandril com pino (3).

A Figura 3.7 apresenta de uma forma esquemática o contato entre o pino de PEAD e a superfície do disco de aço galvanizado, mostrando o posicionamento da ponta do termopar.

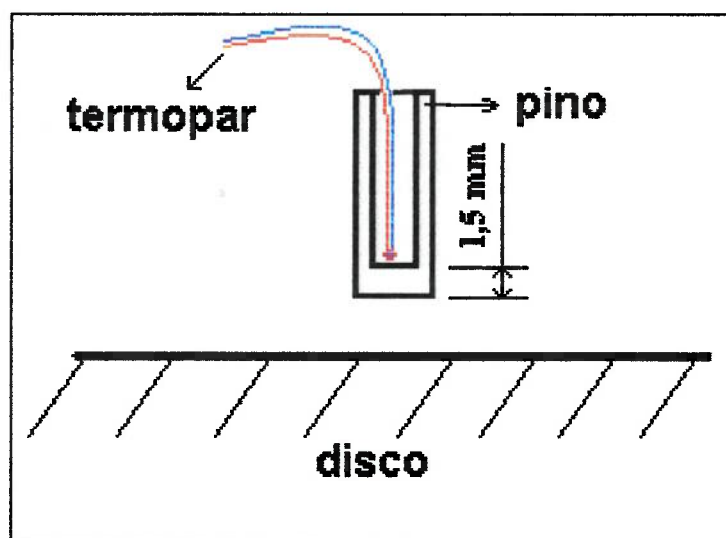


Figura 3. 7 - Esquema mostrando termopar, pino e disco.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos corpos-de-prova

Com o intuito de utilizar dados mais confiáveis sobre os materiais ensaiados, optou-se por caracterizar algumas propriedades importantes do PEAD e do aço galvanizado.

A caracterização do PEAD foi feita através da medição de dureza e da temperatura de fusão do material. Os resultados destas medições estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Propriedades medidas do PEAD.

Propriedades	Unidades	Valor
Dureza Vickers (HV)	[kgf/mm ²]	5,0 ± 0,5
Temperatura de Fusão (Tm)	[°C]	127,6 ± 0,5

A caracterização da camada de zinco do aço galvanizado foi feita através das medições de espessura, microdureza plástica da camada galvanizada e do substrato, além da determinação do teor de zinco da chapa. Os resultados destas medições estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Propriedades do aço galvanizado

Propriedades	Unidades	Valor
Espessura da camada	[µm]	30 ± 1
Microdureza plástica do substrato	[kgf/mm ²]	118 ± 1
Microdureza plástica da camada	[kgf/mm ²]	105 ± 1
Teor da camada de Zinco	[g/m ²]	240 ± 10

O aspecto micrográfico da camada galvanizada está, mostrado na Figura 4.1.

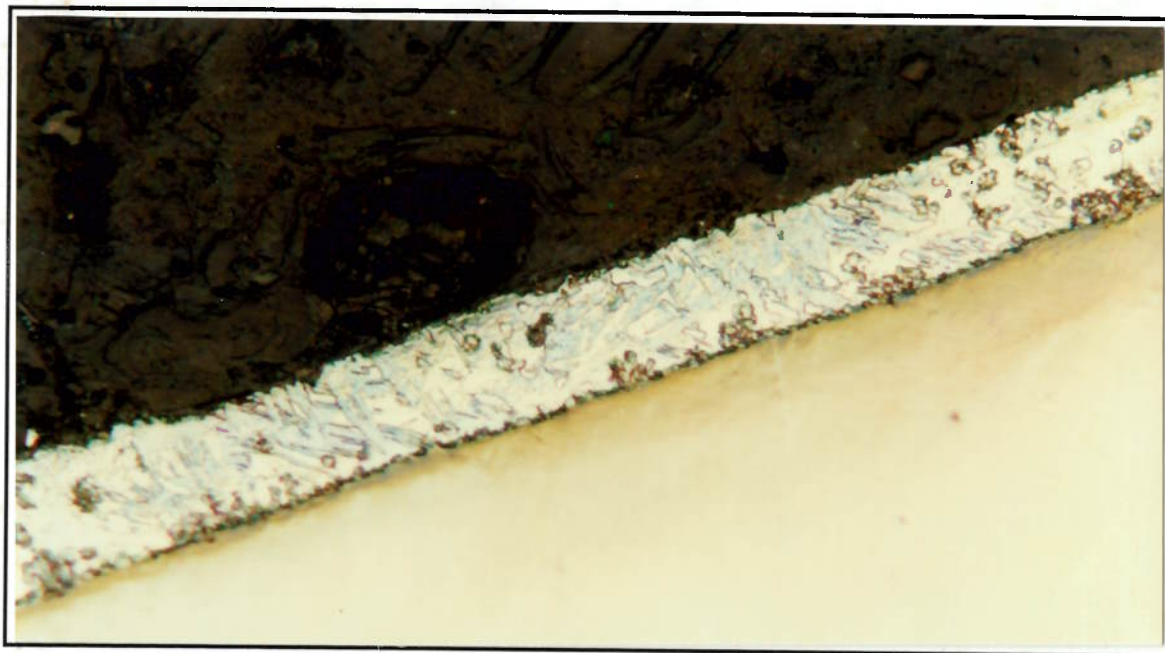


Figura 4. 1- Micrografia da camada galvanizada das chapas de aço, Nital 1% (500 x).

4.2 Temperatura no contato

Sabe-se que a energia dissipada no contato é proporcional à condição PV e responsável pelo aumento da temperatura na região de contato.¹⁰ A condição de ensaio mais severa utilizada neste trabalho foi com carga de 20 N e velocidade de deslizamento de 1 m/s ($PV=2829 \text{ [kW/m}^2\text{]}$), provocando as maiores temperaturas na região de contato.

Com base nos estudos de micro-mecanismos de desgaste para o deslizamento entre polímeros e metais, realizados por KAR; BAHADUR⁶², foram feitas análises, térmicas por DSC, na região próxima à superfície de contato dos pinos ensaiados com a maior condição PV. Além de se obter o valor da temperatura de fusão das amostras, esta análise permite detectar mudança na morfologia ou degradação na região próxima à superfície de contato do polímero. Os resultados destas análises estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3- Resultados da análise térmica por DSC para o PEAD.

Amostra	Posição	Massa [mg]	Temperatura de Fusão [°C]	Entalpia de fusão [J/g]	ΔE [J/g]
1	Fora do contato	3,2	127,8	183,68	
	No contato	1,4	128,0	163,69	19,99
2	Fora do contato	1,3	127,4	182,09	
	No contato	1,4	126,8	170,81	11,28
3	Fora do contato	3,1	128,4	171,66	
	No contato	1,5	127,5	169,80	1,86

Foram feitas medições de temperatura na ponta do pino durante três ensaios com a maior condição PV. Para correção dos valores de temperatura medidos utilizou-se a formulação de ARCHARD⁶¹ (ver Anexo 1), apresentada na Equação 4.1.

$$T_c = T_b + T_{me} \quad \text{Eq. 4. 1}$$

Os valores da temperatura do volume (T_b) a 1,5 mm da superfície do pino, medidos durante a realização dos ensaios, estão apresentados na Figura 4.2.

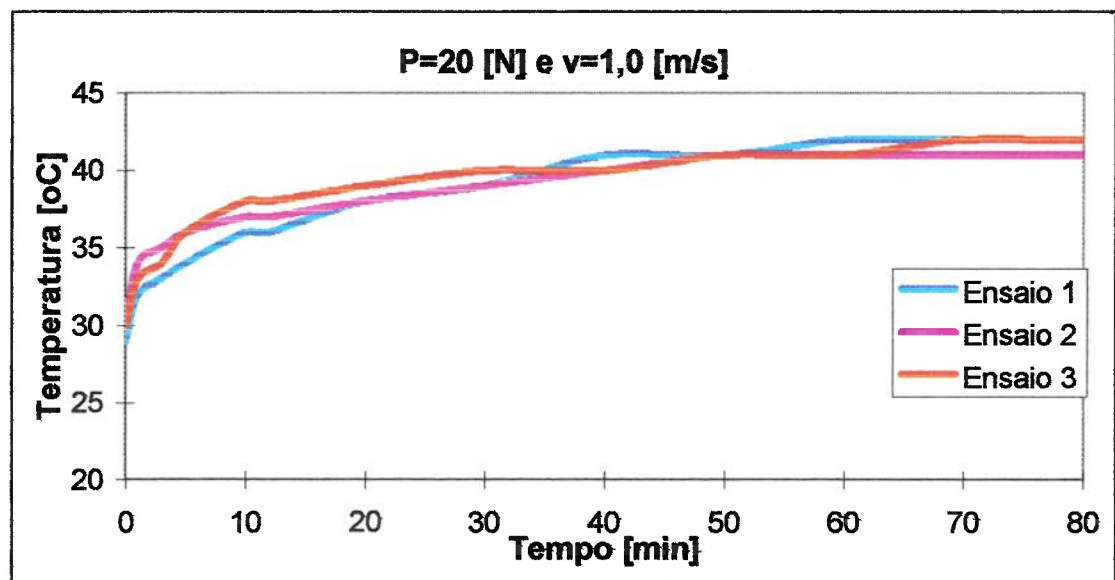


Figura 4. 2- Temperatura medida pelo termopar colocado a 1,5 mm da superfície do pino de PEAD em função do tempo de ensaio para ensaios com carga de 20 N e velocidade de deslizamento de 1 m/s.

A Figura 4.2 mostra que a temperatura de contato entre PEAD e o aço galvanizado, nos ensaios realizados com condição $PV = 2829 \text{ [KW/m}^2\text{]}$, atingiu o valor máximo de aproximadamente de $42 \text{ }^\circ\text{C}$.

Do Anexo 1, tem-se que $T_{me} = 2,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Substituindo os valores de T_b e T_{me} na Equação 4.1 obtém-se:

$$T_c = 42 + 2,7 \approx 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

Na Figura 4.3 o peso molecular médio, obtido da Tabela 3.1, e as temperaturas atingidas na região de contato (Figura 4.2), foram usados para delimitar aproximadamente, a região de trabalho do PEAD durante os ensaios. A figura mostra que o estado físico que o PEAD apresenta durante a realização dos ensaios é o estado de um plástico rígido com características viscoelásticas de deformação.

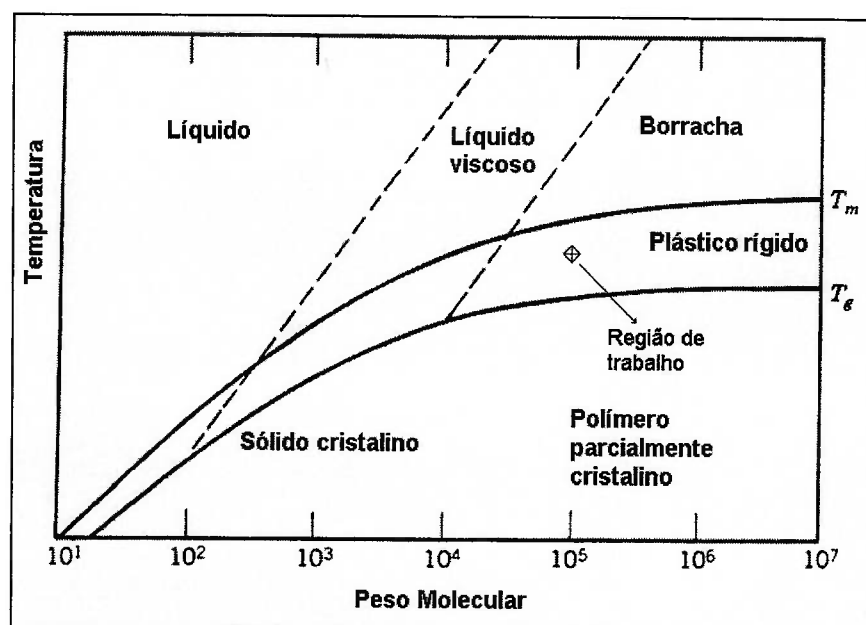


Figura 4. 3 – Dependência dos estados físicos dos polímeros de acordo com T_m e T_g em função do peso molecular.⁶³

Os resultados da Tabela 4.3 mostram que não houve mudança na temperatura de fusão do PEAD após a realização dos ensaios de atrito. A medição da temperatura na região próxima a superfície do pino, mostram que o calor gerado na superfície de

contato durante os ensaios não foi suficiente para provocar a fusão do material. Estas informações indicam que as temperaturas atingidas no contato não foram suficientes para provocar degradação térmica no material.

A diferença encontrada no valor da entalpia de fusão (ΔE), principalmente nas amostras 1 e 2, pode ser explicada devido à ocorrência de altas taxas de deformação plástica na região de contato (Figura 4.4), juntamente com a permanência à 45 °C por 40 minutos (Figura 4.2) durante os ensaios, pois, estas condições de contato podem ter provocado queda da cristalinidade na região e quebra ou realinhamento das cadeias poliméricas, diminuindo assim, a energia necessária para provocar a fusão do material.



Figura 4. 4 - Detalhe da superfície de desgaste, mostrando ondulação provocada por deformação plástica (500 x). A seta indica o sentido de deslizamento.

4.3 Análise da rugosidade dos discos

Durante a fase de preparação dos c.d.p.s, foram realizadas medições de rugosidade das chapas de aço galvanizado. Os valores médios e os desvios-padrão de 5

parâmetros de rugosidade medidos antes dos ensaios de atrito estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4. 4- Parâmetros de rugosidade da superfície da chapa de aço galvanizado antes dos ensaios.

	Ra	Rq	RzDIN	Ry	Sm
Média	0,9	1,2	4,8	7,0	180
D.Padrão	0,3	0,4	1,3	2,0	70

Como Ra é um parâmetro de rugosidade muito utilizado no estudo do comportamento tribológico dos materiais^{64,65,66}, optou-se por este, como valor de comparação entre a rugosidade do disco antes e após os ensaios. Os valores médios e os desvios-padrão do parâmetro Ra medidos após os ensaios, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 – Valores médios e desvios-padrão do parâmetro de rugosidade Ra das pistas de contato medidos após os ensaios.

Carga [N]	Vel = 1 m/s		Vel = 0,1 m/s		Vel = 0,03 m/s	
	Média	D.Padrão	Média	D.Padrão	Média	D.Padrão
20,0	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,2
2,0	0,9	0,3	0,9	0,2	0,9	0,3
0,5	0,9	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3

Utilizando o método de ASPIN-WELCH⁶⁷ (ver Anexo 2), foi realizado um teste de hipótese para verificar se os dados da Tabela 4.5 indicam mudança de rugosidade dos discos. Assim, o valor de Ra dos discos antes dos ensaios, foi comparado com o maior ($P=20\text{ N}$, $v=0,1\text{ m/s}$) e o menor ($P=0,5\text{ N}$, $v=0,03\text{ m/s}$) valor da Tabela 4.5.

Os resultados dos testes de hipóteses mostraram que, com 5% de significância, não houve mudança nos valores de rugosidade dos discos após a realização dos ensaios.

Portanto, não foi possível fazer uma correlação entre mudança de rugosidade e coeficiente de atrito dinâmico.

O exame microscópico da pista de contato mostrou a presença de regiões alisadas onde pode ter ocorrido arredondamento dos picos das asperezas, além de evidenciar a presença de filmes de PEAD depositados durante o deslizamento, como mostra a Figura 4.5.



Figura 4. 5 - Micrografia da superfície do disco apresentando a presença de filme de transferência de PEAD (1580 x).

A Figura 4.6 mostra que com o aumento da rugosidade do contra-corpo ocorre mudança no mecanismo de atrito, de adesivo para abrasivo. Baseado no trabalho de DOWSON et al⁶⁸, onde é verificada a influência da rugosidade no coeficiente de desgaste do polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) deslizando contra aço carbono, pode-se dizer que os experimentos de PEAD contra aço galvanizado indicam a ocorrência de atrito em condições de desgaste abrasivo, pois acredita-se que a faixa de valores de rugosidade dos discos ($R_a \approx 1 \mu\text{m}$) corresponde a região de mecanismo abrasivo.

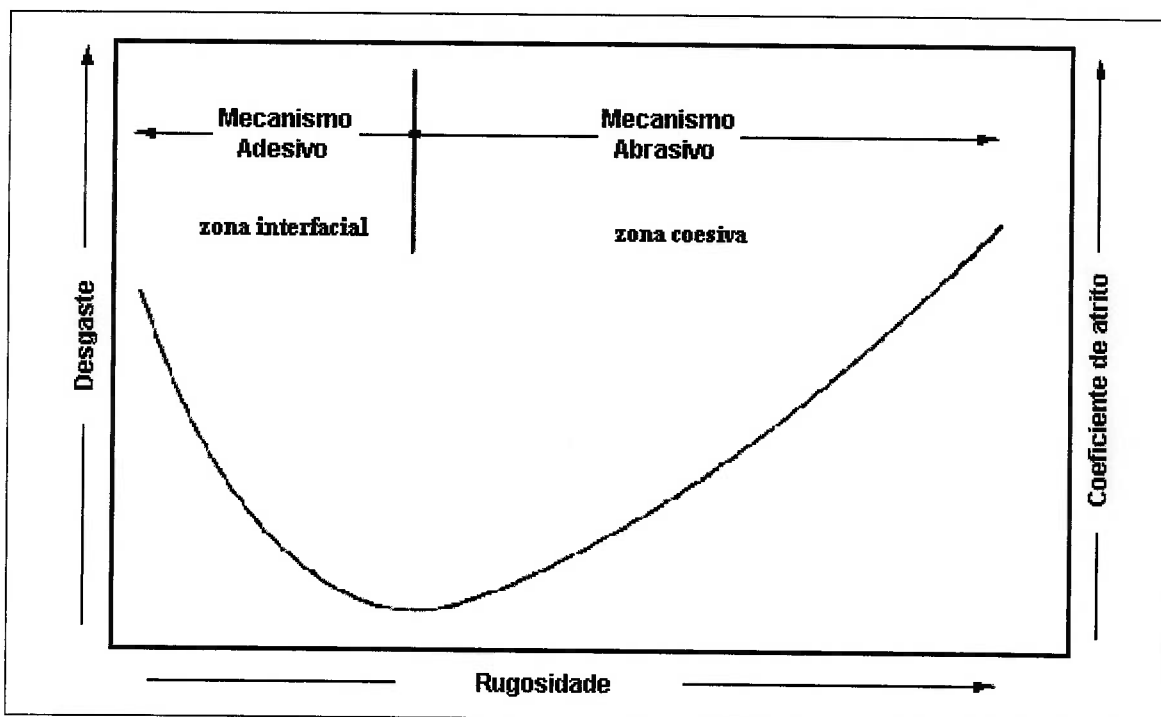


Figura 4. 6 – Desgaste e coeficiente de atrito de termoplásticos em função da rugosidade da superfície do contra-corpo.⁶⁹

Devido a presença esporádica de filme de transferência na superfície dos discos e a intensa deformação plástica ocorrida na superfície dos pinos (Figura 4.4), acredita-se que a componente de deformação é a parcela predominante do atrito durante os ensaios, este fato relaciona a zona coesiva da Figura 2.19, como sendo a região onde, predominantemente, ocorre a dissipação de energia na forma de atrito.

4.4 Efeito da carga e da velocidade no coeficiente de atrito dinâmico

4.4.1 Análise dos resultados de coeficiente de atrito dinâmico

Os valores de coeficiente de atrito dinâmico entre PEAD e aço galvanizado para diversas condições de ensaio estão apresentados na Tabela 4.6. Os cálculos de incerteza de medição e desvio-padrão das medidas estão apresentados no Anexo 3.

Tabela 4. 6 - Coeficiente de atrito dinâmico entre PEAD e aço galvanizado.

Carga [N]	Coeficiente de atrito dinâmico		
	vel = 1,0 [m/s]	vel = 0,1 [m/s]	Vel = 0,03 [m/s]
20.0	0,356 ± 0,004	0,286 ± 0,004	0,262 ± 0,002
10.0	0,33 ± 0,01	0,267 ± 0,004	0,24
5.0	0,29 ± 0,01	0,257 ± 0,004	0,21
2.0	0,26 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,14
0.5	0,29 ± 0,05	0,19 ± 0,03	0,13

Nota-se que na coluna referente à velocidade de deslizamento de 0,03 m/s da Tabela 4.6 não estão mostrados os valores de desvio-padrão. Este fato ocorre devido a impossibilidade de se determinar o desvio-padrão do coeficiente de atrito dinâmico destes ensaios. Uma discussão mais detalhada será feita no item 4.5, quando será analisado o efeito da umidade relativa do ambiente no coeficiente de atrito.

A Figura 4.7 mostra os resultados dos três ensaios de coeficiente de atrito dinâmico realizados com carga de 0,5 N e velocidade de 1,0 m/s em função da distância percorrida. Verifica-se uma oscilação muito nos valores de coeficiente de atrito, o que torna inviável a determinação de um período de *running-in* para estes ensaios.

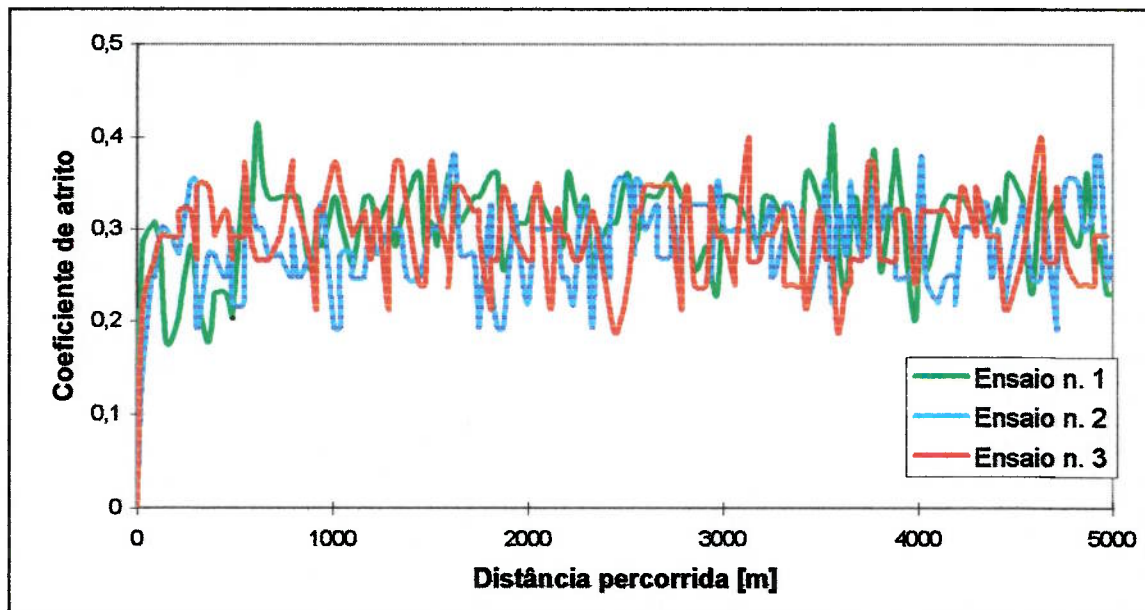


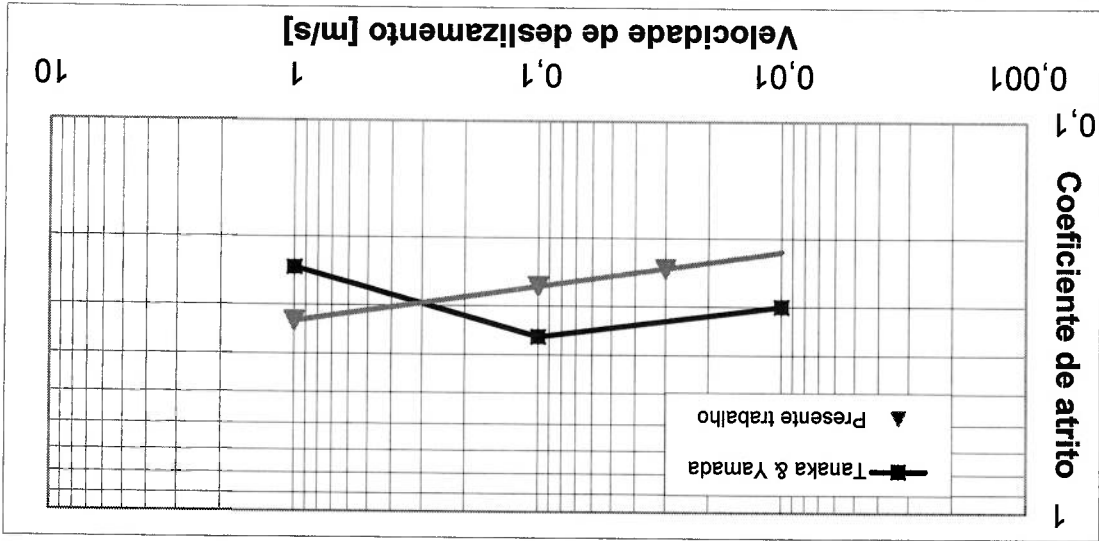
Figura 4. 7 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da distância de deslizamento para velocidade de 1 m/s e 0.5 N de carga aplicada.

Com isto, optou-se por desconsiderar este resultado nas futuras análises dos resultados de coeficiente de atrito dinâmico.

Uma hipótese para esta oscilação no coeficiente de atrito dinâmico, é que as condições de ensaio não são adequadas para promover contato contínuo entre a superfície do pino de PEAD e a do disco de aço galvanizado.

A Figura 4.8 mostra o comportamento do coeficiente de atrito dinâmico em função da carga aplicada para três níveis de velocidade de deslizamento. Observa-se que o coeficiente de atrito dinâmico é diretamente proporcional a carga aplicada e a velocidade de deslizamento, nota-se também que as inclinações das retas de ajuste são diferentes entre si.

Figura 4. 9 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento.



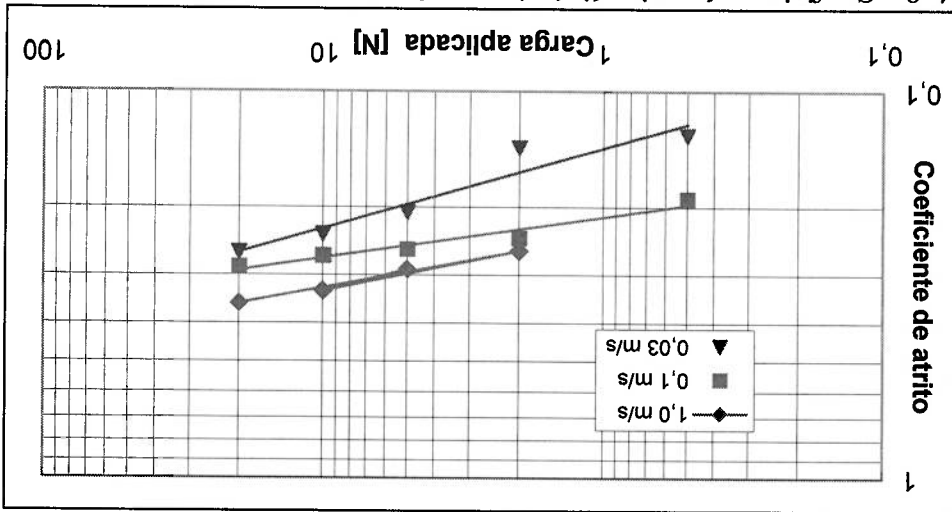
velocidade de deslizamento para uma carga aplicada de 10 N.

obtidos por TANAKA; YAMADA para o coeficiente de atrito dinâmico em função da A Figura 4.9 apresenta uma comparação entre os resultados deste trabalho e os

rugosidade Ra menor que 0,02 µm e temperatura ambiente por volta de 24 °C.

máquina do tipo pino-contra-disco, pinos com diâmetro de 3 mm, discos de aço com dinâmico do PEAD deslizando contra aço fundido à vácuo. Os autores utilizaram uma TANAKA; YAMADA estudaram o comportamento do coeficiente de atrito

Figura 4. 8 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da carga aplicada para 0,03 ; 0,1 e 1 m/s.



Para as menores velocidades, ocorre para ambos os arranjos experimentais, elevação do coeficiente de atrito dinâmico com a velocidade de deslizamento. As diferenças nos valores de coeficiente de atrito dinâmico se deve provavelmente às diferenças de rugosidade dos discos, material dos discos e na temperatura de contato.

A diferença na rugosidade entre os discos de aço fundido a vácuo e os de aço galvanizado, indicam a ocorrência de mecanismos de adesão com desgaste por fadiga de contato no primeiro e mecanismo de deformação plástica no segundo, predominando o desgaste abrasivo.

Para TANAKA; YAMADA ao se passar de 0,1 para 1 m/s, ocorre fusão do polímero devido à posição do pino em relação ao centro do disco, fenômeno que não ocorreu no presente estudo o que também justifica a diferença de comportamento observado entre os dois trabalhos.

A dissipação de energia responsável pelos valores de coeficiente de atrito foi atribuída a três mecanismos distintos:

a) Mecanismo de adesão (zona interfacial)

Apesar do parâmetro de rugosidade R_a , apresentado no item 4.3, não apresentar mudança durante os ensaios, foi verificada a presença de filme de transferência na superfície de contato do disco (Figura 4.5), porém a frequência deste mecanismo de desgaste foi pequena.

Os dados da Figura 4.8 indicam uma relação diretamente proporcional entre o coeficiente de atrito e a carga aplicada e não uma variação com expoente entre $1/3$ e $1/4$, indicativo de mecanismos de adesão, como afirma HUTHINGS²⁷.

Com isto, pode-se concluir que a dissipação de energia devido a ocorrência de mecanismo de adesão possui pequena importância no valor total do coeficiente de atrito dinâmico.

b) Mecanismo viscoplástico

Durante os ensaios, verificou-se que a intensa deformação plástica provocou a ocorrência de trincas na superfície de contato do polímero (Figura 4.10). Apesar de não se conseguir determinar quais mecanismos de deformação plástica (movimento de discordâncias, maclação, etc.) atuaram durante o deslizamento, atribui-se uma parcela da energia dissipada durante os ensaios a mecanismos de deformação viscoplástica.

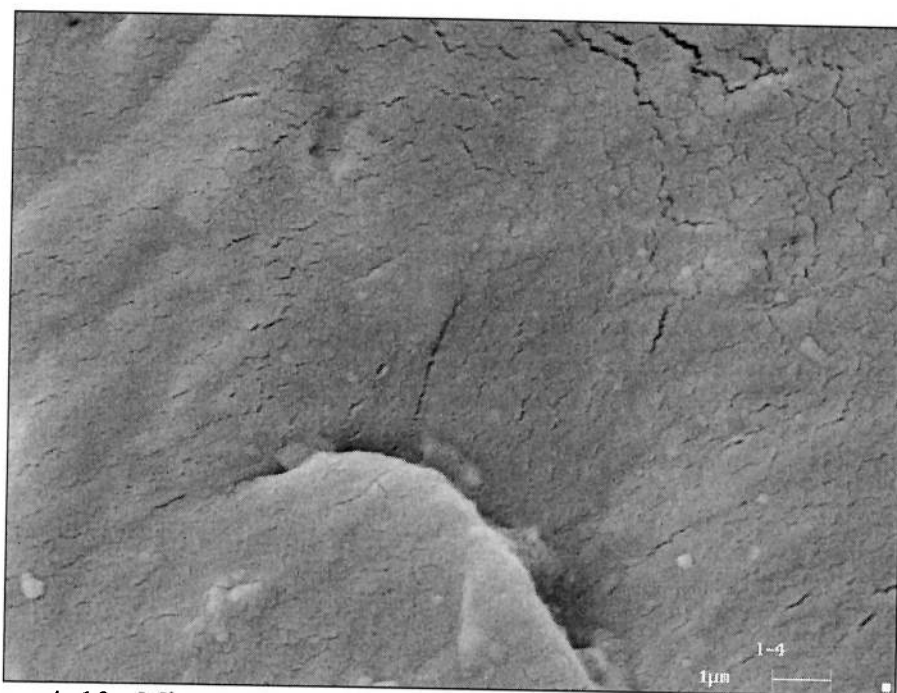


Figura 4. 10 - Micrografia da superfície do pino de PEAD mostrando intensa deformação plástica e a propagação de trincas.

c) Mecanismos viscoelásticos

O terceiro mecanismo de atrito presente explica a elevação do coeficiente de atrito com a velocidade e a carga aplicada observadas com mudanças no comportamento viscoelástico dos polímeros com o aumento na temperatura. O aumento de temperatura

na região de contato provoca mudanças na energia de amortecimento dissipada pelo polímero, representada pelo fator $\text{tg } \delta$ (ver item 2.1.3).

A Figura 4.11 apresenta a variação da energia de amortecimento em função da temperatura para o PEAD. Esta figura foi adaptada com os valores de T_g , T_m e a faixa de temperatura que o material esteve submetido durante os ensaios.

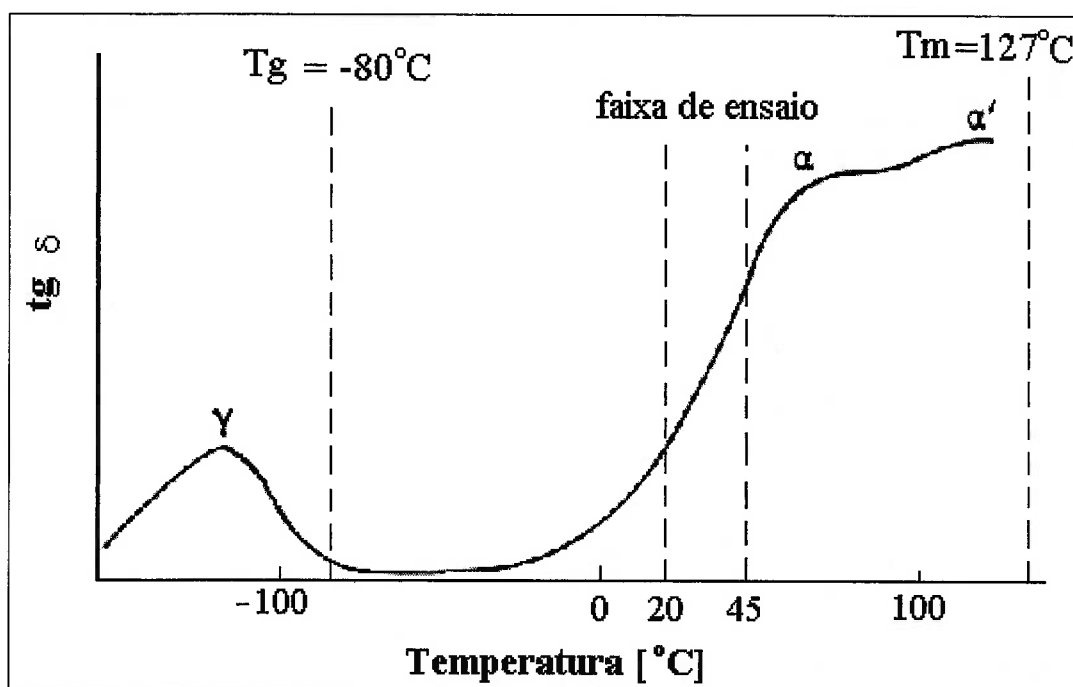


Figura 4. 11 – Espectro de energia de amortecimento ($\text{tg } \delta$) em função da temperatura para o PEAD, apresentando a T_g , T_m do PEAD e a faixa de temperatura alcançada durante os ensaios.¹⁷

Na Figura 2.20, LUDEMA; TABOR²⁴ mostram que há uma correlação entre a componente de deformação do coeficiente de atrito dinâmico e a energia de amortecimento para o PTFE. Sabe-se que durante os ensaios houve intensa deformação plástica na superfície do pino, portanto é razoável dizer que houve deformação viscoelástica na região sub-superficial (zona coesiva). Assumindo que o comportamento do PEAD seja semelhante ao PTFE, pode-se intuir que o coeficiente de atrito dinâmico entre PEAD e aço galvanizado possui uma correlação com a energia de amortecimento do PEAD.

Na Figura 4.11, observa-se que quanto maior a temperatura do PEAD durante os ensaios, maiores são os valores $\text{tg } \delta$. Sabe-se que quanto maior a carga e a velocidade, maiores serão as temperaturas no contato, o que explica porque o coeficiente de atrito dinâmico entre o PEAD e o aço galvanizado apresenta valores diretamente proporcionais à carga e a velocidade.

A Figura 4.12 mostra esquematicamente os mecanismos de dissipação de energia responsável pelo atrito de materiais poliméricos.

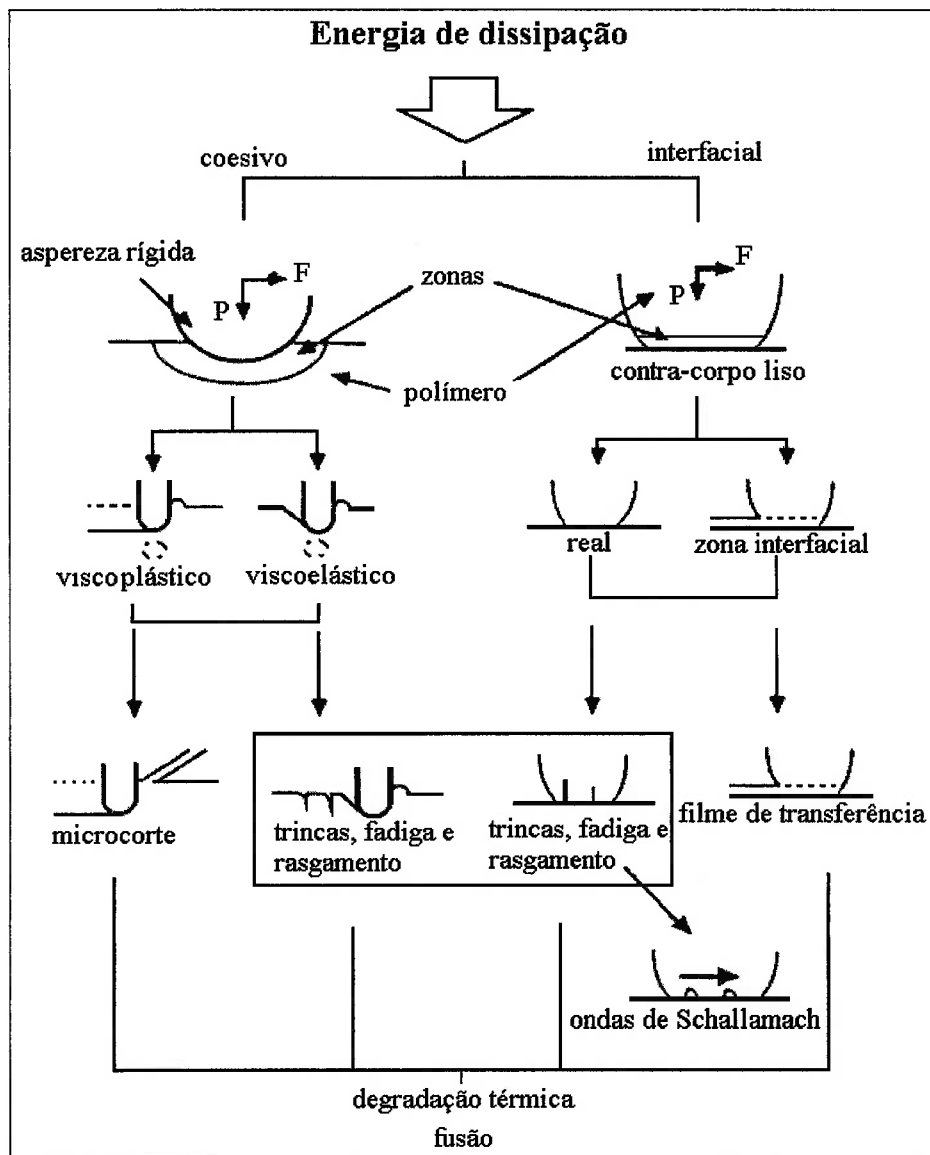


Figura 4. 12 - Classificação geral sobre mecanismos de dissipação de energia responsáveis pelo atrito e pelo desgaste de polímeros.⁷⁰

4.4.2 Efeito da Condição PV (PRESSÃO-VELOCIDADE)

A condição PV é parâmetro utilizado na seleção de mancais de deslizamento. A condição PV limite delimita o grau de severidade limite antes da fusão do material. Estima-se que esta condição não foi alcançada durante os ensaios, pois, para o maior valor de PV ensaiado ($PV=2829 \text{ kW/m}^2$) a temperatura no contato estabilizou-se em torno de 45°C .

A Tabela 4.7 e a Figura 4.13 apresentam os resultados de coeficiente de atrito dinâmico em função da condição PV ensaiadas, admitindo-se que a área de contato do pino manteve-se constante durante todo os ensaios ($A = 7,07 \text{ mm}^2$).

Tabela 4. 7 - Coeficiente de atrito dinâmico para diversas condições PV.

Carga [N]	Velocidade [m/s]	PV [kW/m^2]	Coeficiente de atrito
0,5	0,03	2	0.13
0,5	0,1	7	0.19
2	0,03	8	0.14
2	0,1	21	0.24
10	0,03	28	0.24
5	0,03	42	0.21
5	0,1	71	0.257
20	0,03	85	0.262
10	0,1	141	0.267
2	1	283	0.26
20	0,1	283	0.286
5	1	708	0,29
10	1	1415	0.33
20	1	2829	0.356

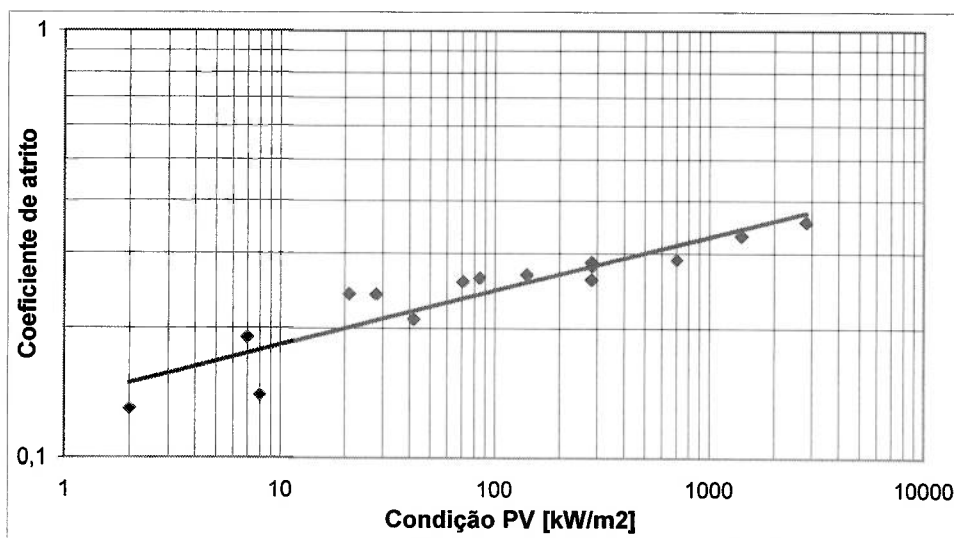


Figura 4.13 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da condição PV.

A Figura 4.13 indica a tendência de aumento no coeficiente de atrito dinâmico para condições PV cada vez mais severas. A hipótese para este resultado está vinculada às três parcelas do coeficiente de atrito presentes durante o contato. Para condições PV cada vez severas, maiores serão principalmente as componentes viscoplástica e viscoelástica.

4.5 Efeito da umidade relativa no coeficiente de atrito

Como já foi mencionado no item 3.2, o equipamento de ensaio pino-contra-disco faz medições de umidade relativa e da temperatura ambiente ao longo dos ensaios.

Os valores médios do coeficiente de atrito dinâmico, da umidade relativa e da temperatura ambiente, medidos durante os ensaios, estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4. 8- Valores médios de coeficiente de atrito dinâmico, umidade relativa e temperatura ambiente para diversas condições de velocidade e carga.

Carga[N]	Coeficiente de atrito dinâmico			Umidade relativa [%]			Temperatura ambiente [°C]		
	Velocidade [m/s]			Velocidade [m/s]			Velocidade [m/s]		
	1,0	0,1	0,03	1,0	0,1	0,03	1,0	0,1	0,03
20	0,356	0,286	0,262	57,0	59,3	58,0	20,3	20,7	20,3
2	0,26	0,24	0,14	50,3	54,0	52,7	23,0	23,0	23,0
0,5	-	0,19	0,13	56,0	55,7	57,0	21,7	24,7	21,7

Da Tabela 4.8 verifica-se que os valores médios de umidade relativa e temperatura ambiente não apresentam correlação com os resultados de coeficiente de atrito dinâmico.

Durante a realização dos ensaios com velocidade de deslizamento de 1 e 0,1 m/s os valores de umidade relativa não apresentaram variações significativas ($\pm 0,5\%$).

Porém, ao analisar valores de coeficiente de atrito e umidade relativa em função da distância percorrida para os ensaios com velocidade de 0,03 m/s, observa-se nitidamente que o coeficiente de atrito dinâmico acompanha as mudanças na umidade relativa durante o período de ensaio.

A Figura 4.14 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito dinâmico e umidade relativa para ensaios com velocidade de 0,03 m/s e cargas de 0,5 à 20 N. A análise dos dados da curva de coeficiente de atrito desta figura, mostra a impossibilidade de se obter o desvio-padrão dos resultados destes ensaios, pois a dispersão dos resultados não ocorre devido a fatores aleatórios e sim, devido a variação na umidade relativa. É devido a este fato que os valores de coeficiente de atrito dinâmico, dos ensaios com velocidade de 0,03 m/s, da Tabela 4.6 não apresentam incertezas de medição.

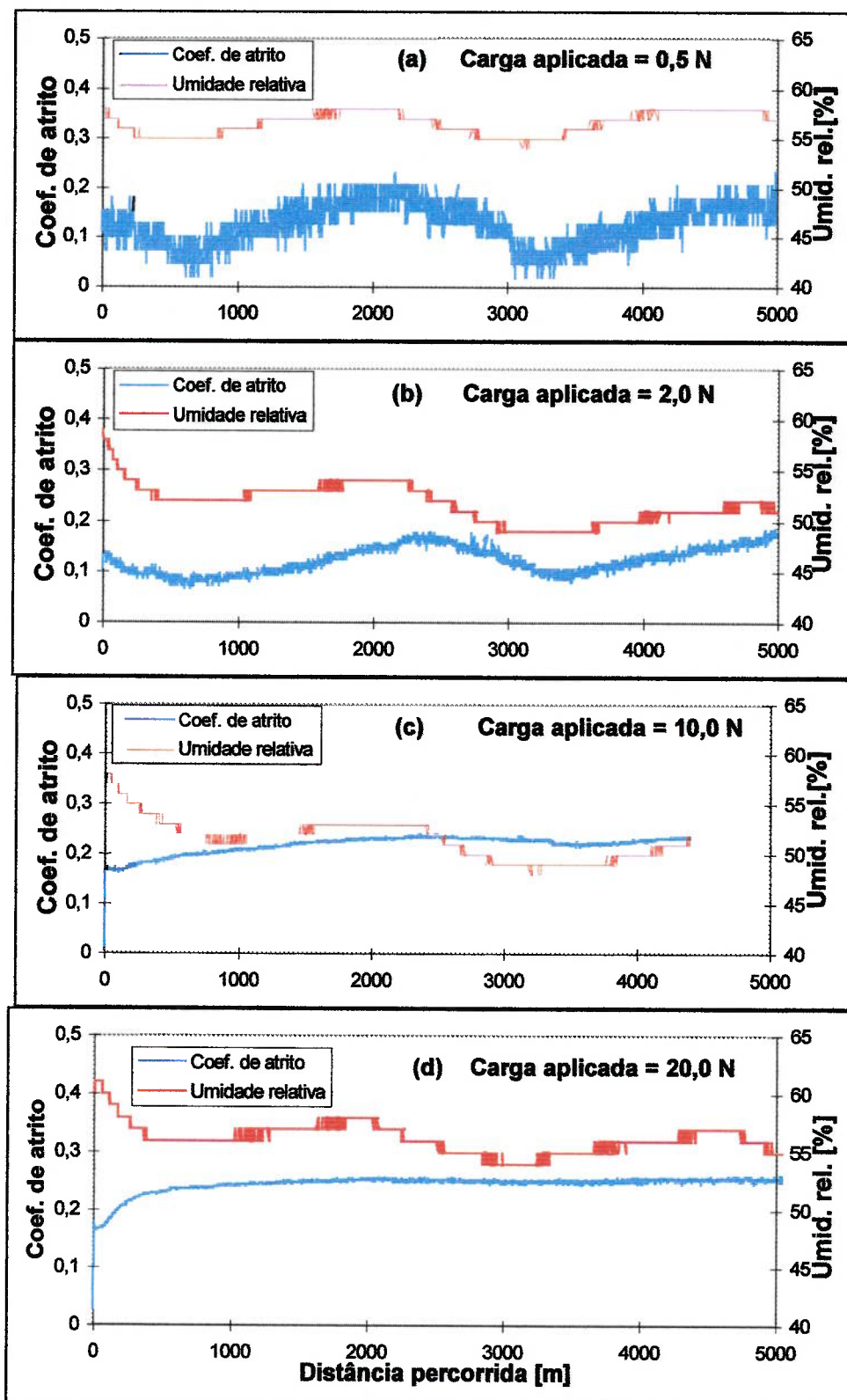


Figura 4. 14 - Coeficiente de atrito dinâmico e umidade relativa em função da distância de deslizamento, (a) $P = 0,5 \text{ N}$, (b) $P = 2 \text{ N}$, (c) $P = 10 \text{ N}$ e (d) $P = 20 \text{ N}$.

Na Figura 4.14 ainda se verifica que com o aumento da carga aplicada, menores serão as flutuações nos valores de coeficiente de atrito dinâmico e, conseqüentemente, menores serão os desvios-padrão destes resultados.

A Figura 4.14 mostra que o coeficiente de atrito dinâmico é diretamente proporcional à umidade relativa e que esta dependência é fortemente afetada pela carga aplicada, pois para cargas cada vez mais elevadas, mesmo com mudanças de umidade relativa semelhantes (entre 40 e 60 %), menores são seus efeitos. Nota-se também uma pequena defasagem entre as curvas de coeficiente de atrito e umidade relativa, principalmente nas curvas (a) e (b), indicando que a resposta do material quanto ao seu comportamento tribológico não é imediata às mudanças nas condições ambientais.

O estudo da umidade relativa como variável tribológica tem sido pesquisada em diferentes sistemas tribológicos e diferentes materiais, mas está longe de haver consenso na literatura. YAMAGUCHI¹⁰ mostra que o coeficiente de atrito para o PTFE é inversamente proporcional à umidade relativa ao contrario do observado no presente estudo. Da mesma forma, comportamentos exatamente opostos do coeficiente de atrito tem sido observados por diferentes autores para materiais de mesma natureza como os cerâmicos (nitreto de silício, zircônia e carboneto de silício)⁷¹ e metais puros (cromo, titânio, níquel, ferro, cobre e prata)^{72, 73}.

A umidade relativa crítica determina o momento em que uma fina camada de água forma-se na superfície de um material com o aumento da umidade relativa do ambiente (~40% para os metais). Sabe-se que quanto maior a umidade relativa do ambiente, maior será a espessura desta camada.⁷⁴

Como os ensaios de atrito foram realizados a seco, é justificável supor que o regime de lubrificação presente durante os ensaios, devido à formação de uma fina

camada de água na superfície do disco, é o de lubrificação limite. Da análise da curva de STRIBEK²⁷ na Figura 4.15, nota-se que com o aumento da espessura do lubrificante para o regime de lubrificação limite, o coeficiente de atrito diminui. Assim a elevação da umidade relativa deveria conduzir a menores valores de coeficiente de atrito.

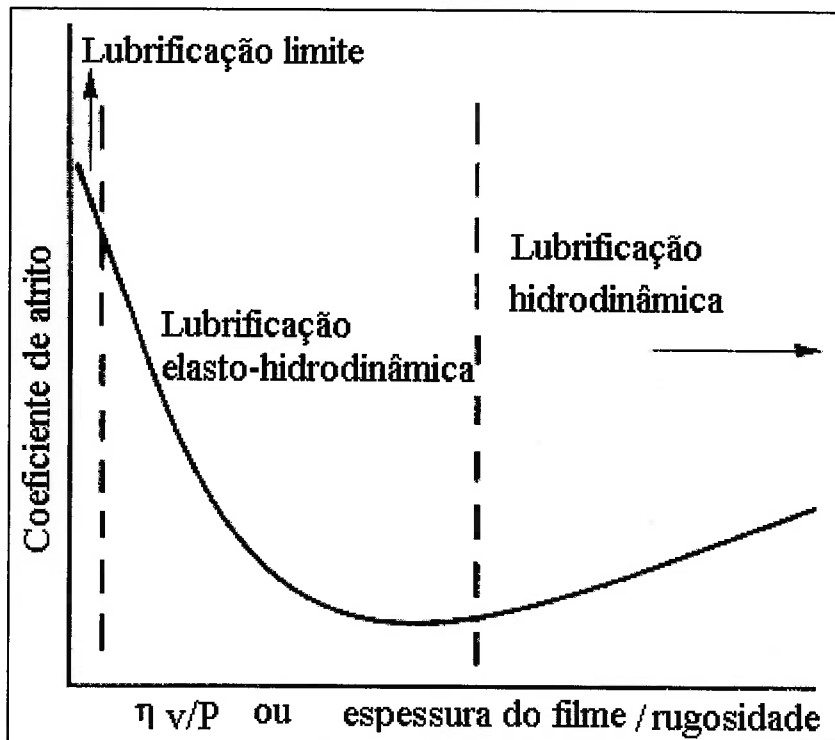


Figura 4. 15 – Regimes de lubrificação para o deslizamento de metais em função do quociente entre a espessura do filme lubrificante e a rugosidade do contra-corpo.²⁷

Outra análise que se pode fazer com esta mesma curva é que, a elevação da carga leva a diminuição no número de STRIBECK deslocando o coeficiente de atrito para valores mais elevados como o que se observa no presente trabalho. Ou seja, a análise do filme lubrificante, enquanto explicação para a variação do coeficiente de atrito com a umidade requer experimentos mais criteriosos.

Outra explicação para a variação do coeficiente de atrito com a umidade decorre de suas propriedades mecânicas. Sabe-se também que as propriedades mecânicas dos polímeros dependem da umidade relativa devido à características higroscópicas destes materiais. Assim, a presença de moléculas de água na estrutura do polímero pode além

de dificultar o deslizamento entre as macromoléculas, também pode influenciar a energia superficial, as propriedades térmicas e a capacidade de adesão destes materiais. A absorção de água pelo polímero, também provoca um aumento no volume, o que acarreta em mudanças na área de contato.

A hipótese para que o coeficiente de atrito dinâmico, no caso do PEAD contra aço galvanizado, seja diretamente proporcional ao aumento da umidade relativa, é que os efeitos desta nas propriedades do polímero possuem maior influência na reposta tribológica do material do que a possível presença de um filme de água na interface.

Isto explica tanto o atraso no comportamento da curva de coeficiente de atrito em relação à umidade relativa, quanto a influência da carga aplicada ao polímero, pois, com o aumento da carga, o mesmo apresentará uma estrutura molecular mais compacta e menos suscetível a esta influência.

4.6 Discussão do modelo de LODGE & HOWELL

Durante a revisão bibliográfica sobre modelos de coeficiente de atrito dinâmico, foi apresentado o modelo proposto por LODGE; HOWELL⁴⁴ para materiais não metálicos. Esse modelo mostra que a relação entre a força de atrito e a carga normal aplicada é exponencial, sendo n chamado de índice de atrito (Eq. 4.1).

$$F = \mu \cdot P^n \quad \text{Eq. 4. 1}$$

Com o intuito de verificar a aplicabilidade deste modelo, utilizou-se os resultados de medição de força de atrito entre PEAD e aço galvanizado nas condições de ensaios já apresentadas. Estes resultados estão na Figura 4.16.

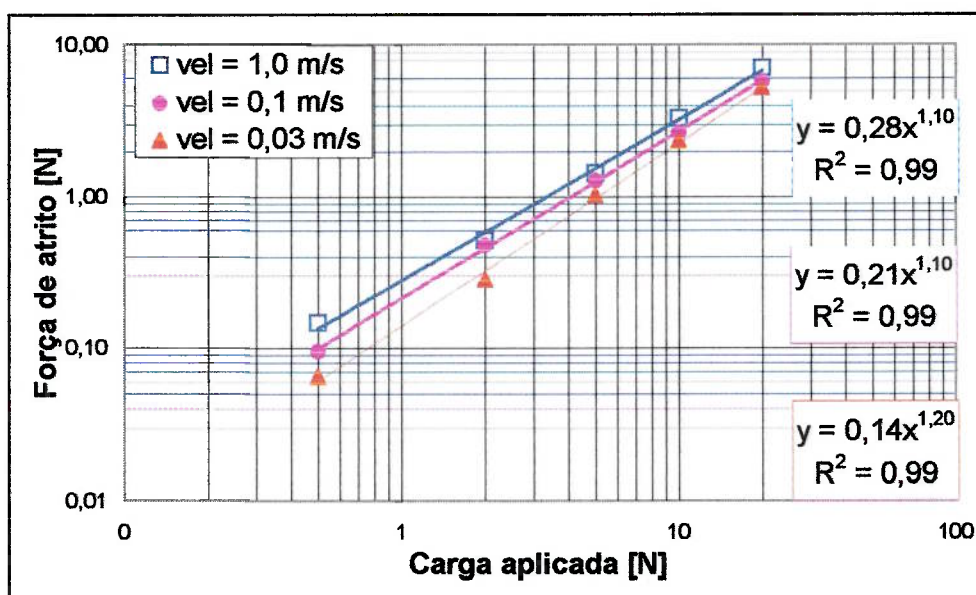


Figura 4. 16 - Força de atrito em relação à carga aplicada, mostrando a curva de ajuste para 3 níveis de velocidade.

Nesta figura, observa-se que a força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada e à velocidade de deslizamento. Fazendo o ajuste dos pontos usando funções exponenciais, nota-se uma correlação bastante satisfatória, como pode ser observado nos coeficientes de correlação (R^2).

A Tabela 4.9 apresenta os valores de coeficiente de atrito dinâmico e índice de atrito, segundo o modelo de LODGE; HOWELL.

Tabela 4. 9- Coeficiente de atrito e índice de atrito para diversas velocidades de deslizamento.

Velocidade (m/s)	Coefficiente de atrito μ	Índice de atrito n
1	0,28	1,1
0,1	0,21	1,1
0,03	0,14	1,2

Os autores propõem que o índice de atrito seja uma constante que representa o nível de deformações alcançado durante o deslizamento e que, numericamente, seu valor

situe-se entre 0 e 1. Para deformações totalmente elásticas o valor do índice de atrito seria $2/3$ e para deformações totalmente plásticas $n = 1$.

Utilizando o modelo de LODGE; HOWELL, pode-se dizer que o PEAD possui um índice de atrito de aproximadamente 1,1 e que para PEAD o coeficiente de atrito será de 0,28 quando a velocidade de deslizamento for de 1 m/s, 0,21 para 0,1 m/s e 0,14 para 0,03 m/s. Assim, segundo o modelo, o coeficiente de atrito é independente da carga aplicada; dependendo somente, da velocidade de deslizamento.

A intensa deformação plástica na superfície dos pinos (Figura 4.5), juntamente com a temperatura atingida no contato e o sistema tribológico utilizado, podem ter sido os fatores que conduziram a um índice atrito superior a 1 para o deslizamento entre PEAD e aço galvanizado. Comportamento semelhante ao do presente trabalho foi encontrado por VELEZ-RESTREPO⁷⁵ para o coeficiente de atrito dinâmico entre um penetrador tipo Vickers e ferro fundido nodular austemperado. O autor também acredita que este comportamento é devido à intensa deformação plástica presente em seus ensaios.

4.7 Modelo de coeficiente de atrito dinâmico

As limitações dos modelos encontrados na literatura conduz à necessidade de desenvolver um modelo para coeficiente de atrito dinâmico que seja adequado aos resultados obtidos nesta dissertação.

O modelo de coeficiente de atrito dinâmico apresentado a seguir, foi desenvolvido com a metodologia utilizada por MADAKSON⁵⁰, RHEE⁷⁶ e VISWANATH; BELOW⁷⁷.

Foram escolhidos como parâmetro para o coeficiente de atrito dinâmico as características da superfície do contra-corpo, propriedades dos materiais e variáveis de deslizamento, apresentas a seguir:

- F = força de atrito [N]
- P = carga aplicada [N]
- γ = energia superficial [J/m^2]
- ρ = densidade do PEAD [kg/m^3]
- v = velocidade de deslizamento [m/s]
- k = condutividade térmica [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]
- E = módulo de elasticidade do PEAD [Pa]
- C_p = Calor específico à pressão constante [$\text{J}/\text{kg K}$]
- τ_e = tensão de escoamento por cisalhamento do PEAD [Pa]
- r = parâmetro de rugosidade R_a dos discos de aço galvanizado [μm]

Assim, aplicando o Teorema Π , para análise dimensional, foram obtidos os seguintes grupos:

$$\left(\frac{F}{P}\right), \left(\frac{P^4 \cdot r}{E \cdot \gamma}\right), \left(\frac{v \cdot \rho \cdot C_p \cdot \gamma}{\tau_e \cdot k}\right)$$

O grupo adimensional que segue o comportamento da velocidade de deslizamento pode ser dividido em dois, da seguinte forma:

$$\left[\left(\frac{v^{1/2} \cdot C_p}{k} \right) \cdot \left(\frac{v^{1/2} \cdot \rho \cdot \gamma}{\tau_e} \right) \right]$$

A partir dos grupos adimensionais obtidos, o cálculo do coeficiente de atrito é dado por:

$$\mu = C \cdot \left(\frac{P^4 \cdot r}{E \cdot \gamma} \right)^{x/4} \cdot \left(\frac{v \cdot \rho \cdot \gamma}{\tau_e} \right)^{y/2} \cdot \left(\frac{v \cdot Cp}{k} \right)^{y/2} \quad \text{Eq. 4. 2}$$

onde C é chamado de constante de atrito.

Para a determinação dos índices x e y do modelo, é necessário recorrer aos índices das funções de ajuste de pontos das Figuras 4.17 e 4.18, onde a inclinação média das curvas obtidas representam os expoentes correspondentes aos grupos a que carga aplicada e velocidade de deslizamento pertencem.

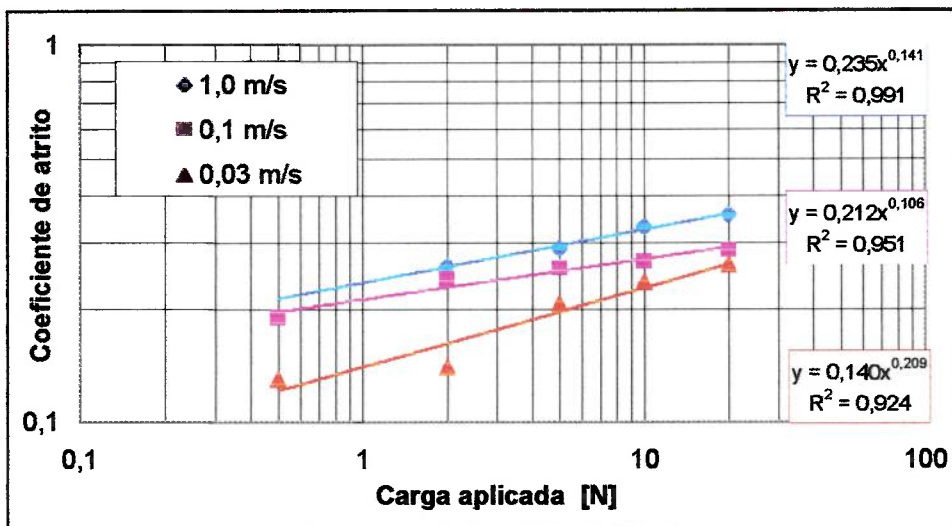


Figura 4. 17 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da carga aplicada para 3 níveis de velocidade.

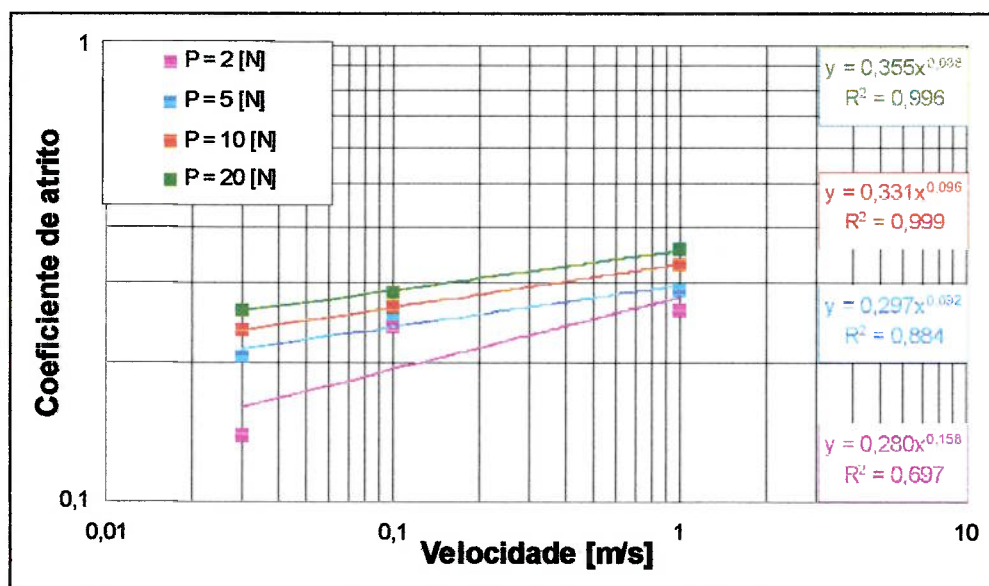


Figura 4. 18 - Coeficiente de atrito dinâmico em função da velocidade de deslizamento, para 4 níveis de carga aplicada.

A Tabela 4.10 apresenta os valores dos expoentes dos grupos adimensionais referentes à carga aplicada e à velocidade de deslizamento, obtidos pelo ajuste das curvas das Figuras 4.17 e 4.18.

Tabela 4. 10 - Valores dos expoentes x e y obtidos das funções de ajuste das Figuras 4.17 e 4.18.

Inclinação da curva exponencial	Carga aplicada	Velocidade
1	0,209	0,092
2	0,141	0,096
3	0,106	0,088
4	-	0,158
Média	0,152	0,109

Na Equação 4.2 o parâmetro carga aplicada está elevado à quarta (P^4), o expoente x do termo adimensional referente a carga aplicada deve então ser dividido por 4, desta maneira, este grupo segue o comportamento da carga com relação ao coeficiente de atrito. Pela mesma razão, os grupos adimensionais referentes a velocidade

deslizamento possuem expoente $y/2$ e assim, mantém o comportamento da velocidade com relação ao coeficiente de atrito.

Substituindo os valores de coeficiente de atrito dinâmico, x e y na equação 4.2, tem-se:

$$\mu = C \cdot \left(\frac{P^4 \cdot r}{E \cdot \gamma} \right)^{0,038} \cdot \left(\frac{v \cdot \rho \cdot \gamma}{\tau_e} \right)^{0,055} \cdot \left(\frac{v \cdot C_p}{k} \right)^{0,055} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Para a determinação da constante de atrito, substituí-se os valores dos parâmetros dos modelos e os resultados dos ensaios de atrito na Equação 4.3. A Tabela 4.11 apresenta os valores de C para cada ensaio.

Tabela 4. 11- Constante de atrito para cada valor de coeficiente de atrito dinâmico.

Velocidade [m/s]	Carga [N]	Coeficiente de atrito	Constante de atrito (C)
1	2	0.26	1,04
1	5	0,29	1,01
1	10	0.33	1,04
1	20	0.356	1,01
0,1	0,5	0.19	1,21
0,1	2	0.24	1,24
0,1	5	0.257	1,16
0,1	10	0.267	1,08
0,1	20	0.286	1,04
0,03	0,5	0.13	0,95
0,03	2	0.14	0,82
0,03	10	0.24	1,06
0,03	5	0.21	1,08
0,03	20	0.262	1,09

Da Tabela 4.11, tem-se que o valor da constante de atrito é:

$$C = 1,06 \pm 0,10$$

Assim, o modelo de coeficiente de atrito dinâmico pode ser apresentado desta forma:

$$\mu = (1,06 \pm 0,10) \cdot \left(\frac{P^4 \cdot r}{E \cdot \gamma} \right)^{0,038} \cdot \left(\frac{v \cdot \rho \cdot \gamma}{\tau_e} \right)^{0,055} \cdot \left(\frac{v \cdot C_p}{k} \right)^{0,055} \quad \text{Eq. 4. 4}$$

O modelo de coeficiente de atrito dinâmico da Equação 4.4 pode ser dividido em três termos distintos, referentes às componentes de adesão e deformação do atrito, além de um termo térmico.

$$\begin{array}{ccc} \left(\frac{P^4 \cdot r}{E \cdot \gamma} \right)^{0,038} & \left(\frac{v \cdot \rho \cdot \gamma}{\tau_e} \right)^{0,055} & \left(\frac{v \cdot C_p}{k} \right)^{0,055} \\ \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow \\ \text{Deformação} & \text{Adesão} & \text{Térmico} \end{array}$$

A Figura 4.19 mostra a aplicação do modelo desenvolvido em relação às condições PV estudadas e compara com os dados obtidos nos ensaios.

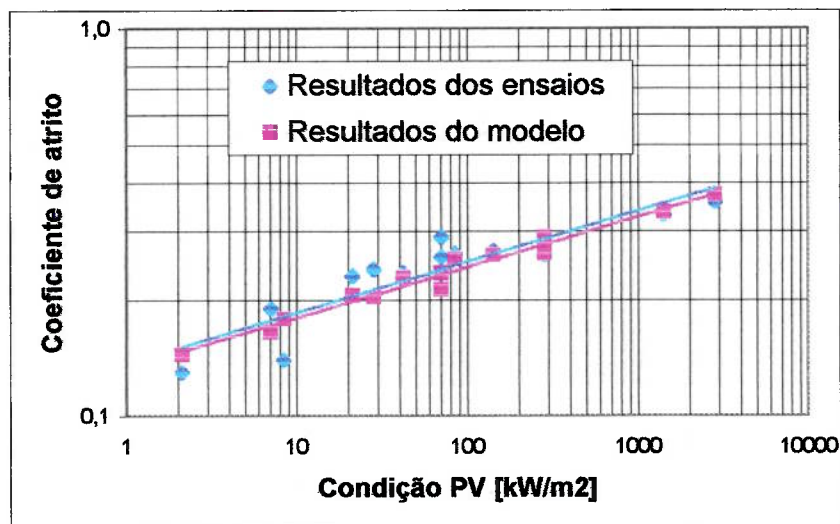


Figura 4. 19 - Comparação entre os resultados dos ensaios de coeficiente de atrito dinâmico com o modelo proposto, em relação à condição PV.

A Figura 4.19 mostra que o modelo proposto é capaz de reproduzir o coeficiente de atrito dinâmico do PEAD, nas condições de ensaio desta dissertação, no sistema

tribológico utilizado. A crítica a este modelo encontra-se no posicionamento da tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e), do termo de adesão, em relação ao coeficiente de atrito. A literatura tem mostrado que a tensão de escoamento por cisalhamento é diretamente proporcional ao coeficiente de atrito^{10, 15, 21, 24,27}, porém na determinação dos grupos adimensionais, esta variável está presente no denominador do modelo. A realização de ensaios com um maior número de variáveis deve levar a reformulação dos grupos adimensionais e redefinir o papel da tensão de escoamento por cisalhamento.

Para que este modelo seja aprimorado, torna-se necessário verificar com clareza a resposta tribológica do material a mudanças na rugosidade dos corpos e nas condições do contato durante o deslizamento. Deve-se ainda, procurar compreender o qual e ocorre na superfície dos materiais poliméricos com mudanças na umidade relativa do ambiente.

5 - COMENTÁRIOS FINAIS

Nos ensaios realizados na máxima condição PV a temperatura na interface não ultrapassou 45 °C, valor este determinado experimentalmente, empregando as correções de ARCHARD, para o cálculo da temperatura de contato. Nesta temperatura o PEAD é um plástico rígido com comportamento viscoelásticas de deformação.

As análises por calorimetria diferencial de varredura mostraram que, na condição de máximo PV, não ocorre fusão volumétrica do material indicando, entretanto, a diminuição na cristalinidade ou quebra de cadeias moleculares.

O exame da superfície do pino por MEV, mostraram intensas deformações plásticas, enquanto que no contra-corpo observaram-se filmes de transferência. Este nível de deformação plástica é atribuído a ação das asperezas da camada galvanizada, cuja rugosidade média situa-se na faixa que, a literatura, indica como causadoras de desgaste abrasivo de polímeros.

As observações acima valem para todas a região de cargas e velocidades estudadas.

A dissipação de energia responsável pelos valores de coeficiente de atrito dinâmico pode ser atribuída principalmente a mecanismos de deformação viscoelásticos, uma vez que na faixa de temperaturas obtidas durante os ensaios ocorre a elevação na energia de amortecimento do polímero. Além destes, mecanismo viscoplásticos devem estar operantes, pois o exame micrográfico da superfície dos pinos mostra uma intensa deformação plástica. A evidência experimental para o mecanismo de adesão está na presença esporádica de filmes de transferência no disco galvanizado. A baixa frequência

no fenômeno e a falta de correlação com dados teóricos permite sugerir que o peso destes mecanismos seja pequeno em relação aos demais.

A variação da temperatura ambiente, entre 20 e 25 °C, não exerce influência detectável no coeficiente de atrito dinâmico, em comparação com os efeitos devido à carga e a velocidade.

Para baixas condições PV, os valores de coeficiente de atrito dinâmico foram influenciados pela umidade relativa, acompanhando a variação desta. A elevação da carga aplicada diminui a amplitude de variação do coeficiente de atrito com a umidade. Uma explicação conclusiva para o efeito da umidade no coeficiente de atrito não foi encontrada.

A formação de um filme lubrificante de água para umidade maiores que a crítica em contraposição a alteração de propriedades do PEAD devido às características higroscópicas deste material, precisa ser considerada em trabalhos futuros.

Foi desenvolvido um modelo de coeficiente de atrito dinâmico com base nas propriedades mecânicas, físicas e térmicas do PEAD e na características topográficas do contra-corpo. Este modelo se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais, porém, o termo referente à componente de adesão, apresentou uma incongruência quanto ao parâmetro de tensão de escoamento por cisalhamento. A análise deste modelo fornece indicações sobre quais novos experimentos necessitam ser realizados para a proposição de modelos conceitualmente corretos.

6 - CONCLUSÕES

Do presente trabalho, em que foi estudada a influência da carga e da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito dinâmico, entre polietileno de alta densidade e aço carbono galvanizado, utilizando um tribômetro do tipo pino-contra-disco, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. As incertezas das medidas de coeficiente de atrito dinâmico são devido ao fenômeno estudado e não à incertezas de medição do equipamento.
2. O equipamento tem uso limitado para cargas abaixo de 0,5 N e velocidades de 0,03m/s, devido a falta de contato entre corpo e contra-corpo.
3. A influência da umidade relativa no coeficiente de atrito dinâmico diminui para cargas crescentes, provavelmente, devido a dificuldade de penetração de moléculas de H₂O na estrutura mais compactada pela ação da carga aplicada.
4. O coeficiente de atrito dinâmico varia diretamente proporcional com a umidade relativa.
5. Os modelos de coeficiente de atrito dinâmico encontrados na literatura apresentaram limitações teóricas, pelo fato de desconsiderar alguns dos parâmetros que afetam o comportamento tribológico dos polímeros.
6. A técnica de modelamento por análise dimensional, mostrou-se adequada para o desenvolvimento de modelos de coeficiente de atrito dinâmico, entretanto, devido a limitações experimentais, o modelo desenvolvido mostrou-se conceitualmente inadequado.

7. Um modelamento criterioso sobre o comportamento tribológico dos polímeros (atrito e desgaste) deve considerar:

- parâmetros dinâmicos;
- propriedades mecânicas, térmicas e físico-químicas dos materiais;
- parâmetros de superfície;
- condições ambientais e
- características do contra-corpo.

7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

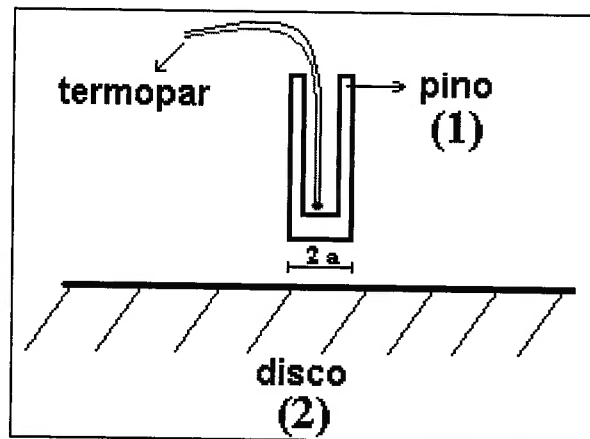
Da análise da literatura e a partir dos resultados obtidos durante a realização deste trabalho, pode-se sugerir as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Verificar o efeito da rugosidade no coeficiente de atrito dinâmico para o deslizamento entre polímero e corpo-rígido;
- Verificar o efeito da umidade relativa no coeficiente de atrito dinâmico para outros pares polímero-metal;
- Comparar o efeito da carga aplicada e velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito entre outros pares polímero-metal;
- Estudo do sinergismo entre as componente de deformação e de adesão no atrito de materiais poliméricos;
- Influência da característica de envelhecimento dos polímeros, no comportamento tribológico dos polímeros;
- Elaborar um modelo matemático para o desgaste de pares polímero-corpo rígido utilizando parâmetros de movimento, de superfície, propriedades de resistência de materiais e características do contra-corpo;

ANEXO 1

TEMPERATURA NO CONTATO

A correção dos valores de temperatura foi feita mediante a formulação de ARCHARD⁶¹ para o contato entre uma superfície circular deslizando contra um plano. A figura a seguir, apresenta de uma forma esquemática o contato entre um pino de raio a (corpo 1) e uma superfície plana, que neste caso é o disco (corpo 2).



Esquema mostrando termopar, pino e disco.

Os parâmetros utilizados nos cálculos de temperatura de contato foram:

- (1) Fonte de calor estacionária = pino
- (2) Fonte de calor em movimento = disco
- P - carga aplicada
- v - velocidade de deslizamento
- a - raio da área de contato = 1,5 mm
- μ - coeficiente de atrito dinâmico = 0,356
- k - condutividade térmica do pino = 4,39 W/m°C
- k - condutividade térmica do disco = 54 W/m°C
- D_1 - difusividade térmica do pino = 0,192 m²/s

- D_2 - difusividade térmica do disco = $1,474 \text{ m}^2/\text{s}$

A temperatura no contato é definida por:

$$T_c = T_b + T_{me}$$

onde:

- T_c = Temperatura no contato
- T_b = Temperatura do volume (bulk) a uma distância a da superfície de contato
- T_{me} = Temperatura média do volume abaixo da região de contato

Para o cálculo da temperatura T_{me} é necessário calcular um parâmetro denominado número de PECLET (Pe). O número de PECLET é um adimensional que representa a energia térmica transportada por convecção e é representado por:

$$Pe = \frac{v \cdot a}{2 \cdot D}$$

sendo que:

Para $Pe < 0,1$

$$T_{me} = \frac{\mu \cdot P \cdot v}{4 \cdot a \cdot k}$$

Para $Pe > 5$

$$T_{me} = \frac{\mu \cdot P \cdot v}{a \cdot k} \cdot 0,31 \cdot \sqrt{\frac{D}{v \cdot a}}$$

Os números de PECLET foram calculados conforme descrito a seguir:

- Número de PECLET para o corpo 1

como o pino está parado em relação ao disco, $v_1 = 0 \text{ m/s}$, tem-se:

$$Pe_1 = 0$$

como $Pe_1 < 0,1$ obtém-se:

$$T_{me_1} = 276 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Número de PECLET para o corpo 2

para a condição de ensaio estudada tem-se:

$$Pe_2 = 51$$

como $Pe_2 > 5$ obtém-se:

$$T_{me_2} = 2,7 \text{ °C}$$

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

$$\frac{1}{T_{me}} = \frac{1}{T_{me_1}} + \frac{1}{T_{me_2}}$$

Substituindo os valores de T_{me_1} e T_{me_2} , tem-se que para a condição PV mais severa:

$$T_{me} = 2,7 \text{ °C}$$

Para a determinação da temperatura no contato, torna-se necessário apenas os valores medidos com o termopar durante os ensaios (T_b).

ANEXO 2

TESTE DE HIPÓTESES

Para o teste de hipótese de dados não-emparelhados, com desvios padrões diferentes e desconhecidos, é utilizado o método conhecido como ASPIN-WELCH⁶⁷, onde t crítico de Student é dados por:

$$v = \frac{(w_1 + w_2)^2}{\frac{w_1^2}{n_1 + 1} + \frac{w_2^2}{n_2 + 1}} - 2$$

onde w_1 e w_2 são calculados por:

$$w_1 = \frac{s_1^2}{n_1} \quad \text{e} \quad w_2 = \frac{s_2^2}{n_2}$$

Temos que:

n_1 e n_2 = número de amostras da população

s_1^2 e s_2^2 = variância das amostras

O valor a ser testado é:

$$t_v = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

onde x_1 e x_2 = média da população

Sendo: H_0 = hipótese existente e H_1 = hipótese alternativa

temos o seguinte teste: $\left\{ \begin{array}{l} H_0 : x_1 = x_2 \\ H_1 : x_1 \neq x_2 \end{array} \right\}$

assim, H_0 se confirma quando $|t_v| < |t_{v,\alpha}|$

onde α_t = nível de significância do t de Student.

Para os resultados da Tabela 4.5 temos as seguintes hipóteses:

1. Hipótese de que o valor médio do parâmetro de rugosidade $Ra = 0,92 \pm 0,32$ equivale à $Ra = 0,79 \pm 0,26$.

As médias, as variâncias e o número de medições das duas amostras são:

$$x_1 = 0,92 \quad s_1^2 = 0,1024 \quad (n_1 = 20)$$

$$x_2 = 0,79 \quad s_2^2 = 0,0676 \quad (n_2 = 8)$$

Da aplicação do método temos:

$$\therefore w_1 = 0,0051 \quad w_2 = 0,0085 \quad v = 18$$

$$t_v = 1,17 \quad t_{18;2,5\%} = 2,10$$

Como $t_v < t_{18;2,5\%}$, pode-se afirmar que, com 5 % de significância, as médias não diferem.

2. Hipótese de que o valor médio do parâmetro de rugosidade e $Ra = 0,92 \pm 0,32$ equivale à $Ra = 1,02 \pm 0,28$.

As médias, as variâncias e o número de medições das duas amostras são:

$$x_1 = 0,92 \quad s_1^2 = 0,1024 \quad (n_1 = 20)$$

$$x_2 = 1,02 \quad s_2^2 = 0,0784 \quad (n_2 = 8)$$

Da aplicação do método temos:

$$\therefore w_1 = 0,0051 \quad w_2 = 0,0098 \quad v = 17$$

$$t_v = 0,82 \quad t_{17;2,5\%} = 2,11$$

Como $t_v < t_{17;2,5\%}$, pode-se afirmar que, com 5 % de significância, as médias não diferem.

Como as duas hipóteses apresentadas foram confirmadas, pode-se concluir que não houve mudança nos valores de rugosidade durante a realização dos ensaios.

ANEXO 3

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE COEFICIENTE DE
ATRITO**

Os valores de coeficiente de atrito determinados para cada ensaio e o desvio percentual obtido em relação à média estão mostrados na Tabela An.1.

Tabela An. 1 - Coeficiente de atrito dinâmico para as condições PV ensaiadas, a média e o desvio percentual em relação à média para cada ponto.

Carga [N]	Coeficiente de atrito			Desvio em relação à média [%]		
	velocidade [m/s]			Velocidade [m/s]		
	1,0	0,1	0,03	1,0	0,1	0,03
20,0	0,354	0,280	0,278	1	2	6
	0,368	0,295	0,254	3	3	3
	0,345	0,283	0,253	3	1	3
Média	0,356	0,286	0,262	-	-	-
* 10,0	0,33	0,267	0,24	-	-	-
* 5,0	0,29	0,257	0,21	-	-	-
2,0	0,26	0,22	0,13	0	8	7
	0,25	0,24	0,14	4	0	0
	0,28	0,25	0,14	8	4	0
Média	0,26	0,24	0,14	-	-	-
0,5	0,30	0,20	0,13	3	5	0
	0,28	0,21	0,14	3	10	8
	0,29	0,15	0,13	0	21	0
Média	0,29	0,19	0,13	-	-	-

* Foi realizada apenas uma medida.

Pode-se verificar que a variação dos resultados em relação à média não ultrapassou 10% (exceto o terceiro ensaio da condição de 0,5 N de carga e velocidade de 0,1 m/s com 21%), mostrando uma boa reprodutibilidade dos resultados.

Os resultados apresentados na Tabela An. 1 são valores médios das medições de coeficiente de atrito, que ocorriam a cada 30 ou 45 segundos. A Tabela An. 2 apresenta os desvios-padrão médios dos ensaios realizados.

Tabela An. 2 - Desvios-padrão médios das medições para cada condição PV.

Carga [N]	Desvio-padrão		
	vel = 1,0 [m/s]	vel = 0,1 [m/s]	vel = 0,03 [m/s]
20.0	0.004	0.004	0.002
10.0	0.01	0.004	-
5.0	0.01	0.004	-
2.0	0.01	0.01	-
0.5	0.05	0.03	-

Nota-se na Tabela An. 2, que a coluna referente à velocidade de deslizamento de 0.03 m/s está incompleta. Este fato ocorre devido a impossibilidade de se determinar o desvio-padrão do coeficiente de atrito dinâmico destes ensaios. Uma discussão mais detalhada está apresentada no item 4.5, onde foi feita uma análise do efeito da umidade relativa do ambiente no coeficiente de atrito.

Segundo HOLMAN⁷⁸, para o cálculo das incertezas de medições de uma variável dependente, temos o seguinte procedimento:

Sendo $G = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

$$\text{temos que: } \Delta G = \left[\left(\frac{\partial G}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial G}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Sendo o coeficiente representado por “ μ ” tem-se que:

$$\mu = \frac{F}{P} \quad \text{e} \quad \Delta \mu = \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial F} \cdot \Delta F \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \cdot \Delta P \right)^2 \right]^{1/2}$$

logo:

$$\Delta\mu = \left[\left(\frac{1}{P} \cdot \Delta F \right)^2 + \left(-\frac{F}{P^2} \cdot \Delta P \right)^2 \right]^{1/2}$$

No presente trabalho, tem-se:

F = força de atrito [N]

P = carga aplicada [N]

$\Delta\mu$ = incerteza do valor do coeficiente de atrito

ΔF = incerteza de medição da força de atrito = 0,013 [N]

ΔP = incerteza de medição da carga aplicada = 0,005 [g]

A Tabela An. 3 apresenta as incertezas nos valores dos coeficientes de atrito dinâmico devido aos erros de medições do equipamento

Tabela An. 3 - Incerteza de medição média para cada condição PV.

$\Delta\mu$			
Carga [N]	Vel = 1,0 [m/s]	Vel = 0,1 [m/s]	vel = 0,03 [m/s]
20.0	0.001	0.001	0.001
10.0	0.001	0.001	0.001
5.0	0.002	0.002	0.002
2.0	0.01	0.01	0.01
0.5	0.02	0.02	0.02

Ao analisar as Tabelas An. 2 e An. 3 verifica-se que o desvio-padrão para cada condição PV ensaiada é igual ou superior às incertezas de medições de cada ponto. Isto indica que as variações entre os resultados de coeficiente de atrito dinâmico se deve aos efeitos do fenômeno em estudo e não às incertezas de medições do equipamento.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- ¹MOORE, D. F. **PRINCIPLES AND APLICATIONS OF TRIBOLOGY**. Pergamon Press, 1ª Ed.,(1975),p. 1-86
- ²JOST, H.P. Tribology - orign and future. **WEAR**, 136, (1990) p. 1-17
- ³CAPUTO, R. & ABRAMO, L. **PERFIL DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO NO BRASIL**. ABIPLAST - Março (1997) p.1-9
- ⁴ABIPLAST. **O PLÁSTICO NO BRASIL**. ABIPLAST, 3ª Edição 96/97 p. 59-60
- ⁵NORMAN, T. Wear in ore processing machinery, in: **WEAR CONTROL HANDBOOK**, Peterson, M. B. e Winner, W. O. , Eds. ASME, 1980, p. 1009-1051
- ⁶VAN VLACK, L. H. **PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. Tradução de Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo, Edgard Blucher, (1977), Cap 7, Materiais Orgânicos e suas propriedades, p.164-198
- ⁷DIETER, G. E. **MECHANICAL METALLURGY - SI METRIC EDITION**. Mc Graw-HillBook Company, (1988), Part II–Chap. 8, Mechanical Behavior of polymers, p. 268 - 289
- ⁸HERTZBERG, R. W. **DEFORMATION AND FRACTURE MECHANICS OF ENGINEERING MATERIALS**. Third Edition. John Wiley & Sons, 1989.Chapter 6. Deformation response of engineering plastic, p. 193-236
- ⁹NEWY, C. & WEAVER, G. **MATERIALS PRINCIPALS AND PRACTICE**. Butterworth-Heinemann Ltd (1990) p. 293-340
- ¹⁰YAMAGUCHI, Y. **TRIBOLOGY OF PLASTIC MATERIALS. THEIR CHARACTERISTIC AND APPLICATIONS TO SLIDING COMPONENTS**. ELSEVIER - Tribology series - vol. 16 (1990), p. 1-89
- ¹¹MANO, E. B. **INTRODUÇÃO A POLÍMEROS**. Editora Edgard Blücher LTDA. (1994), p. 12-29
- ¹²CALLISTER JR., W. D. **MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING - AN INTRODUCTION**. 3ª Edição, John Wiley & Sons. (1994), p. 444-507
- ¹³BAER, E. Advanced polymers. **SCIENTIFIC AMERICAN**, (1986) Vol. 255, número 4, p. 146-155

-
- ¹⁴ASHBY, M. & JONES, D.R.H. **ENGINEERING MATERIALS VOL. 2: AN INTRODUCTION TO MICROSTRUCTURE, PROCESSING AND DESIGN**. Pergamon Press, Capítulo 21- 23. Polymers, The structure of polymers, Mechanical behavior of polymer, p.21-239
- ¹⁵SUH, N. P. & TURNER, A. L. **ELEMENTS OF MECHANICAL BEHAVIOR SOLIDS**. Scripta Book Company / Washigton, D.C. Chap. VI,;Visco-elastic-plastic deformation of polymers p. 293-361, Chap. X, Friction behavior of polymers, p.526-536
- ¹⁶CALCOTE, L. R. **INTRODUCTION TO CONTINUUM MECHANICS**. Princetonw , D. Van Nostrand Company, Inc.
- ¹⁷YOUNG, R. P. & LOVELL, P. A. **INTRODUCTION TO POLYMERS**. Second Edition. Chapman & Hall, (1991), p. 310-428
- ¹⁸MOURA, C. R. S. & CARRETEIRO, R. P. **LUBRIFICANTES E LUBRIFICAÇÃO**. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 1^a Edição. (1978), p. 3-18
- ¹⁹DOWSON, D. **HISTORY OF TRIBOLOGY**. Oxford University, Oxford, (1979), p. 22-23
- ²⁰ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. **ASTM G 40-93 STANDARD TERMINOLOGY RELATING TO EROSION AND WEAR**. (1992), p.
- ²¹RABINOWICZ, E. **FRICITION AND WEAR OF MATERIALS**. John Wiley and Sons, New York (1965), p.32-201
- ²²BOWDEN, F. P. & TABOR, D. **THE FRICTION AND LUBRICATION OF SOLIDS - PART I**. Claredon, Oxford – (1950)
- ²³TABOR, D. Junction growth in metallic friction: The role of combinel stresses and surface contamination. **JOURNAL APPLIED OF PHYSICS**. (1959), p. 378-392
- ²⁴LUDEMA, K. C. &TABOR, D. The friction and the visco-elastic properties of polymeric solids. **WEAR**, 9 (1966), p. 329-348
- ²⁵LANCASTER, J. K. Material specific wear mechanisms: relevance to wear modelling. **WEAR**,141 (1990), p. 159-183
- ²⁶BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. **TRIBOLOGY INTERNATIONAL**. (1981), p.231-243

-
- ²⁷HUTCHINGS, I. M. **TRIBOLOGY: FRICTION AND WEAR OF ENGINEERING MATERIALS**. Edward Arnold / London,(1992). Chapter 3: Friction of polymers, p.51-57
- ²⁸TANAKA, K.; OCHIYAMA, Y. & TOYOOKA, S. The mechanism of wear of PTFE. **WEAR**, 23 (1973), p. 153-172
- ²⁹GREENWOOD, J.A. & WILLIAMSOM, J. B. P. Contact of nominally flat rough surface. **PROCEEDINGS ROYAL SOCIETY LONDON**, A295 (1966), p. 300-319
- ³⁰MCLAREN, K. G. & TABOR, D. Friction of polymers at engineering speeds: influence of speed, temperature and lubricants. **WEAR**, 8 (1965), p. 79-83
- ³¹BELLOW, D. G. & VISWANATH, N. S. An analysis of the wear of polymers. **WEAR**, 162-164 (1993), p. 1048-1053
- ³²RHEE, S. H. & LUDEMA, K. C. Mechanism of formation of polymeric transfer films. **WEAR**, 46 (1978), p. 231-240.
- ³³THORP, J. Friction of some commercial polymer-based bearing materials against steel. **TRIBOLOGY INTERNATIONAL**, April (1982), p. 69-74
- ³⁴SANTNER, E. & CZICHOS, H. Tribology of polymers. **TRIBOLOGY INTERNATIONAL**, 22 (1989) n° 2, pp 103-109
- ³⁵BRENTNALL, 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
- ³⁶CLERICO, M. A study of the friction and wear of Poliamida against metal. **WEAR**, 13 (1969), p. 183-197
- ³⁷VINOGRADOV, 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
- ³⁸MALAY, K. K. & BAHADUR, S. An investigation of the temperature rise in polymer-metal sliding. **WEAR**, 82 (1982), p. 81-92
- ³⁹BUDINSKI, K. G. Friction in machine design. "Tribological Modeling for Mechanical Designers" **ASTM**, stp 1105 (1991), p. 89-125
- ⁴⁰BLAU, P. J. **FRICTION SCIENCE AND TECHNOLOGY**. Marcel Dekker, Inc. (1996), p.285-334

-
- ⁴¹CZICHOS, H. Influence of adhesive and abrasive mechanism on the tribological behavior of thermoplastic polymer. **WEAR**, 88 (1983), p. 27-43
- ⁴²SHOOTER, K. V. Frictional properties of plastics. **PROCEEDINGS ROYAL SOCIETY LONDON**, A212 (1952), p. 488-491
- ⁴³KING, R. F. & TABOR, D. **PROCEEDINGS OF THE PHYSICS SOCIETY LONDON**, B66 (1953), p. 728-739
- ⁴⁴LODGE, A. S. & HOWELL, H. G. Friction of an elastic solid. **PROCEEDINGS OF THE PHYSICS SOCIETY LONDON**, B67 (1954), p. 89-97
- ⁴⁵PASCOE, M. W. & TABOR, D. The friction and deformation of polymers. **PROCEEDINGS ROYAL SOCIETY LONDON**, A235 (1956), p. 210-224
- ⁴⁶COHEN, S. C. & TABOR, D. The friction and lubrication of polymers. **PROCEEDINGS ROYAL SOCIETY LONDON**, A291 (1966), p. 186-207
- ⁴⁷BAHADUR, S. & LUDEMA, K. C. The viscoelastic nature of the sliding friction of polyethylene, polypropylene and copolymers. **WEAR**, 18 (1971), p. 109-128
- ⁴⁸WEST, G. H. & SENIOR, J.M. Frictional properties of polyethylene. **WEAR**, 19 (1972), p. 37-52
- ⁴⁹SPURR, R. T. The friction of the polymers. **WEAR**, 79 (1982), p. 301-310
- ⁵⁰MADAKSON, P. B. The frictional behavior of materials. **WEAR**, 87 (1983), p. 191-206
- ⁵¹BASSINI, R. , DI PASQUALE, E. & VITALI, C. Probabilistic model for metal-polymer friction. **WEAR**, 95 (1984), p. 177-191
- ⁵²MCCOOL, J. I. Comparison of models for the contact of rough surfaces. **WEAR**, 107 (1986), p. 37-60
- ⁵³BRAWDUP, J. & IMMERGUT, E.H. **POLYMER HANDBOOK** – Third Edition. John Wiley & Sons, (1989), p. V15-V25
- ⁵⁴PETERSON, M.B. & WINER, W.O. **WEAR CONTROL HANDBOOK** - ASME (1980), p. 121-141
- ⁵⁵ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. **ASTM G 1-90 STANDARD PRACTICE FOR PREPARING, CLEANING AND EVALUATING**

CORROSION TEST SPECIMENT. Metals test methods and analytical procedure. Vol. 03.02 – Wear and erosion; metal corrosion. section 3 – (1992), p. 35-46

⁵⁶BROWN, R. P. **HANDBOOK OF PLASTICS TEST METHODS.** 3^a Edição, John Wiley & Sons, (1988), p.107-184

⁵⁷ASTM STANDARDS FOR MATERIALS HOT DIP GALVANIZED AFTER FABRICATION. **ASTM A 90 – 69 STANDARD TEST METHODS FOR WEIGHT OF COATING ON ZINC-COATED (GALVANIZED) IRON OR STEEL ARTICLES.** (1981), p. 218-222

⁵⁸BENSCOTER, A.O. Metallographic techniques and microstructures: specific metals and alloys. **METALS HANDBOOK VOL. 9,** 9^a edition, ASM, (1985), p.197-201

⁵⁹ANNUAL 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

⁶⁰RAY, M. S. **ENGINEERING EXPERIMENTATION. IDEAS, TECHNIQUES AND PRESENTATION.** McGraw-Hill Book Company (1988), p. 124-153

⁶¹ARCHARD, J. F. The temperature of rubbing surfaces. **WEAR,** 2 (1959), p.439-455

⁶²KAR, M. K. & BAHADUR, S. Micromechanism of wear at polymer-metal sliding interface. **WEAR,** 46 (1978), p.189-202

⁶³BILLMEYER, F. W. **TEXTBOOK OF POLYMER SCIENCE.** 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. (1984), p. 345-355

⁶⁴TANAKA, K. & YAMADA, Y. Effect of sliding speed on transfer and wear on semicrystalline polymer sliding against smooth steel surface. **WEAR OF MATERIALS.** 2, (1989), p. 617-624

⁶⁵ISS JR, N. S. & SMYTH, K. A. The wear of polymers sliding on polymeric films deposited on rough surfaces. **JOURNAL OF LUBRICATION TECHNOLOGY.** VOL. 103 (1981) P. 266-273

⁶⁶ISS JR, N. E. & MILLOY, S. C. The effect asperity curvature on polymer wear. **WEAR OF MATERIALS.** 2, (1989), p. 650-656

⁶⁷COSTA NETO, P. L. O. **ESTATÍSTICA** Ed. Edgard Blücher Ltda (1977), p. 84-122

-
- ⁶⁸DOWSON, D. , CHALLEN, J. M. HOLMES, K. & ATKINSON J. R. The wear of non-metallic materials, **PROCEEDINGS OF 3RD LEEDS-LION SYPOSIUM ON TRIBOLOGY**. Mechanical Engiuneering Publications, (1976) p. 99-102
- ⁶⁹ZUM-GAHR, K.-H. **MICROSTRUCTURE AND WEAR OF MATERIALS**. Elsevier Science Publishers, USA, (1987) p. 293-305
- ⁷⁰TEWARI, U.S., SHARMA, S.K. & VASUDEVAN, P. Polymer tribology. **REVIEW OF MACROMOLECULES CHEMICAL PHISICS**. C29(1), (1989) p. 1-38
- ⁷¹FISCHER, T. E. & TOMIZAWA, H. Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction and wear od silicon nitride. **WEAR OF MATERIALS**, (1985), p.22-32
- ⁷²DEMIZU, K., WADABAYASHI, R. & ISHIGAKI, H. Dry friction of oxide ceramics against metals: The effect of umidity. **TRIBOLOGY INTERNATIONAL**, 33(4), (1990), p. 505-510
- ⁷³GOTO, H. & BUCKLEY, D. H. The influence of water vapour in air on the friction behavior os pure metals during fretting. **INTERNATIONAL TRIBOLOGY**. (18) 4, (1985), p. 237-244
- ⁷⁴MANSFELD, F. **CORROSION MECHANISM**. New York, Marcel Dekker, 8888 (1987) p. 230-240
- ⁷⁵VELEZ-RESTREPO, J. M. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES AUSTEMPERADOS E TEMPERADOS E REVENIDOS UTILIZANDO UM ESCLERÔMETRO PENDULAR**. Tese de doutorado - Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo (1997), p. 138-139
- ⁷⁶RHEE, S. K. Wear equation for polymer sliding against metal surface. **WEAR**, 16 (1970), p.431-445
- ⁷⁷VISWANATH, N. & BELOW, D. G. Development of na equation for the wear of polymers. **WEAR**, 181-193 (1995), p.42-49
- ⁷⁸HOLMAN, J. P. **EXPERIMENTAL METHODS FOR ENGINEERS**. McGraw-Hill Co. (1978), p. 41-82