

TRIBOLOGIA DE POLÍMEROS E COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Prof. Carlos Henrique da Silva

Laboratório de Superfícies e Contato - LASC
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR (Curitiba) /Brasil
carloshs@utfpr.edu.br



MOQUECA TRIBOLÓGICA V.04

12 a 14 de fevereiro de 2020
Vitória- ES Auditório do CT-I/ UFES



TRICORRMAT
Laboratório de Tribologia,
Corrosão e Materiais

Atrito Desgaste
Lubrificação

V.04

Moqueca Tribológica

SUMÁRIO

1º) Introdução a tribologia de polímeros e compósitos poliméricos (10 min)

2º) Compósitos poliméricos no LASC (10 min)

- Compósitos Comerciais

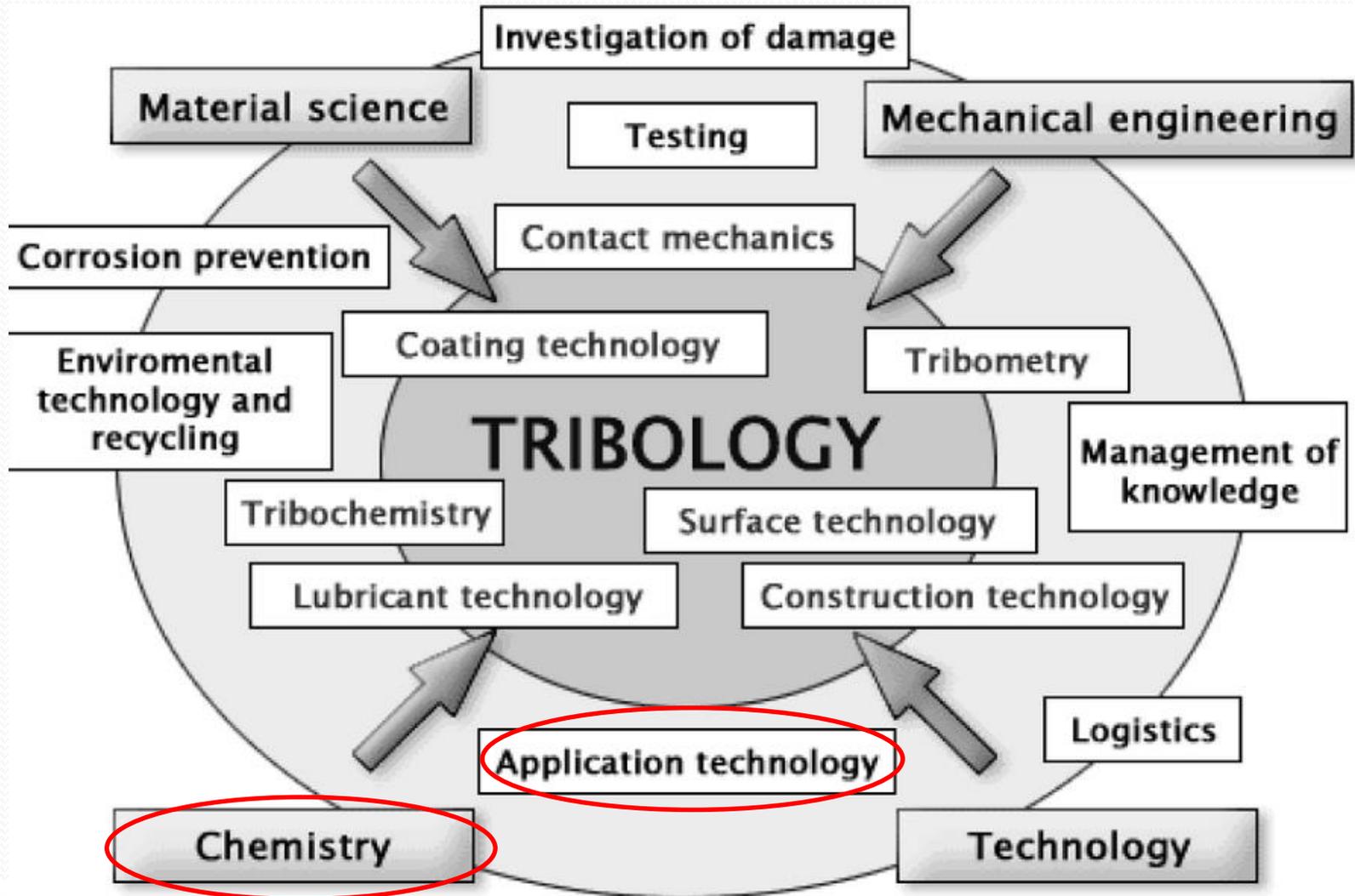
- Desenvolvimento Interno

3º) Grupos e Centros de Pesquisa da tribologia de P & CP no Brasil (10 min)

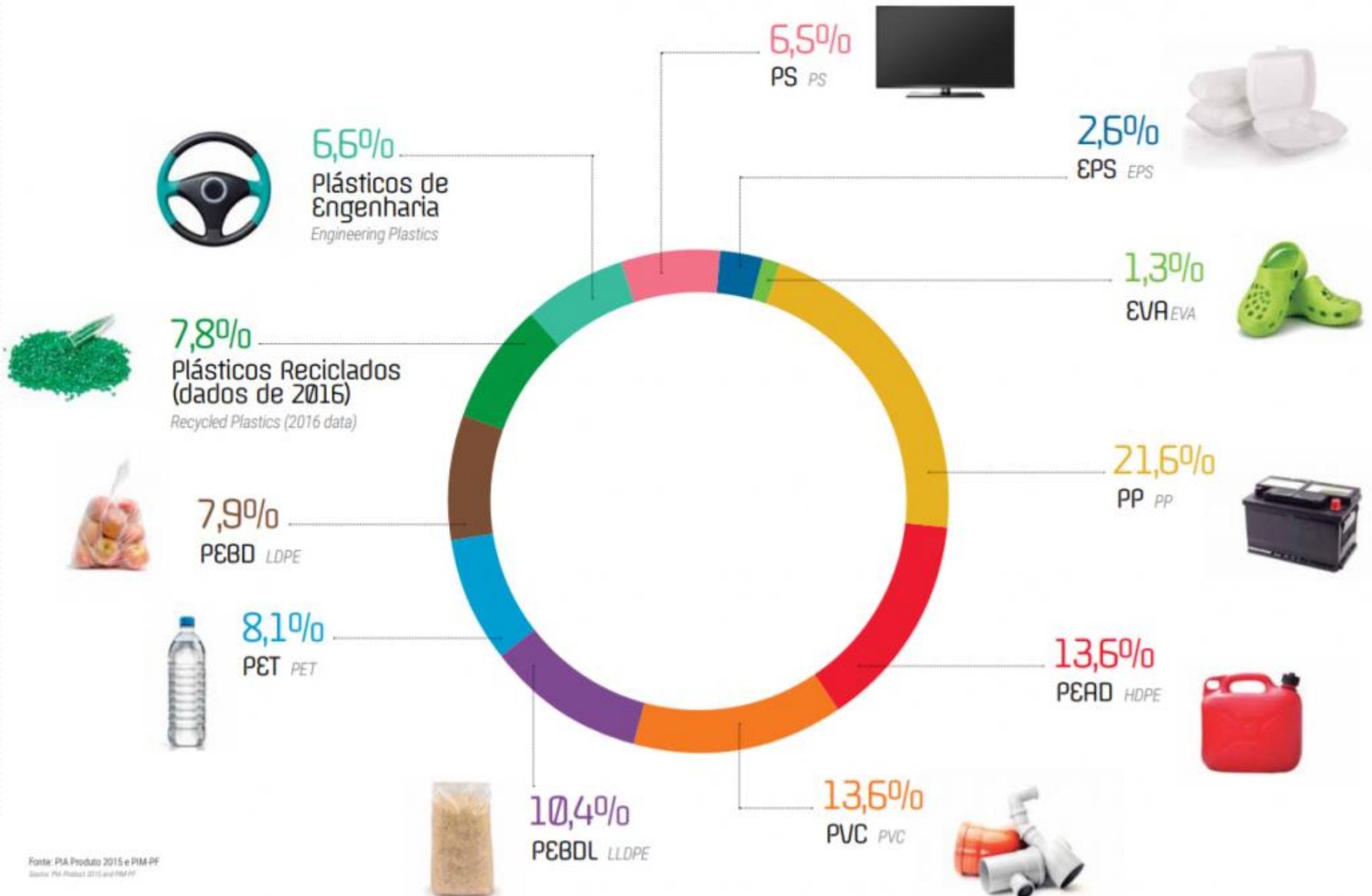
INTRODUÇÃO

- ❑ Substituição de materiais metálicos tradicionais
- ❑ Aplicações específicas onde o polímero, e seus compósitos, mostram-se muito competitivos
- ❑ Facilidade em relações aos processos de fabricação
- ❑ Evolução na engenharia dos compósitos e seus processos de fabricação
- ❑ Possibilidade de trabalhar com materiais de enchimento (*fillers*) em escala nanométrica

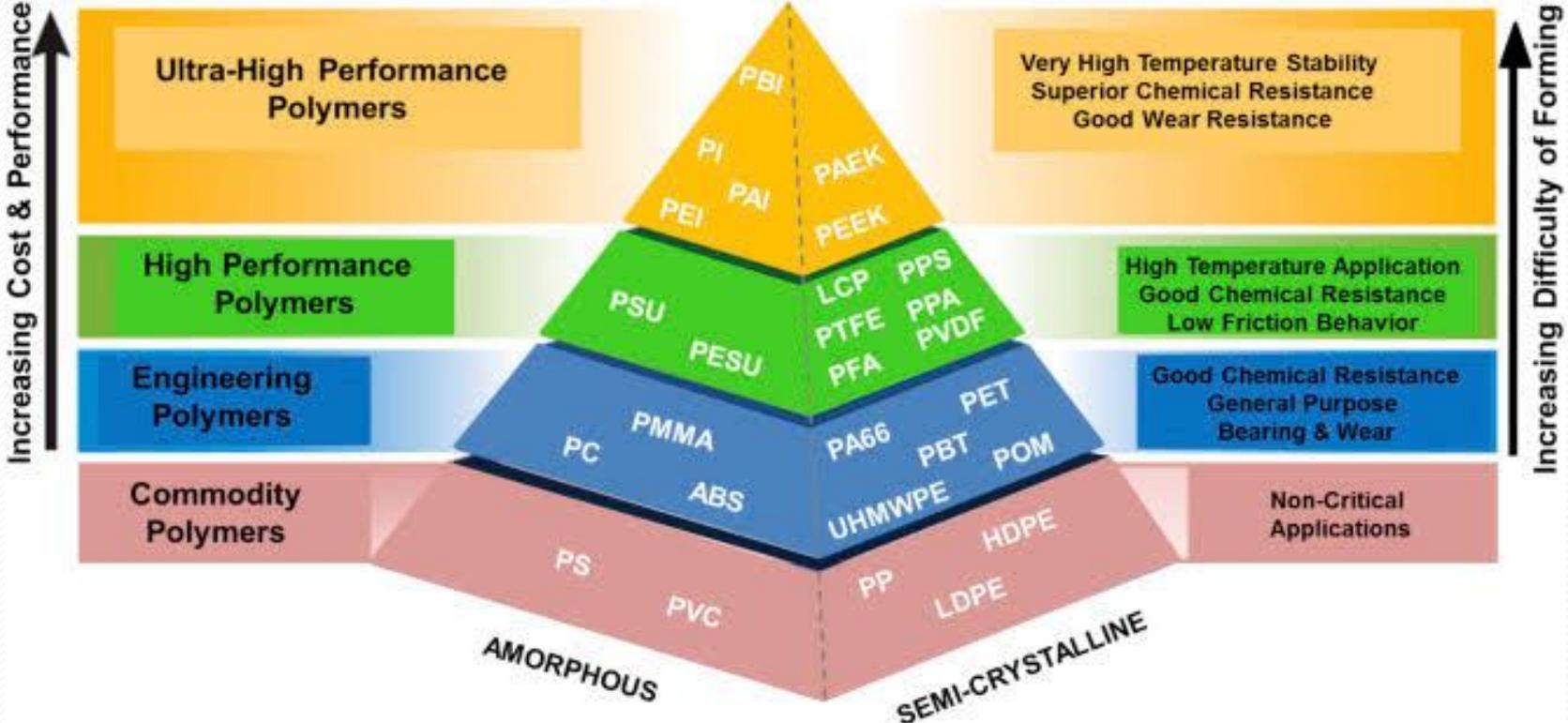
A MULTIDICIPLINARIDADE DA TRIBOLOGIA



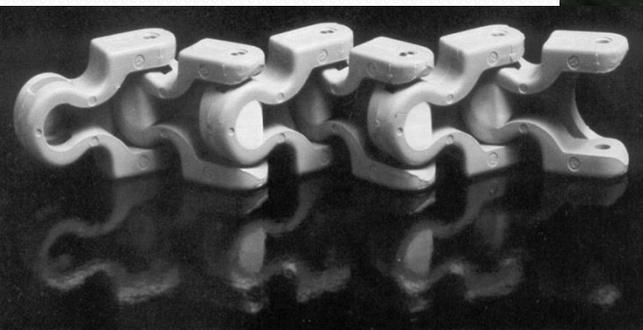
CONSUMO DE POLÍMEROS NO BRASIL



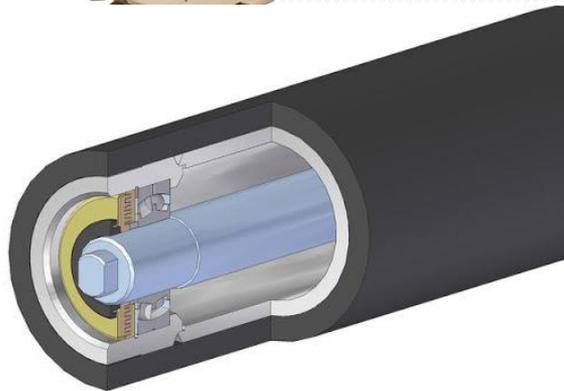
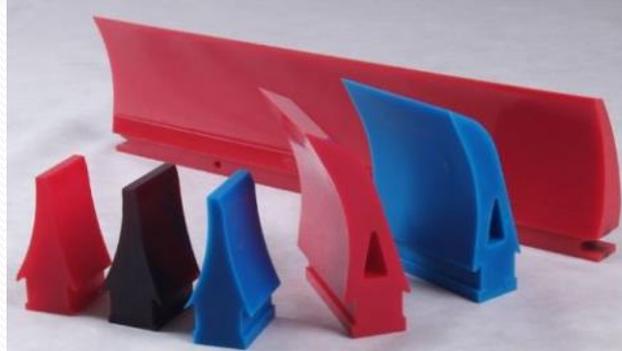
DESEMPENHO



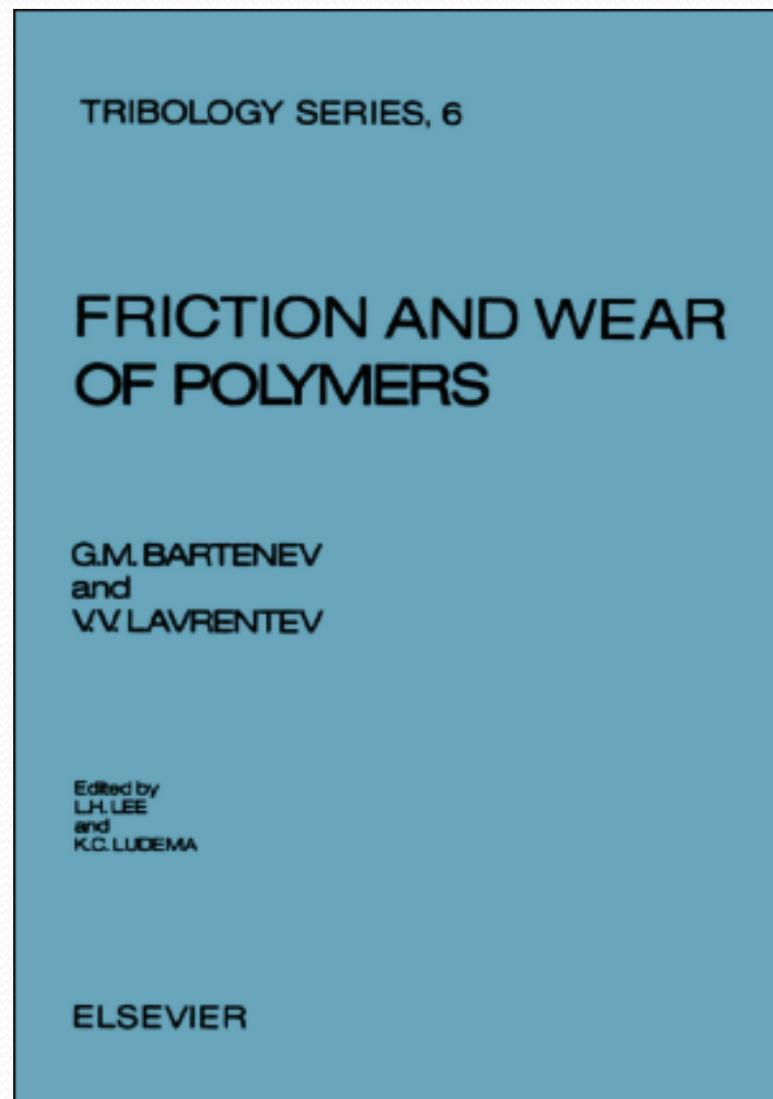
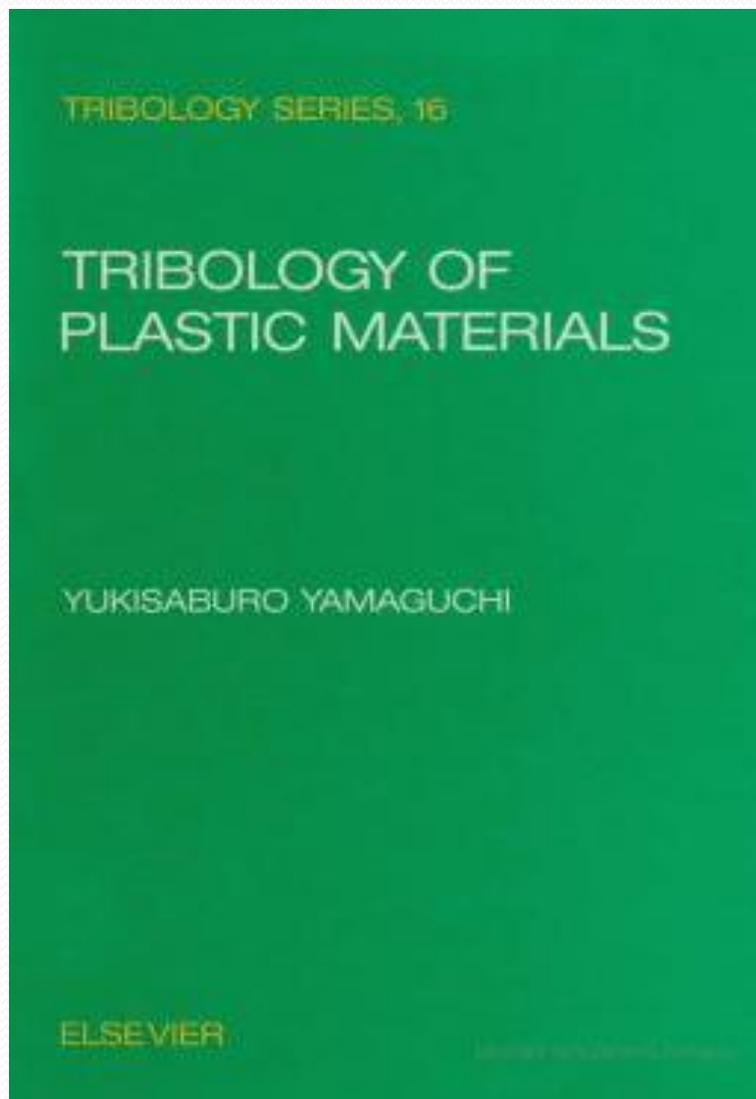
APLICAÇÕES



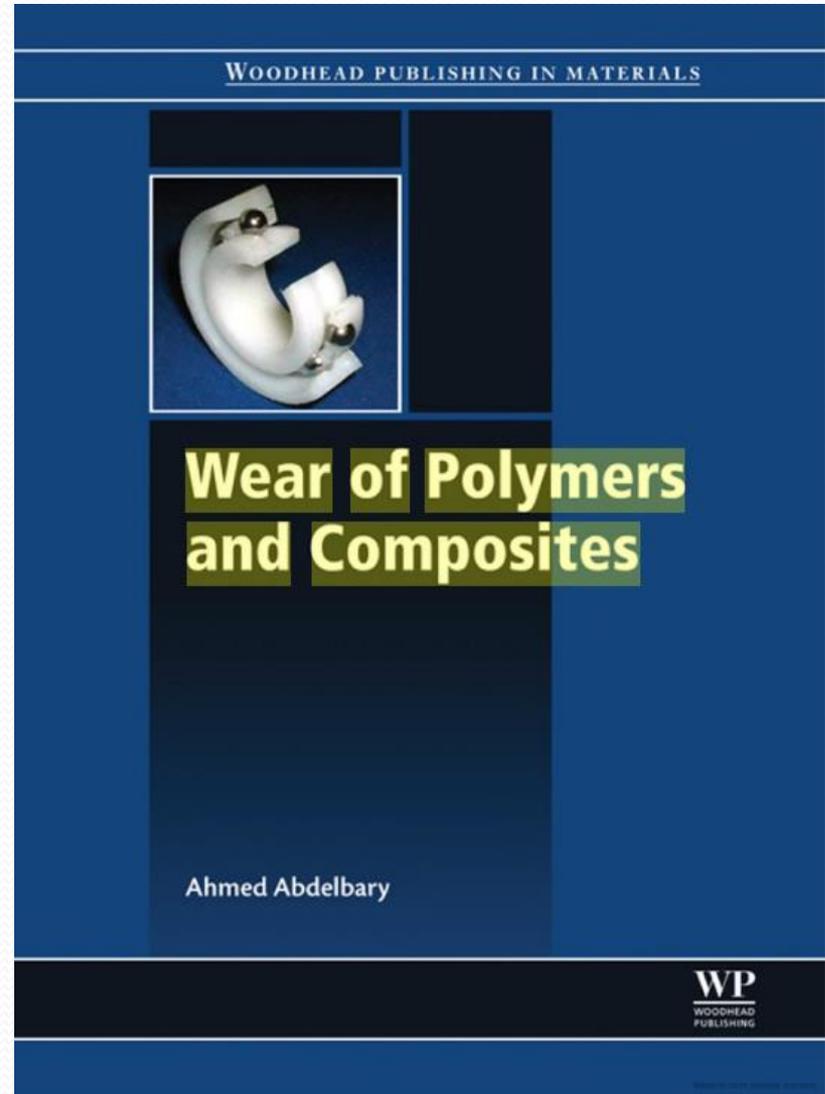
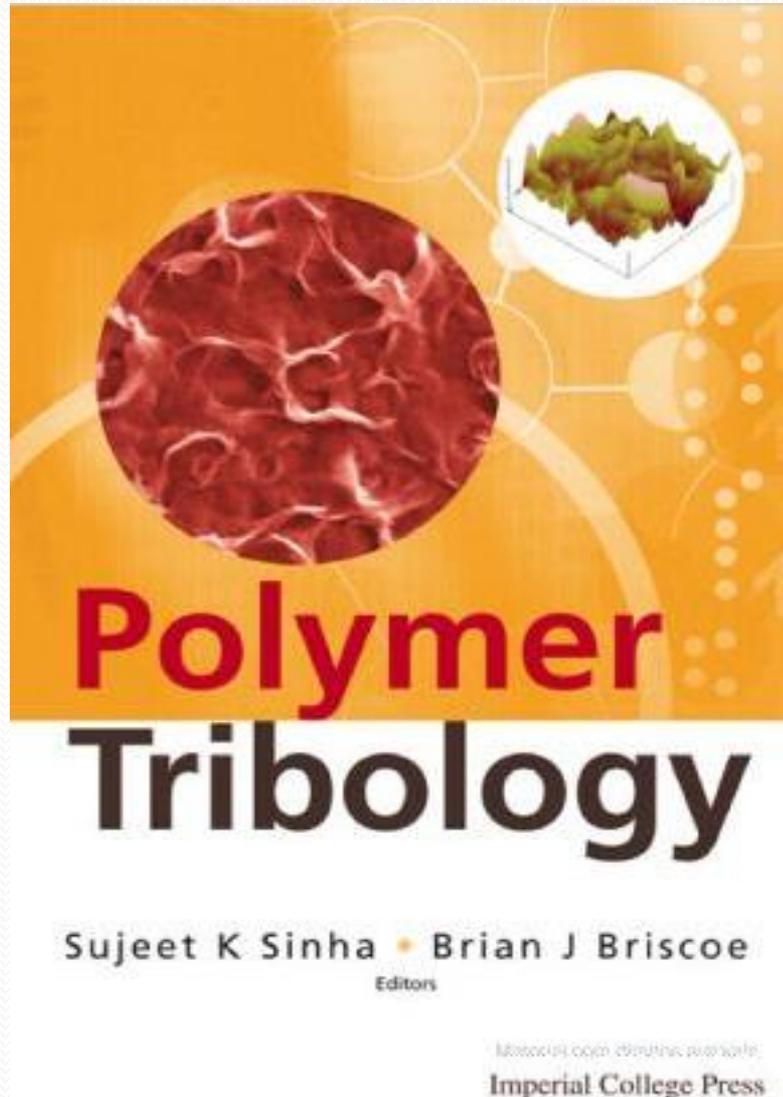
APLICAÇÕES



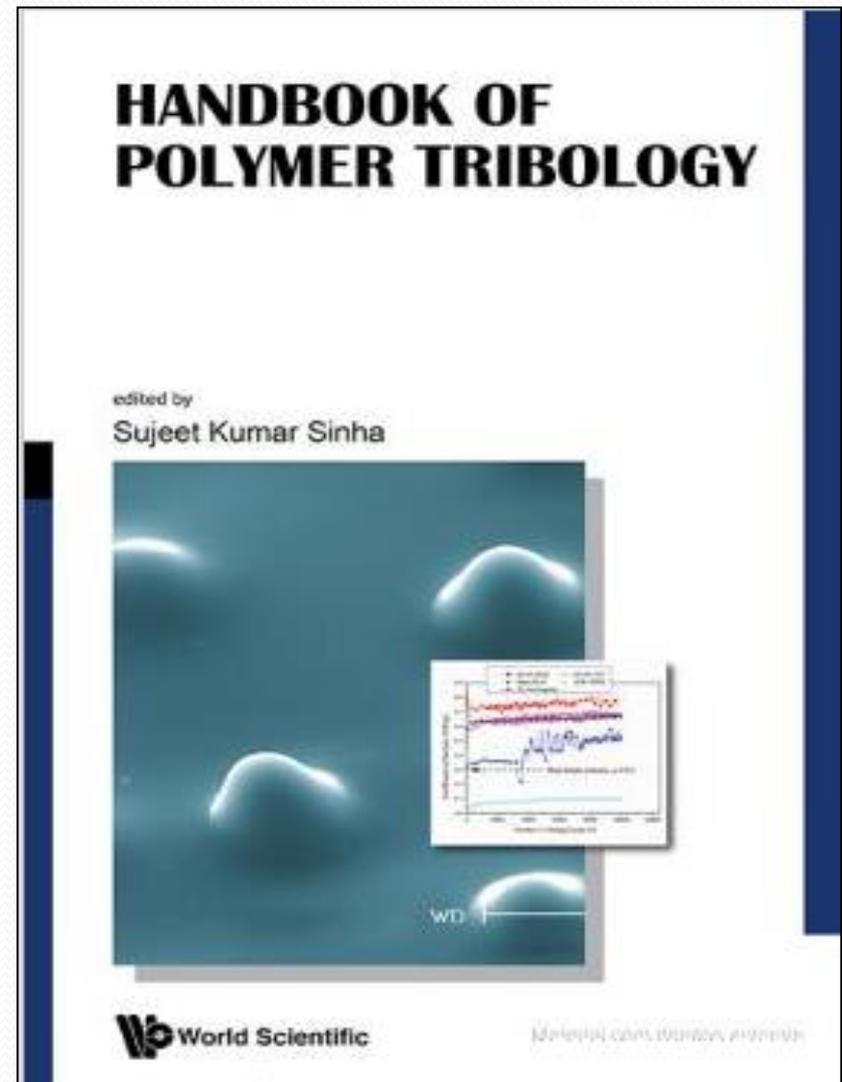
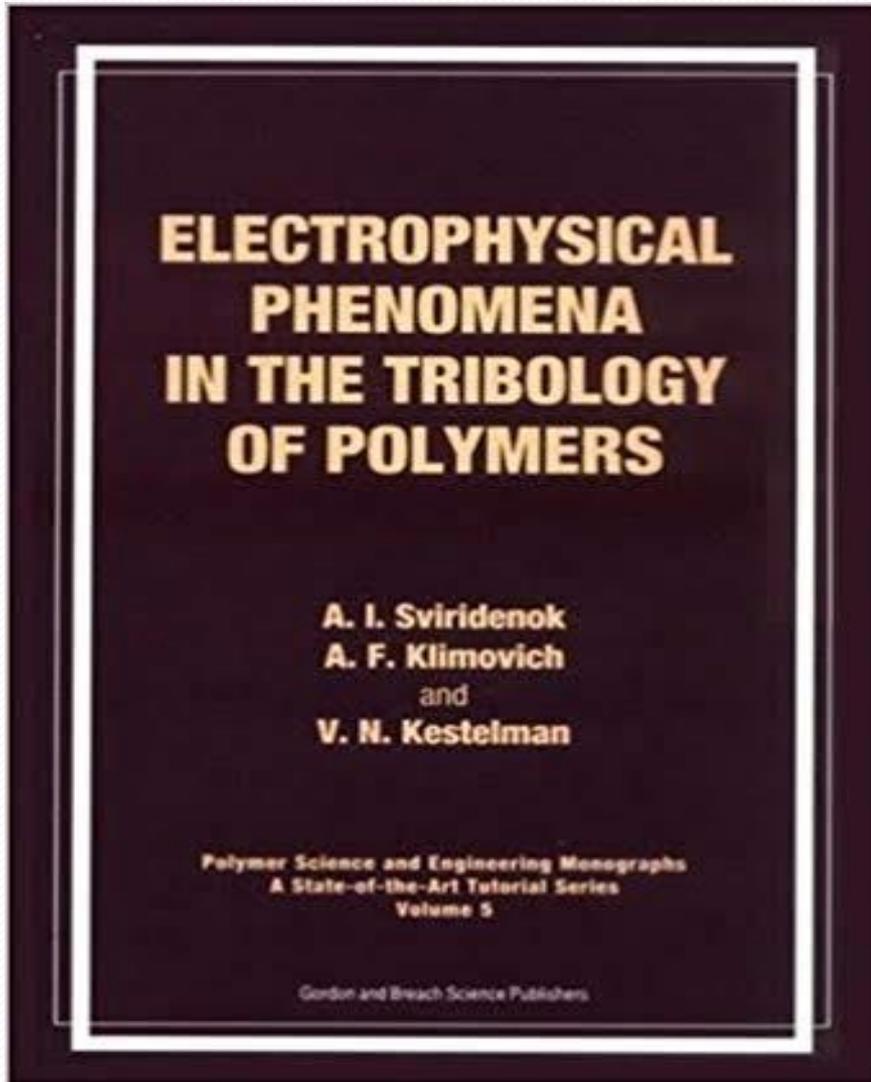
LITERATURA ESPECÍFICA



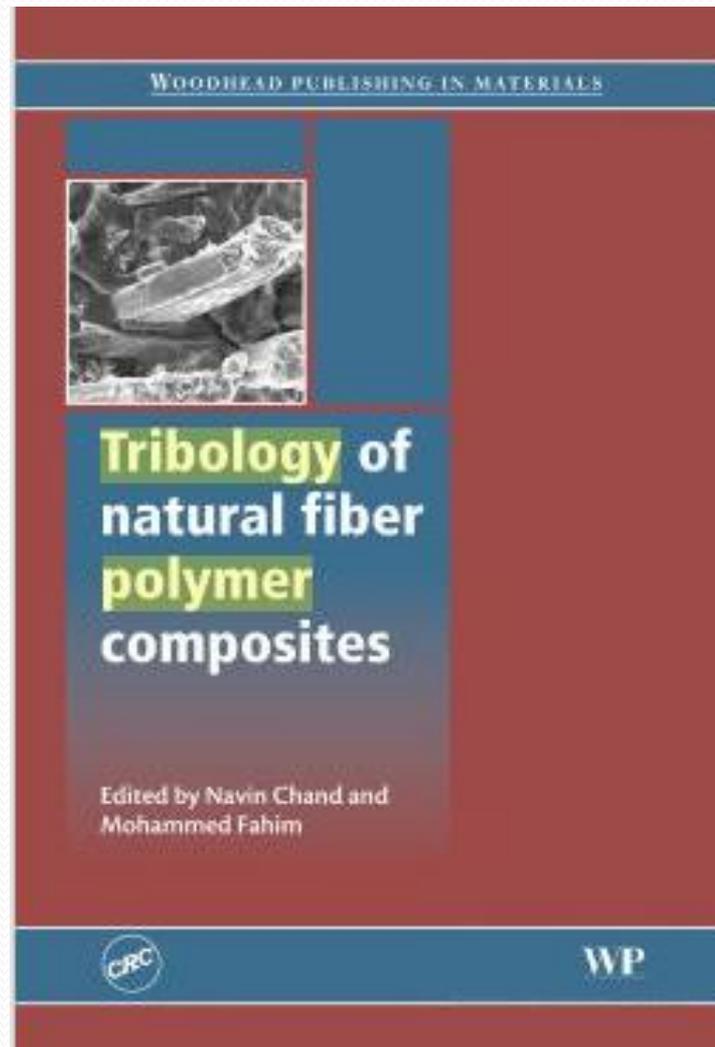
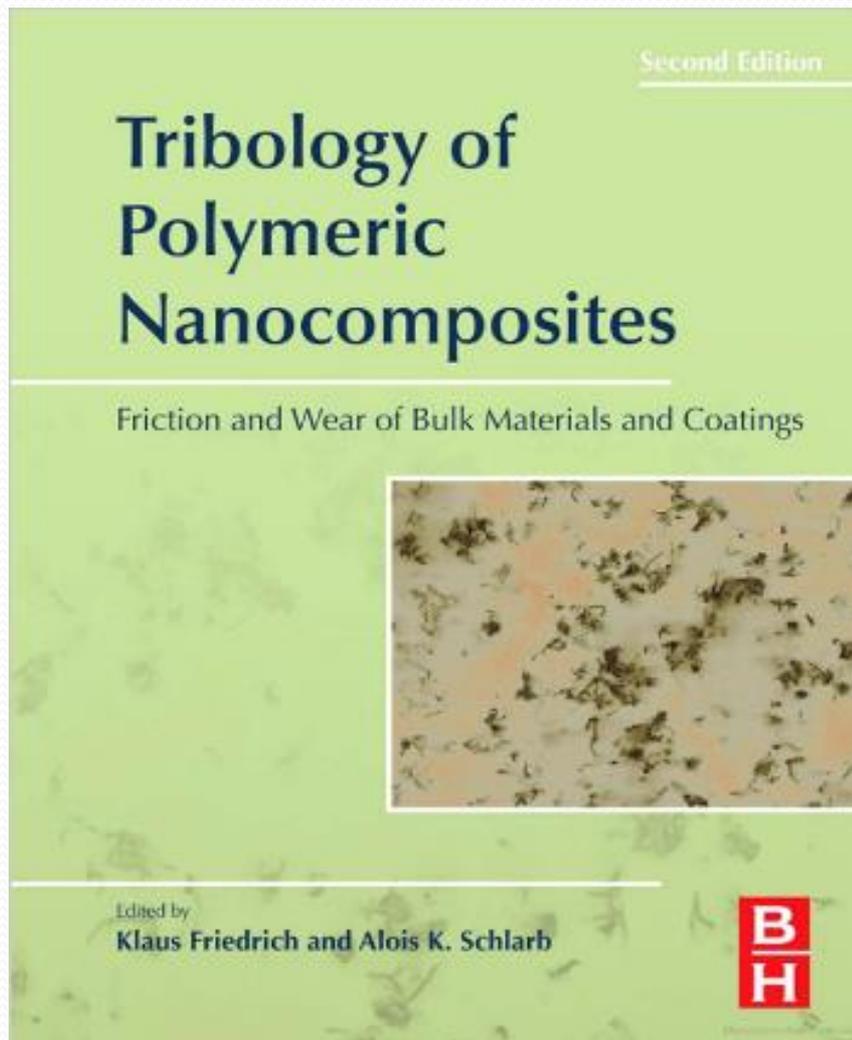
LITERATURA ESPECÍFICA



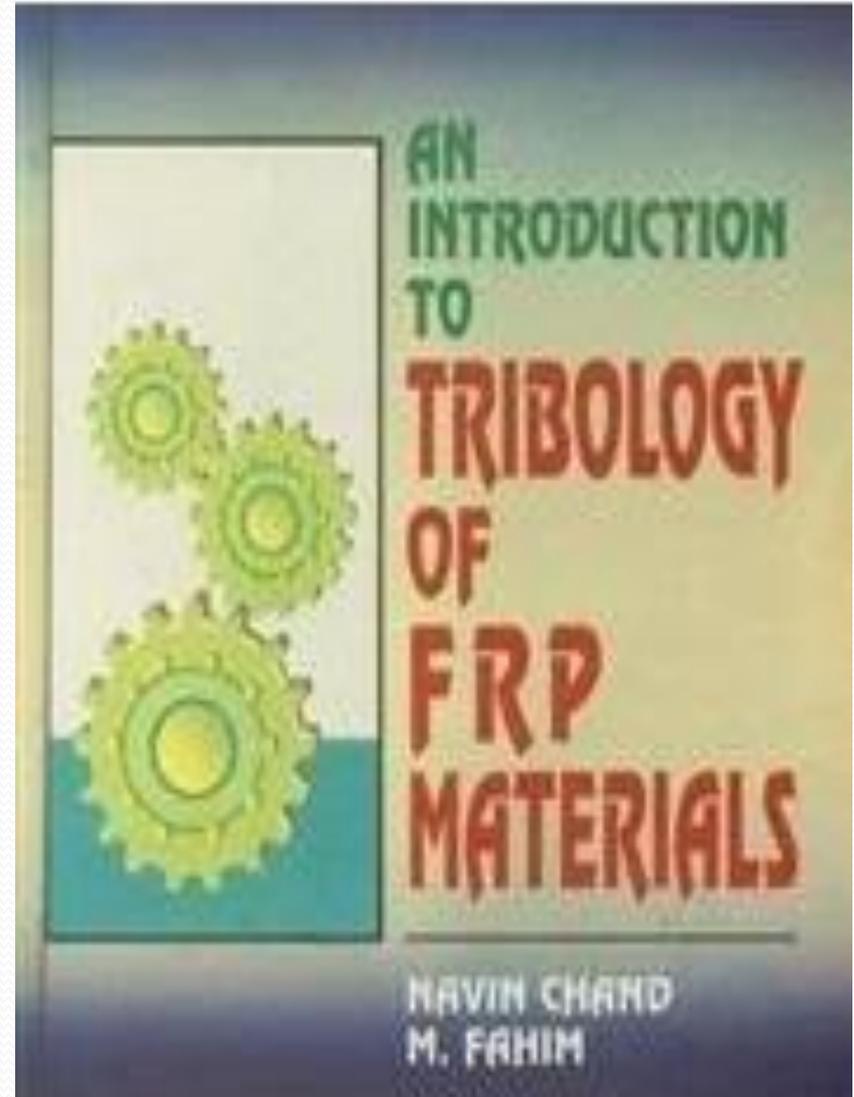
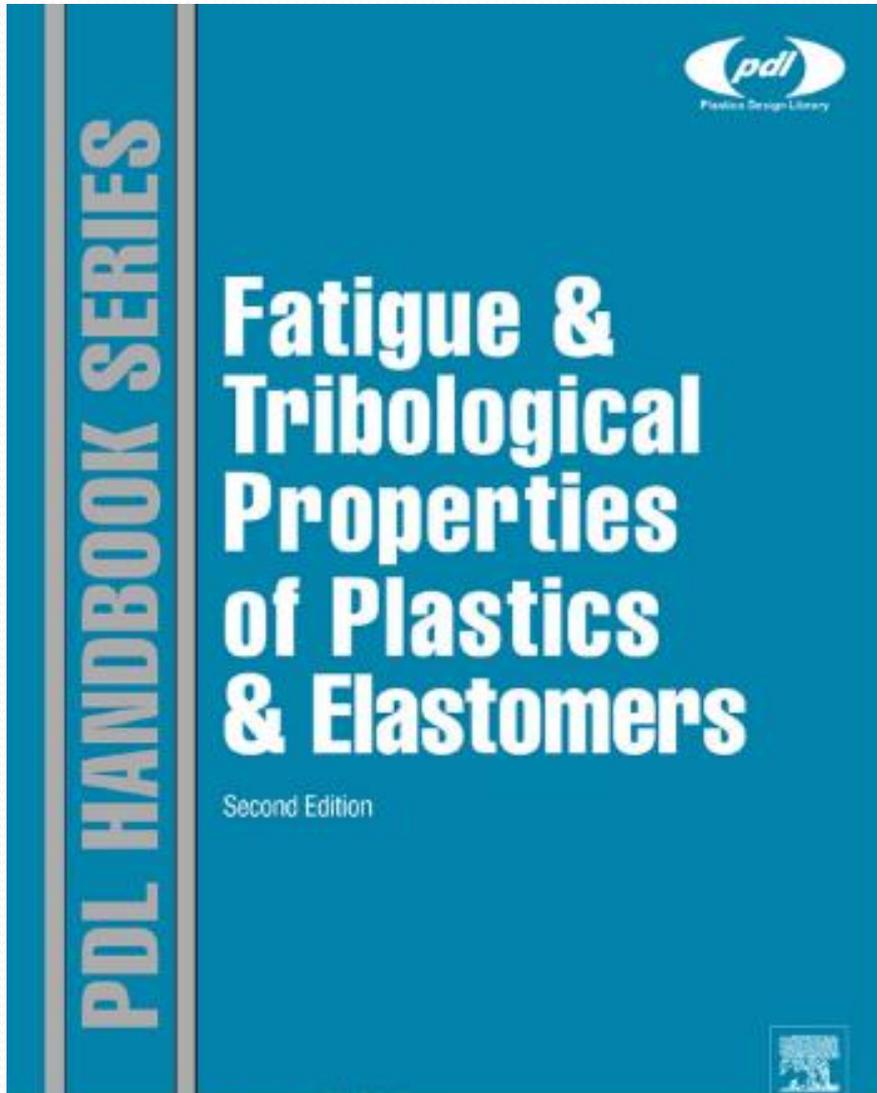
LITERATURA ESPECÍFICA



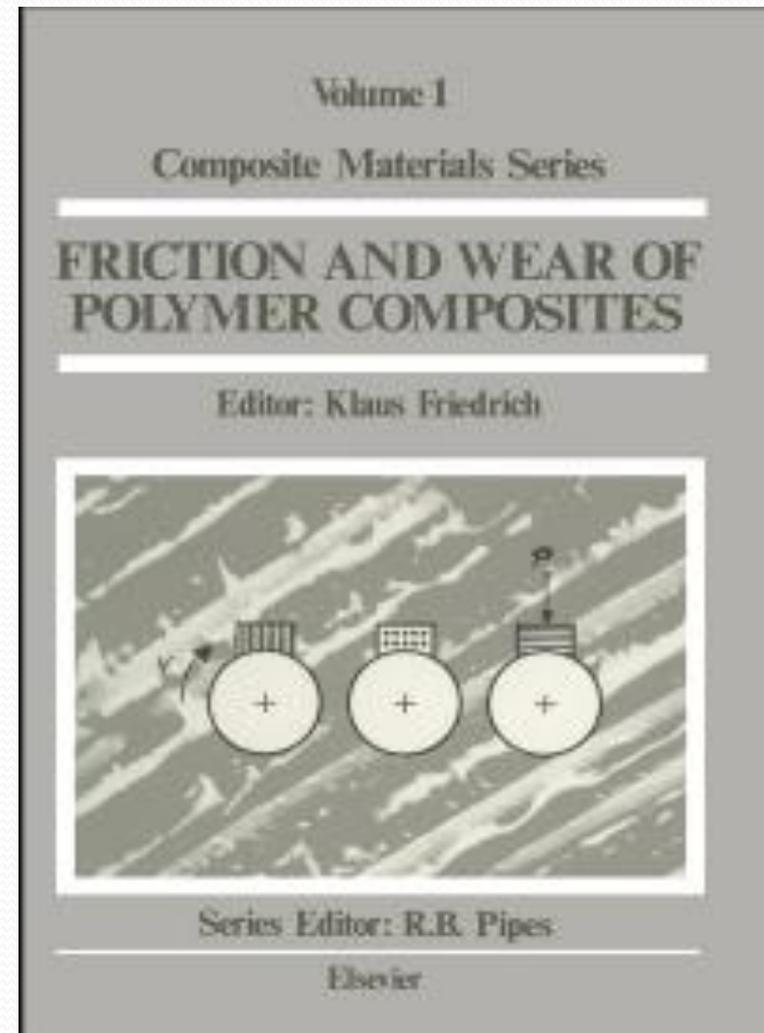
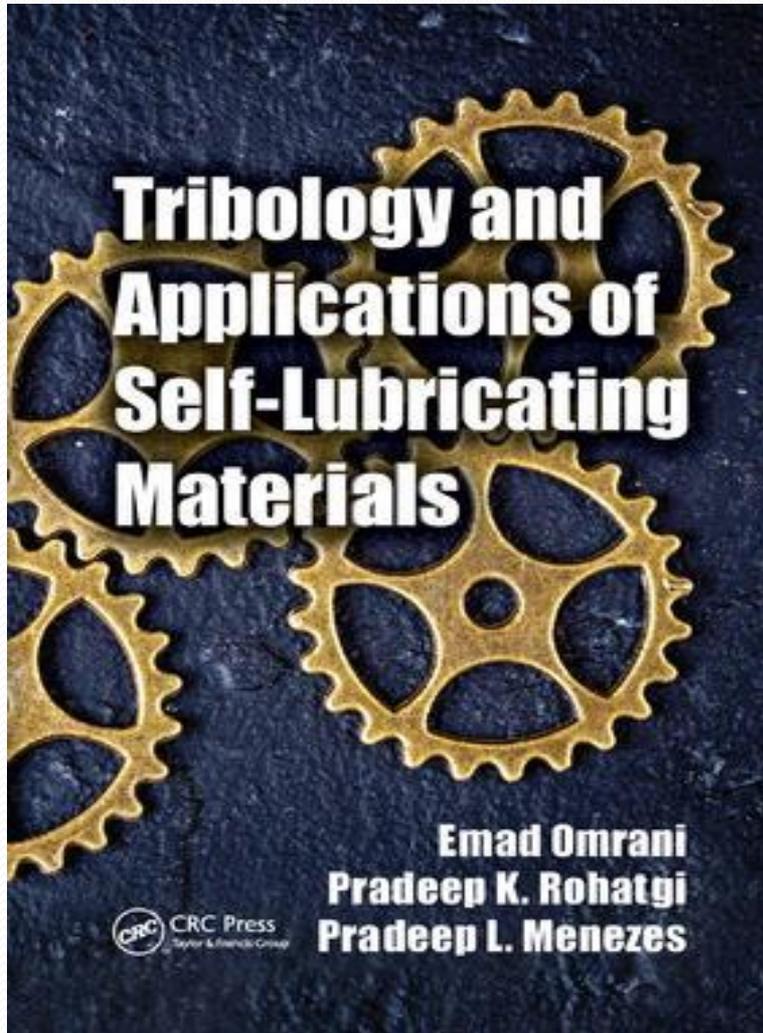
LITERATURA ESPECÍFICA



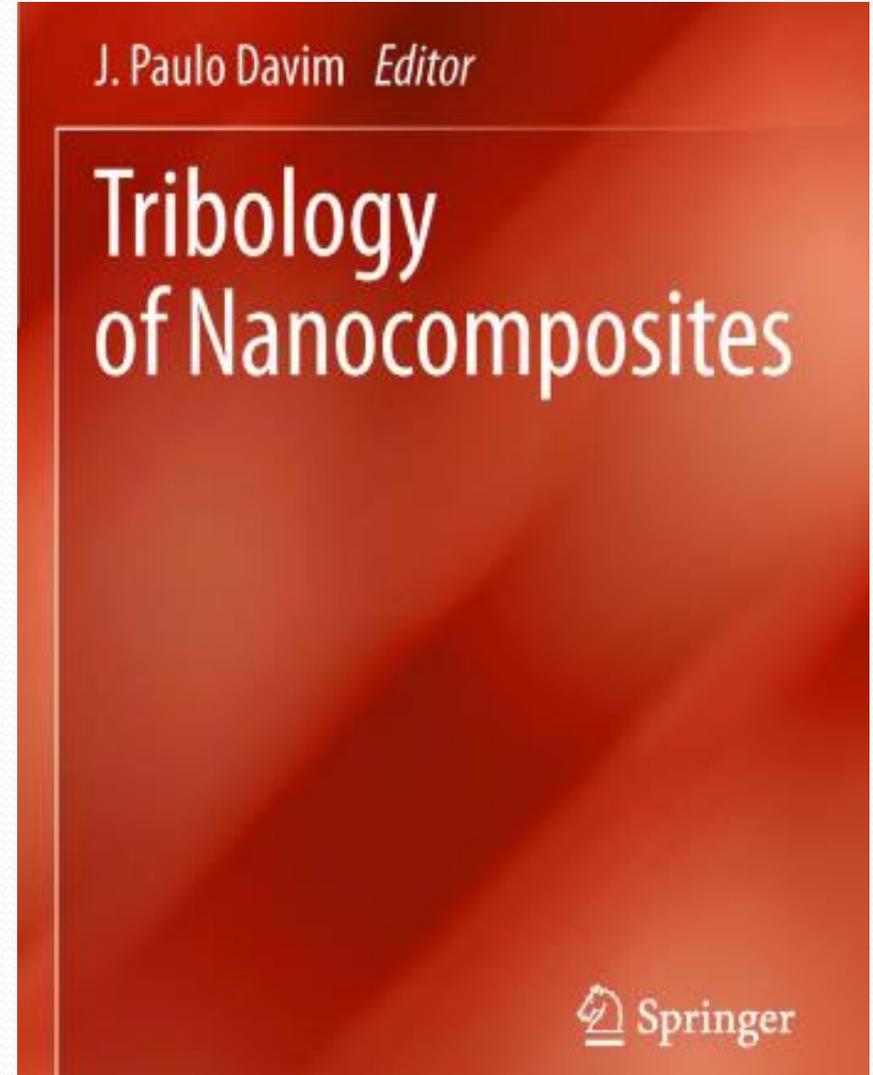
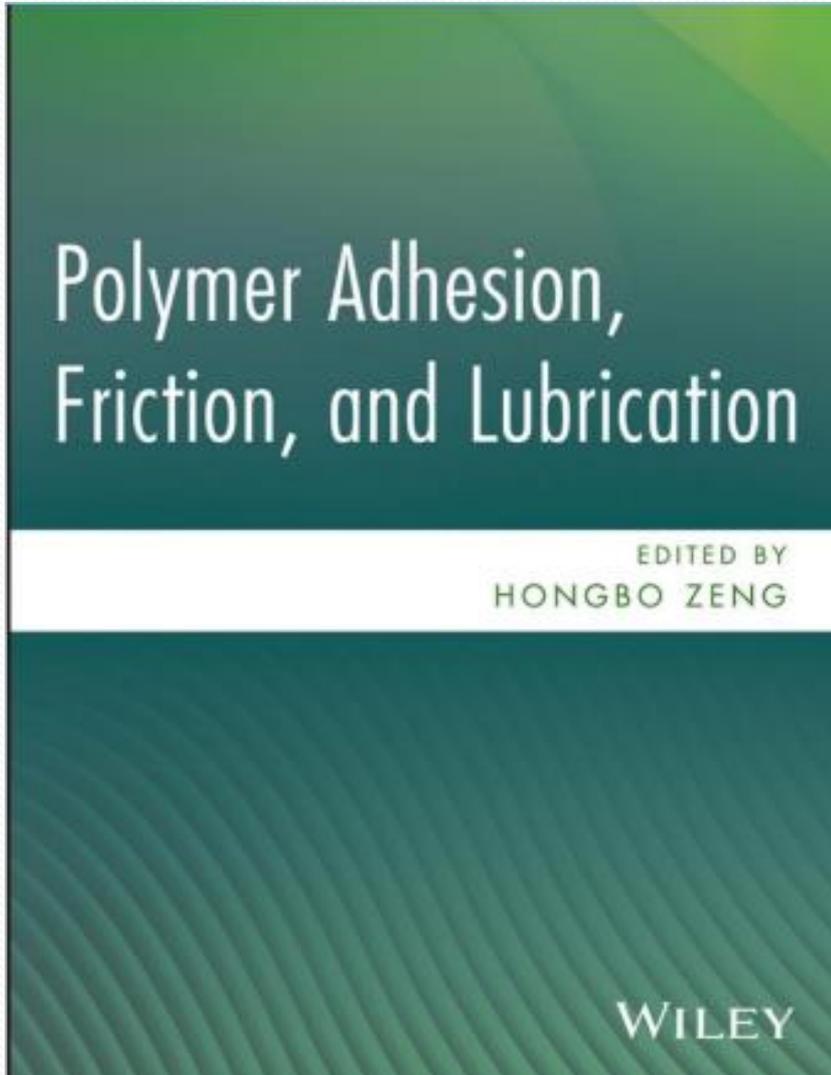
LITERATURA ESPECÍFICA



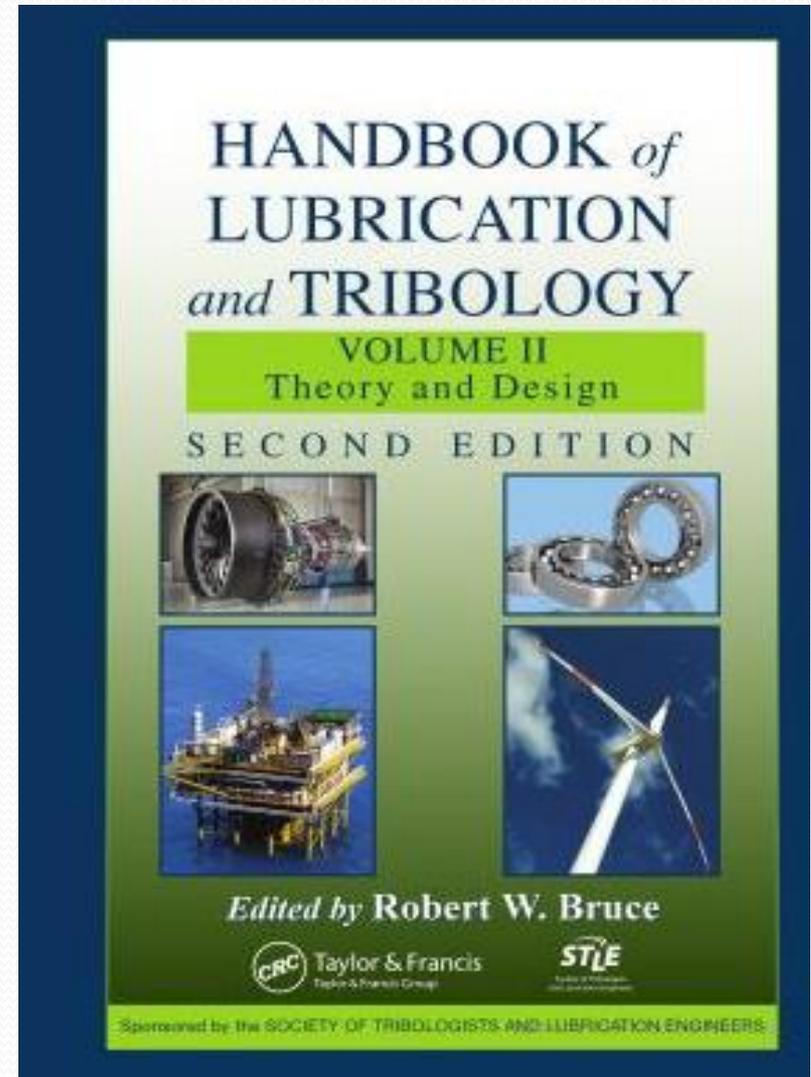
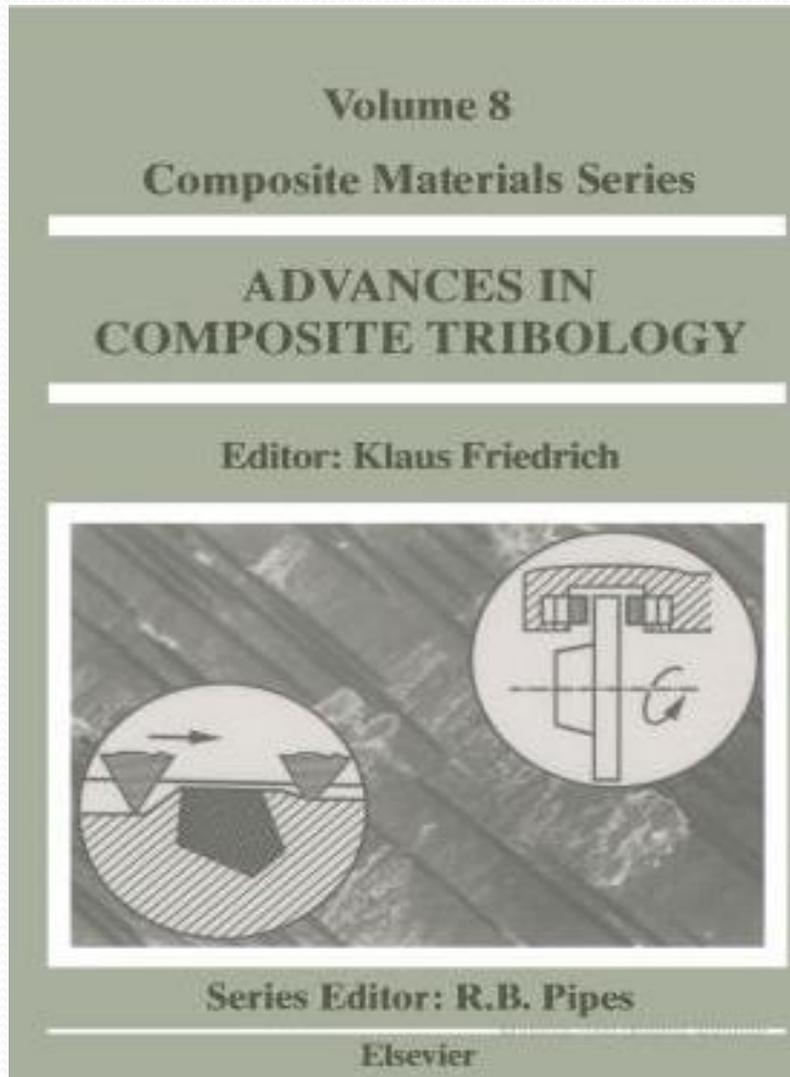
LITERATURA ESPECÍFICA



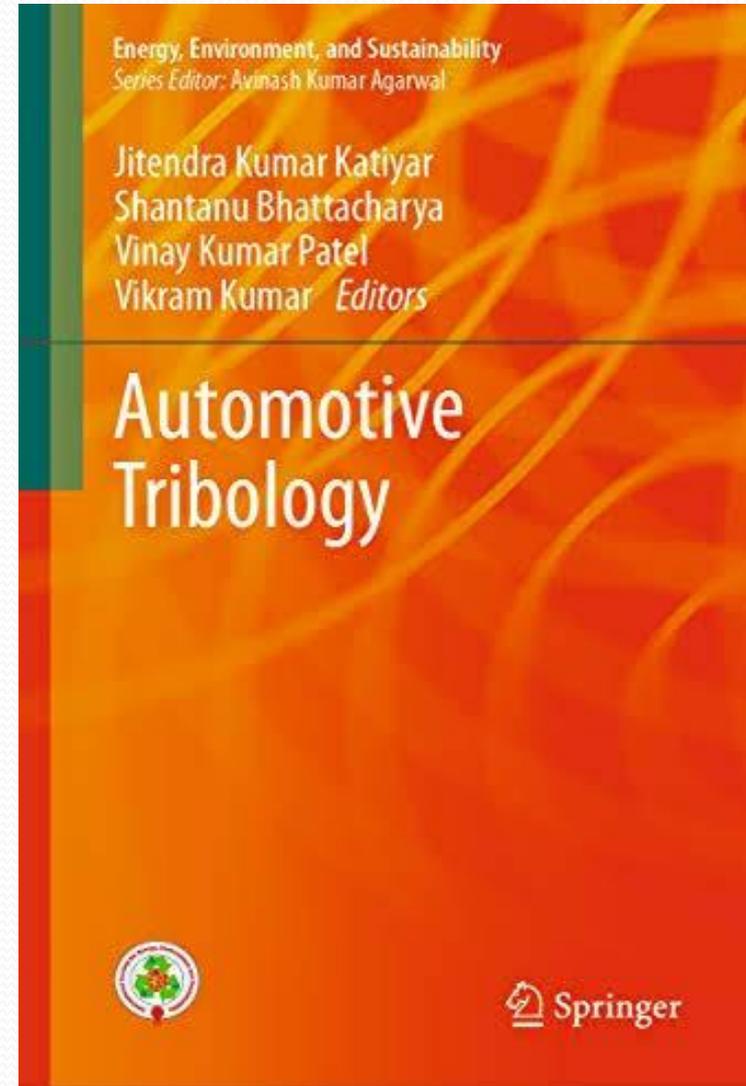
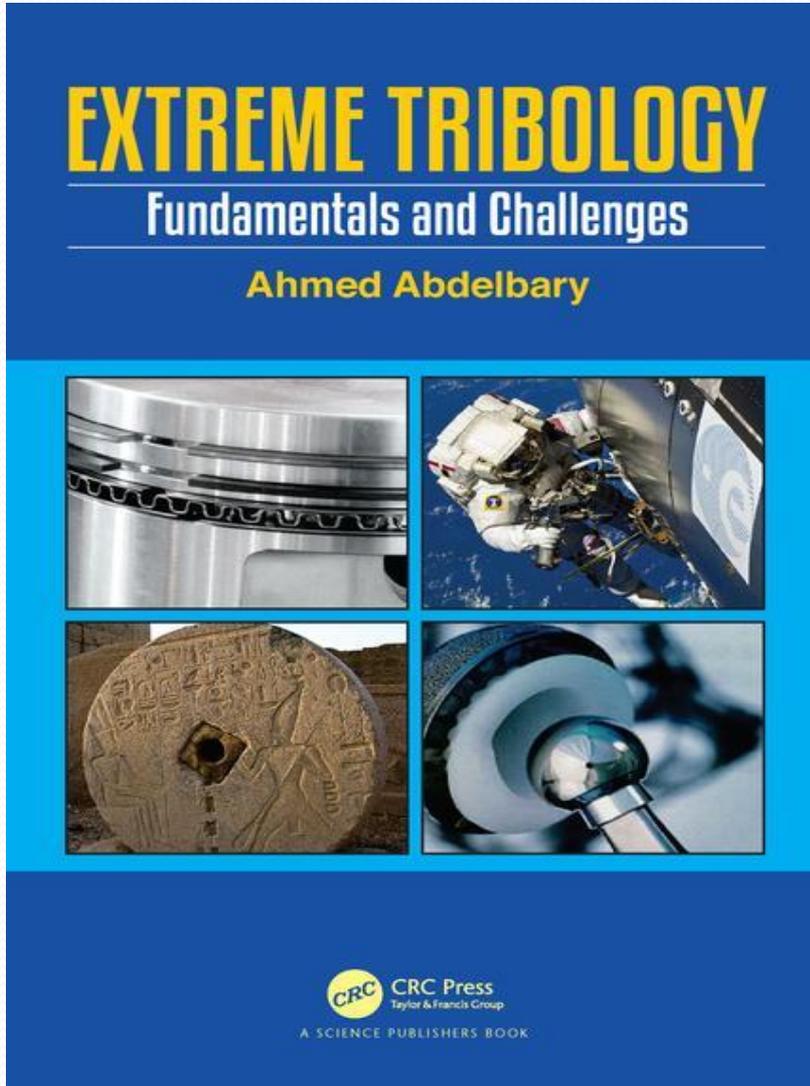
LITERATURA ESPECÍFICA



LITERATURA ESPECÍFICA

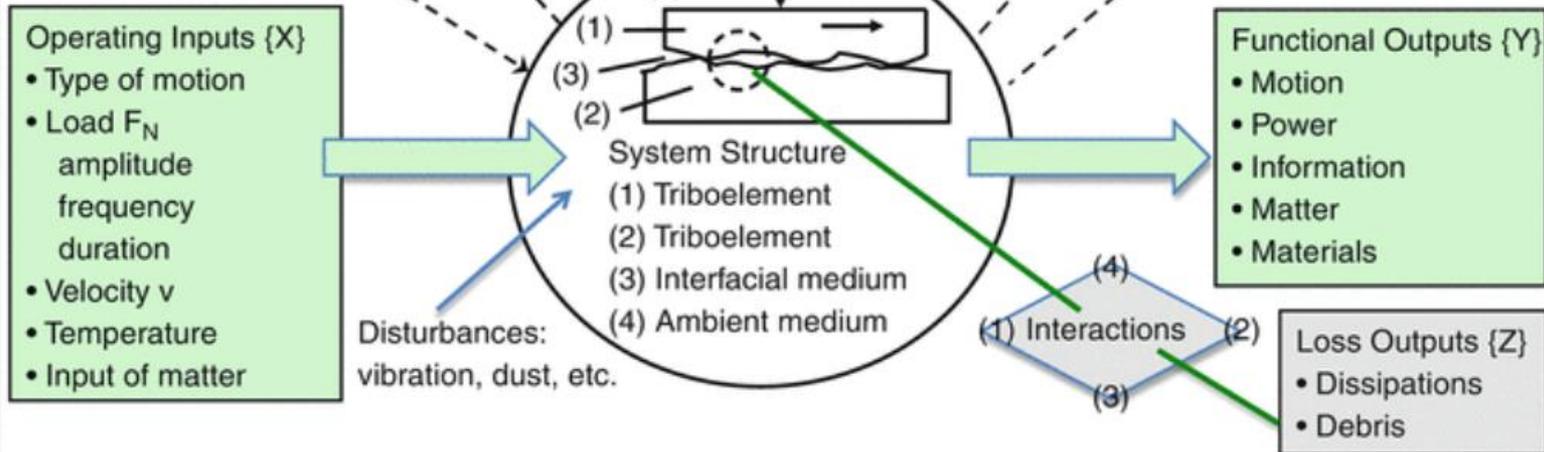
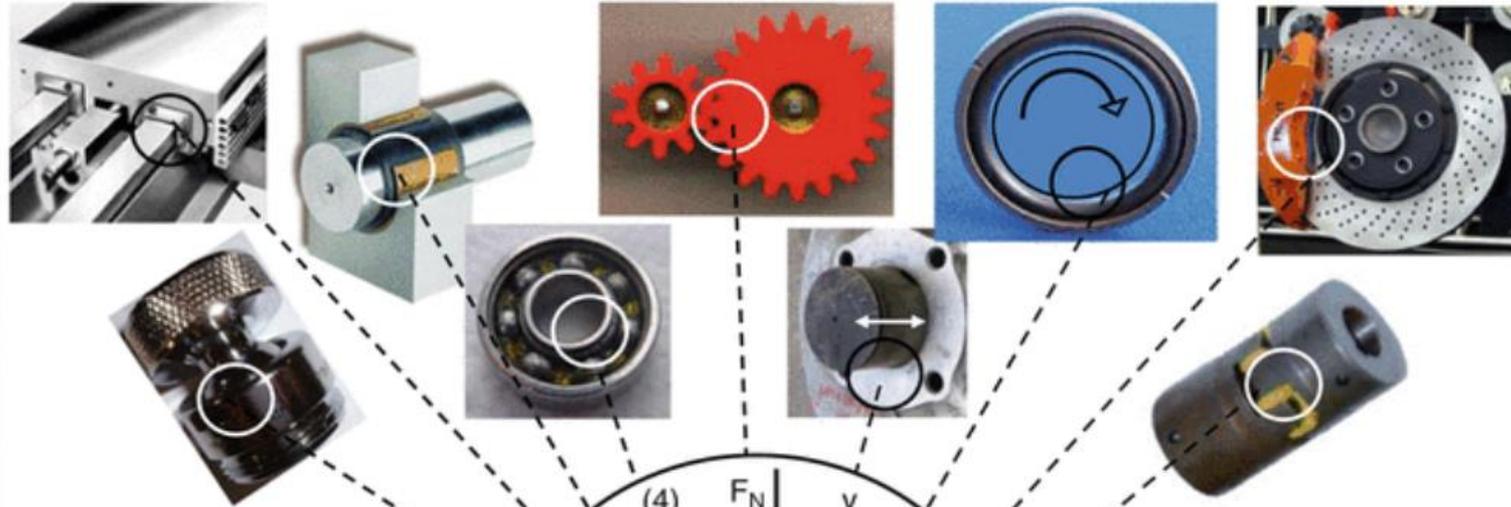


LITERATURA ESPECÍFICA



TRIBOSSISTEMA

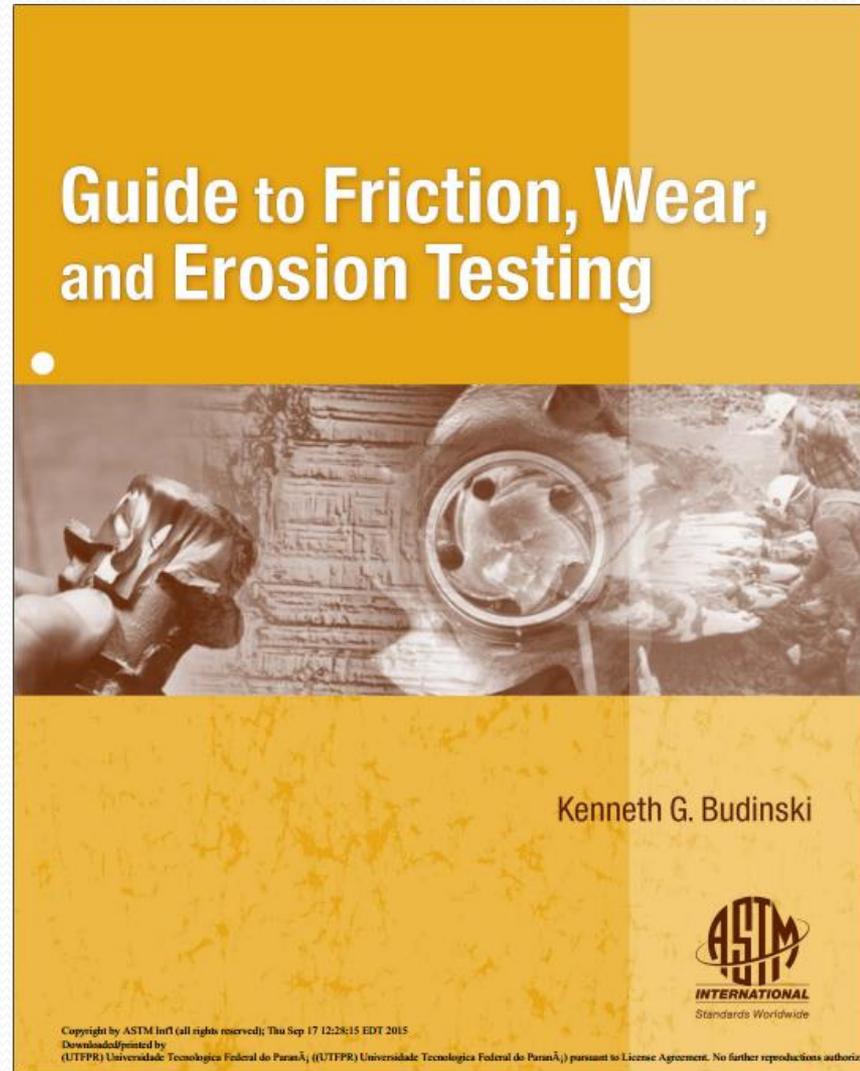
Examples of Tribosystems : • Guides • Joints • Bearings • Gears • Seals • Clutches • Brakes



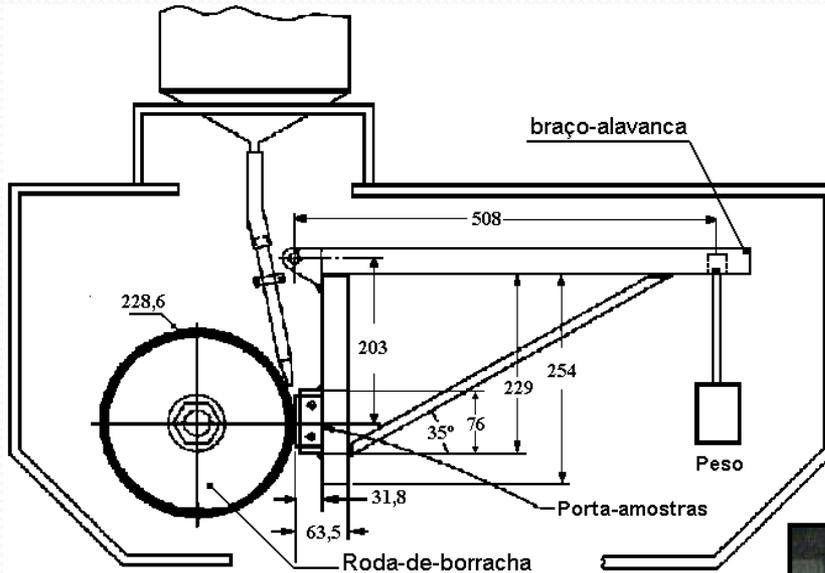
Function of Tribosystems: Transformation of operating inputs into functional outputs

TRIBOTESTING

Ensaio Normalizado
x
Ensaio Não-Normalizado



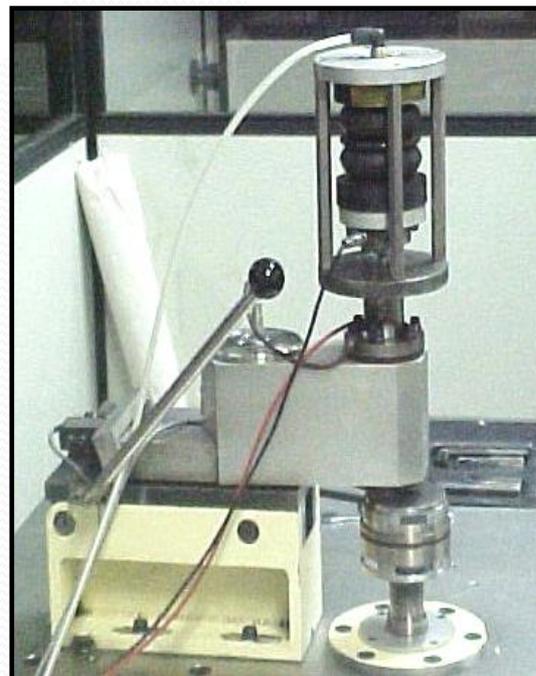
ENSAIOS NORMALIZADOS



**Tribômetro tipo roda de borracha
(Norma ASTM G65-00).**



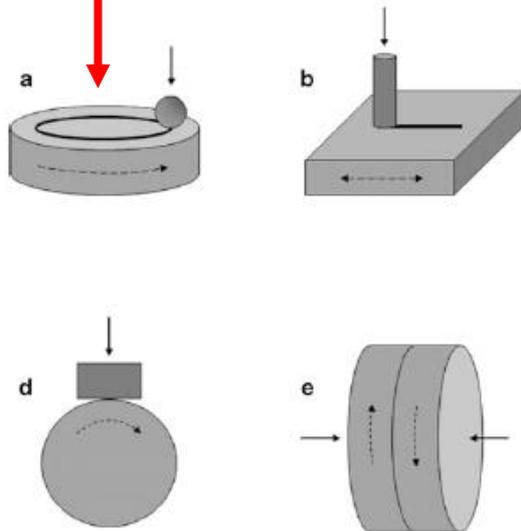
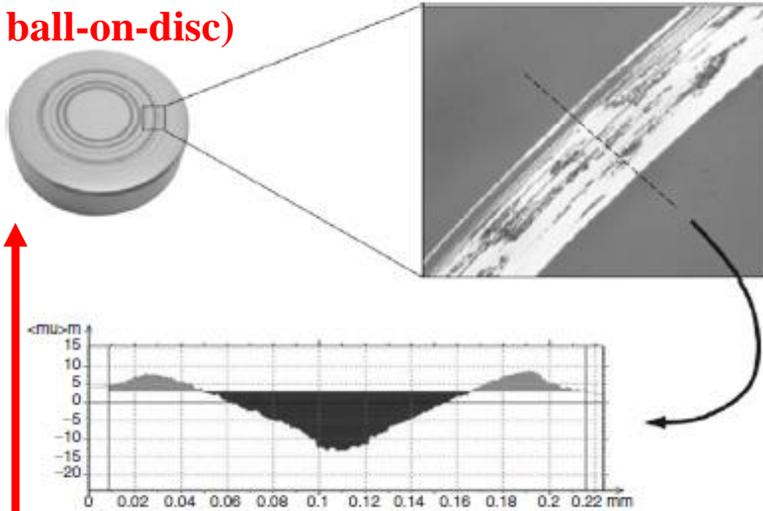
**Rubber Abrasion Test
(Norma DIN 53516)**



**Tribômetro tipo Pino-contra-
disco (Norma ASTM G99-17).**

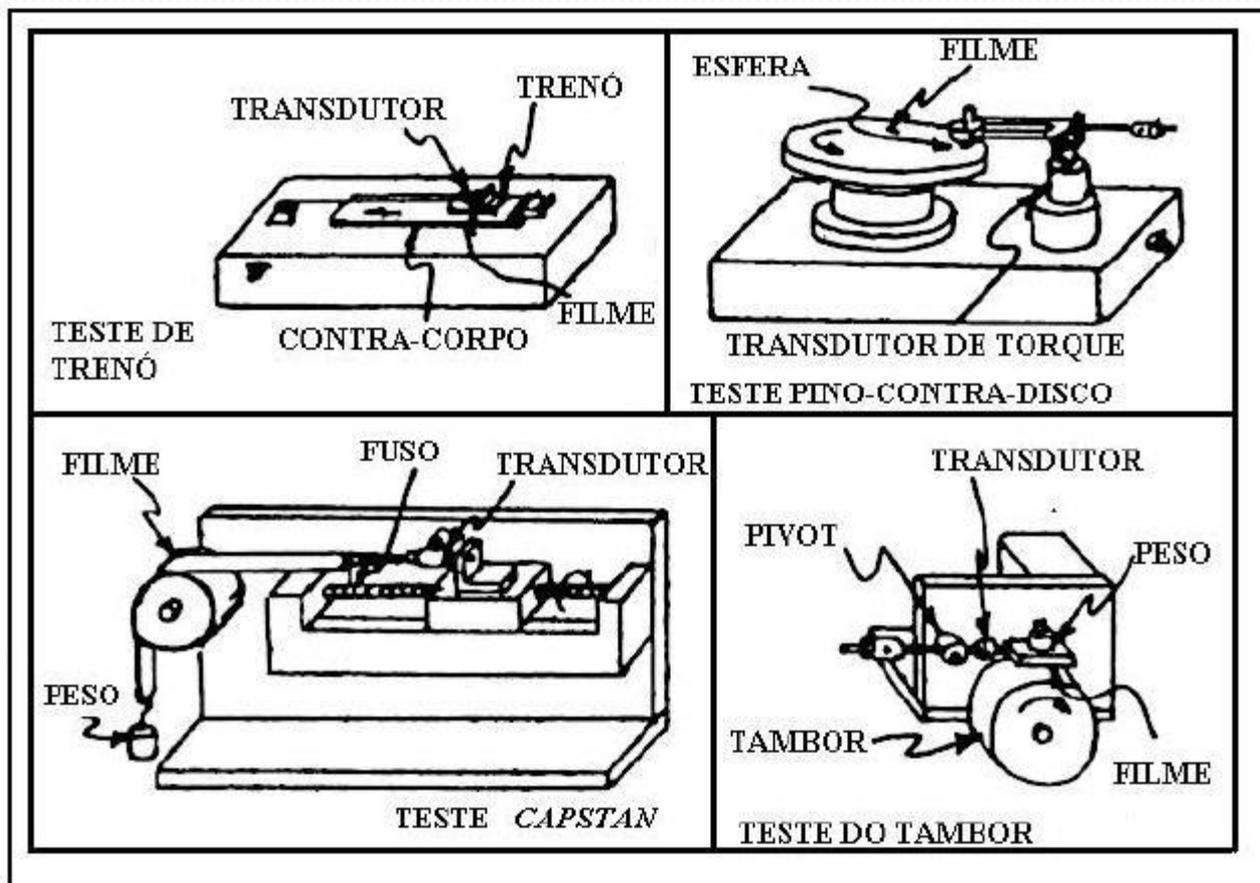
TRIBOTESTING

**Pin-on-disc
(or ball-on-disc)**



**British Pendulum Test
(contato borracha x asfalto)**

TRIBÔMETROS DIFERENTES : RESPOSTA DIFERENTE ?



Ensaio comumente utilizados para medir o coeficiente de atrito de plásticos.

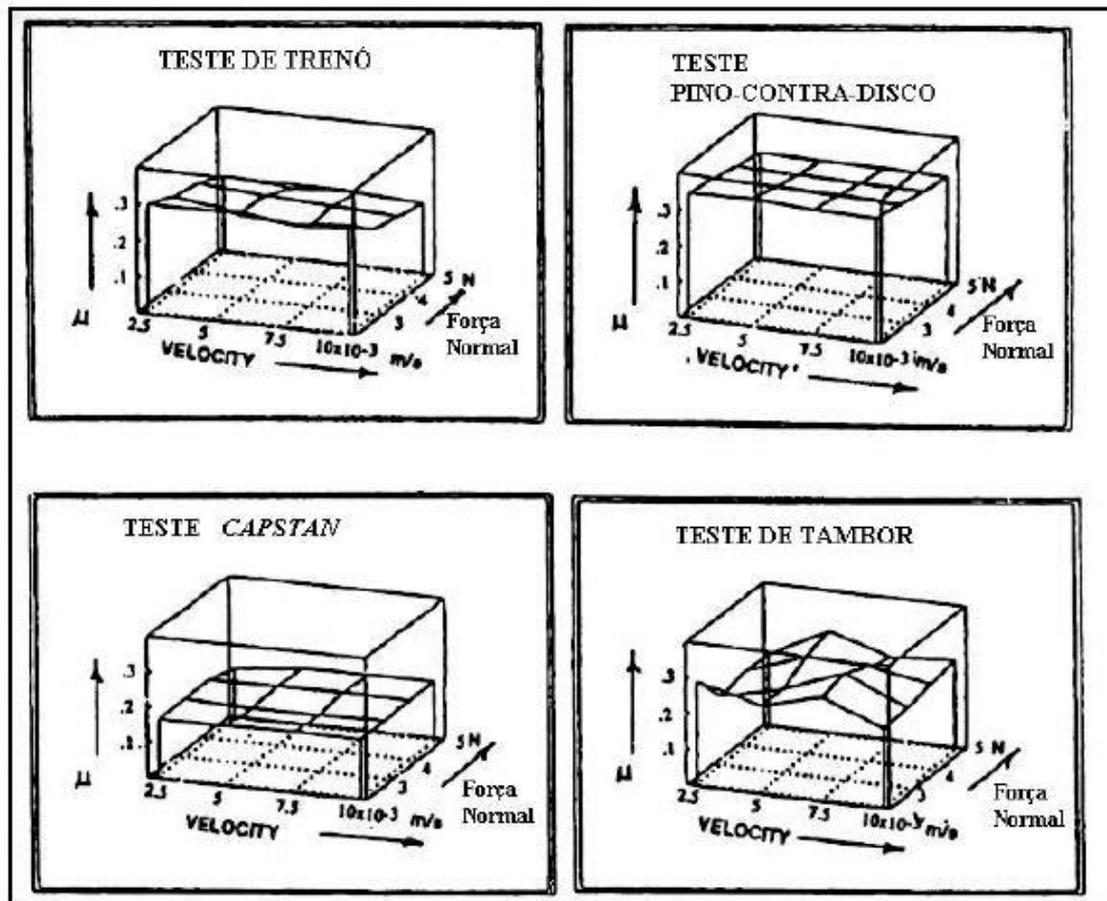
BUDINSKI, K. G. **Friction in machine design. Tribological Modeling for Mechanical Designers**
ASTM, STP 1105, p. 89-125, 1991

TRIBÔMETRO DIFERENTES : RESPOSTA DIFERENTE

Aço Inoxidável 316

X

Filme de Poliéster



BUDINSKI, K. G. Friction in machine design. Tribological Modeling for Mechanical Designers
ASTM, STP 1105, p. 89-125, 1991

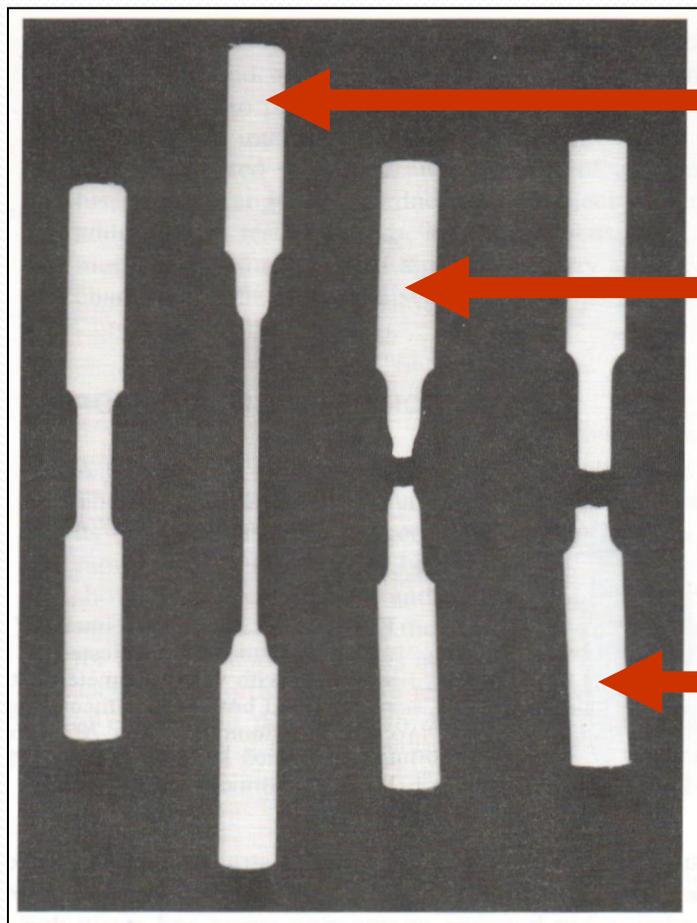
*CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS
E/OU COMPÓSITOS PARA
COMPREENDER SEUS
COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO*

CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS

- Propriedades Mecânicas
 - E, ν , alongamento, σ_{rup} , σ_y , etc..
- Propriedades dinâmico-mecânicas – DMTA
 - E', E'' e E* (G', G'' e G*)
- Dureza (cuidado com o tempo de aplicação da carga)
- Densidade de energia coesiva - ϵ_c
- Grau de cristalinidade (DSC)
- Temperaturas de transição Tm e Tg
 - DSC, TG-DTA, DMTA,
 - HDT e Vicat.
- Energia de superfície (γ)
- Trabalho de Adesão (W_{ab})
- Comportamento quanto a Fluência e a Fadiga
- Acabamento Superficial (rugosidade)

CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS

deformação x alongamento x estrutura



Polietileno de alta densidade
HDPE

Poliamida (*Nylon*[®])
PA

Politetrafluoretileno (*Teflon*)
PTFE

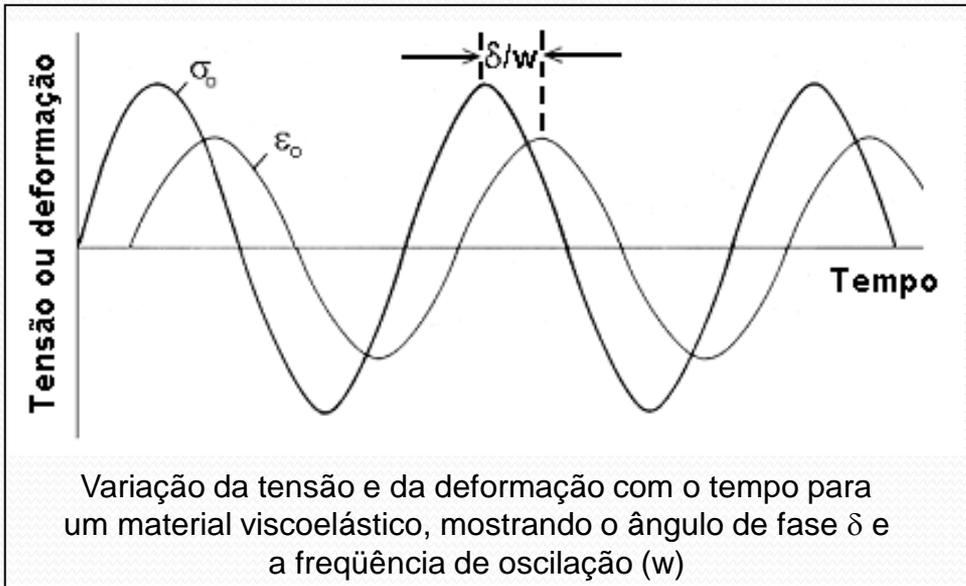
CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS

- Propriedades Mecânicas
 - E , ν , alongamento, σ_{rup} , σ_y , etc..
- Propriedades dinâmico-mecânicas – DMTA
 - E' , E'' e E^* (G' , G'' e G^*)
- Dureza (cuidado com o tempo de aplicação da carga)
- Densidade de energia coesiva - ϵ_c
- Grau de cristalinidade (DSC)
- Temperaturas de transição T_m e T_g
 - DSC, TG-DTA, DMTA,
 - HDT e Vicat.
- Energia de superfície (γ)
- Trabalho de Adesão (W_{ab})
- Comportamento quanto a Fluência e a Fadiga
- Acabamento Superficial (rugosidade)

CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS

Comportamento Dinâmico-Mecânico

Energia de amortecimento



$$E' = \sigma' / \epsilon_0 = (\sigma_0 / \epsilon_0) \cdot \cos \delta = E^* \cdot \cos \delta$$

(módulo de armazenamento)

$$E'' = \sigma'' / \epsilon_0 = (\sigma_0 / \epsilon_0) \cdot \sin \delta = E^* \cdot \sin \delta$$

(módulo de perda)

E^* = módulo de elasticidade complexo

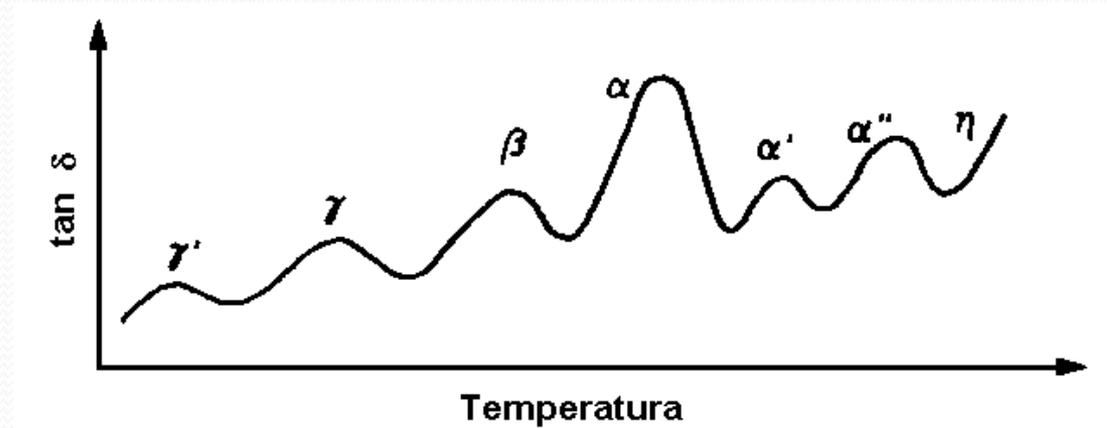
$$E^* = (E'^2 + E''^2)^{1/2}$$

$\text{tg } \delta \Rightarrow$ CAPACIDADE DE AMORTECIMENTO

$$\text{tg } \delta = E'' / E' = (E^* \cdot \sin \delta) / (E^* \cdot \cos \delta)$$

(tan delta : termo tradicional)

CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS



Representação esquemática da capacidade de amortecimento ($\tan \delta$) de um polímero semi-cristalino em função da temperatura

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

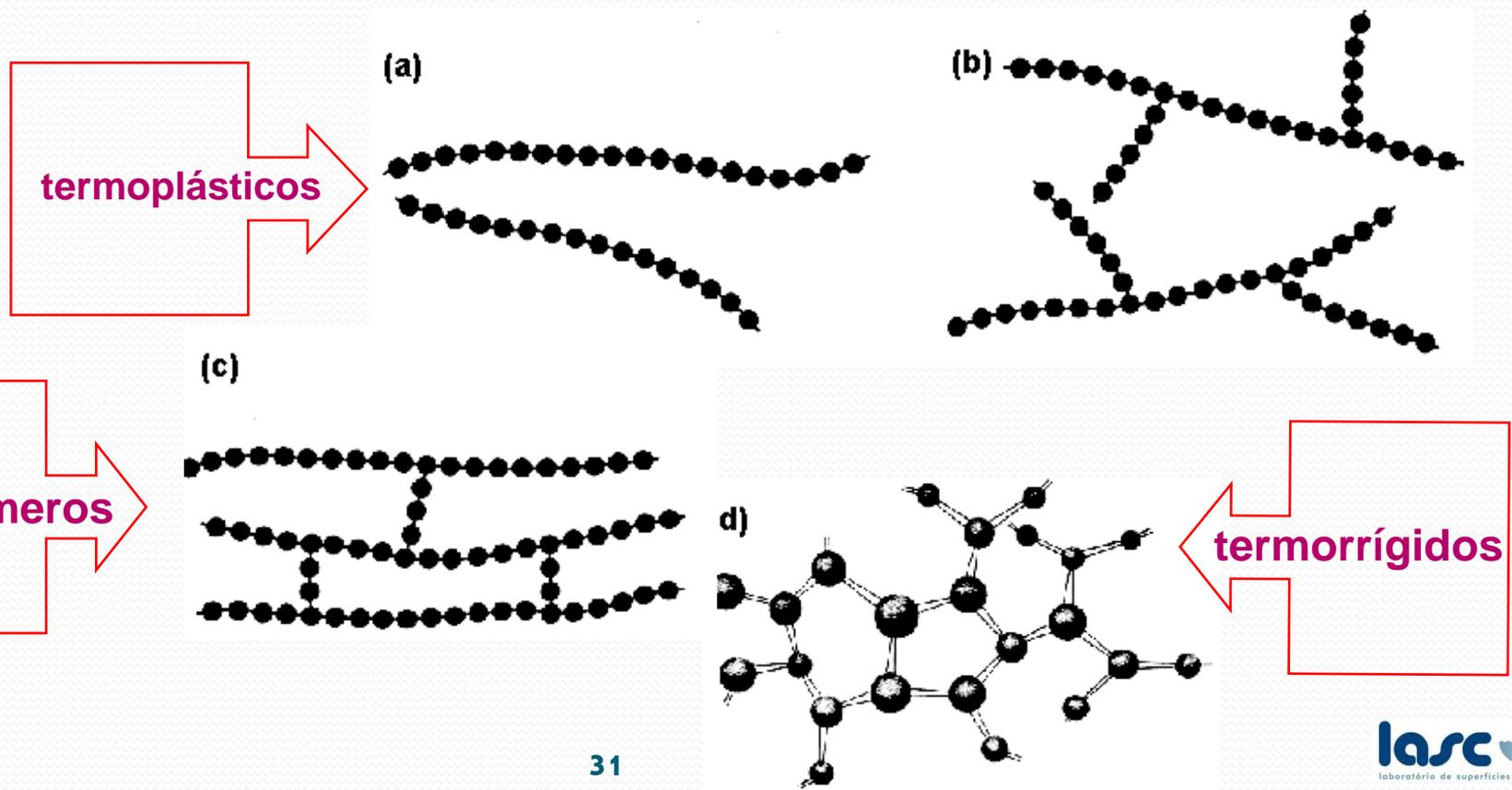
CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS

- Propriedades Mecânicas
 - E , ν , alongamento, σ_{rup} , σ_y , etc..
- Propriedades dinâmico-mecânicas – DMTA
 - E' , E'' e E^* (G' , G'' e G^*)
- Dureza (cuidado com o tempo de aplicação da carga)
- Densidade de energia coesiva - ϵ_c
- Grau de cristalinidade (DSC)
- Temperaturas de transição T_m e T_g
 - DSC, TG-DTA, DMTA,
 - HDT e Vicat.
- Energia de superfície (γ)
- Trabalho de Adesão (W_{ab})
- Comportamento quanto a Fluência e a Fadiga
- Acabamento Superficial (rugosidade)

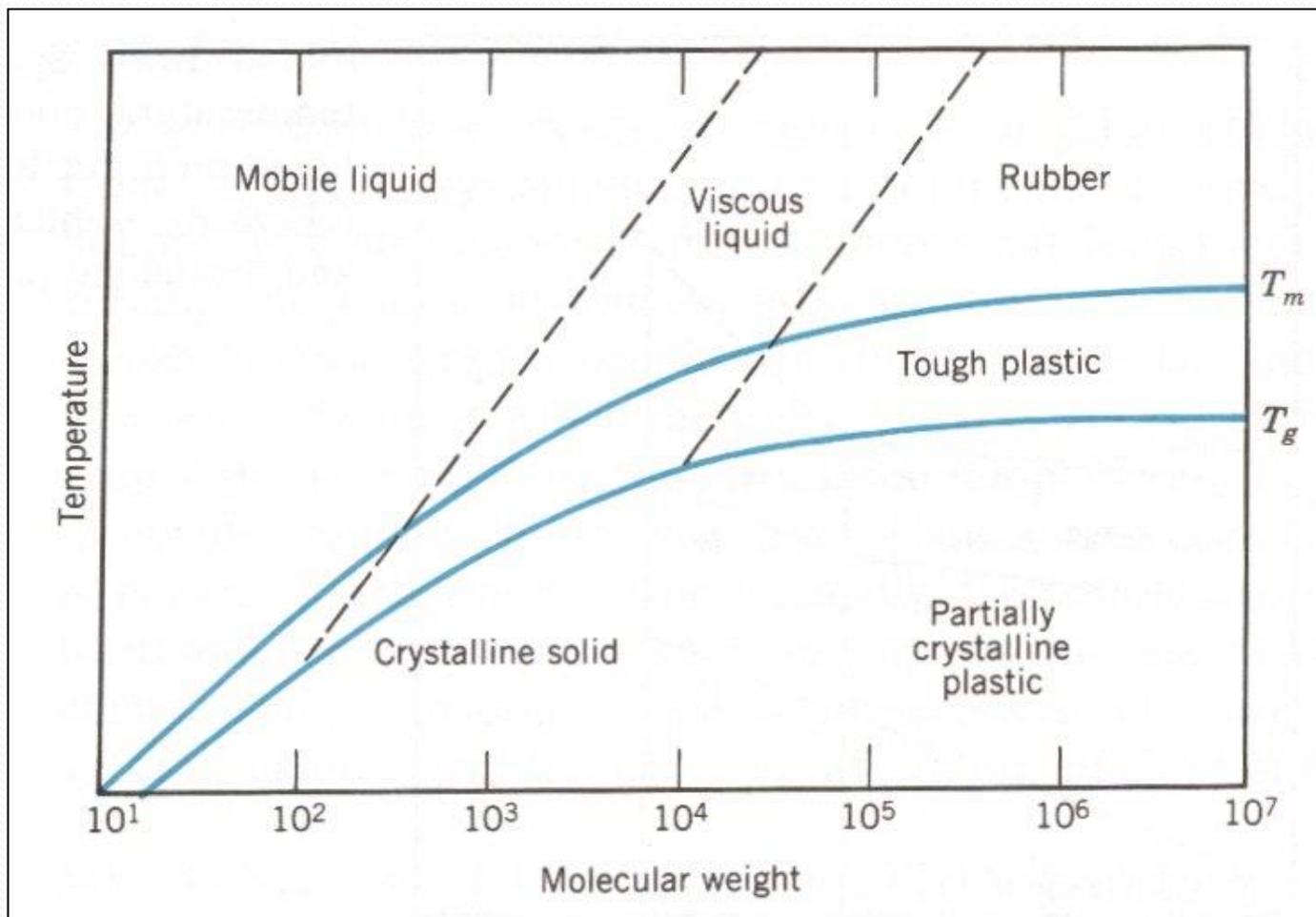
Classificação - Macromoléculas

- Tipo de ligações atômicas

- lineares (a)
- ramificados (b)
- c/ ligações cruzadas (c)
- em rede (d)



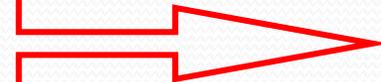
Propriedades Térmicas



Transições dependem do peso molecular

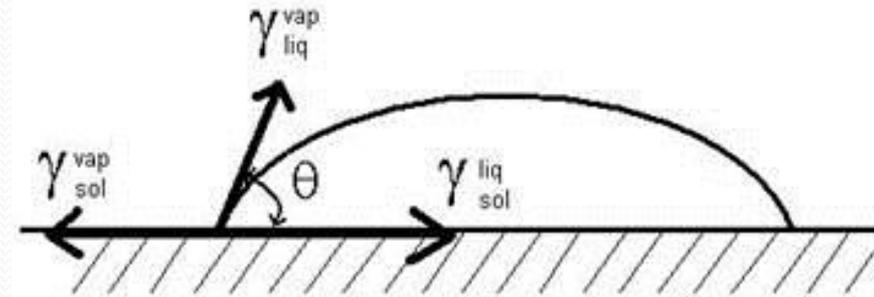
Caracterização dos polímeros

- Propriedades Mecânicas
 - E , ν , alongamento, σ_{rup} , σ_y , etc..
- Propriedades dinâmico-mecânicas – DMTA
 - E' , E'' e E^* (G' , G'' e G^*)
- Dureza (cuidado com o tempo de aplicação da carga)
- Densidade de energia coesiva - ϵ_c
- Grau de cristalinidade (DSC)
- Temperaturas de transição T_m e T_g
 - DSC, TG-DTA, DMTA,
 - HDT e Vicat.
- Energia de superfície (γ)
- Trabalho de Adesão (W_{ab})
- Comportamento quanto a Fluência e a Fadiga
- Acabamento Superficial (rugosidade)

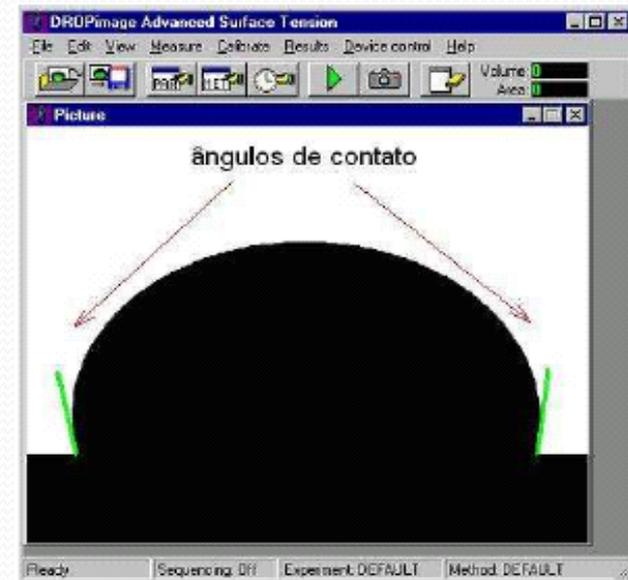


TRABALHO DE ADESÃO - W_{ab}

- Energia de Superfície - γ
 - Método da gota Sessil
 - Balanço de forças
 - 2 Líquidos
 - Polar – Água deionizada
 - Apolar – Diiodometano
- Critério de Wu (1971) para o trabalho de Adesão (W_{ab})
 - Equação Média Harmônica



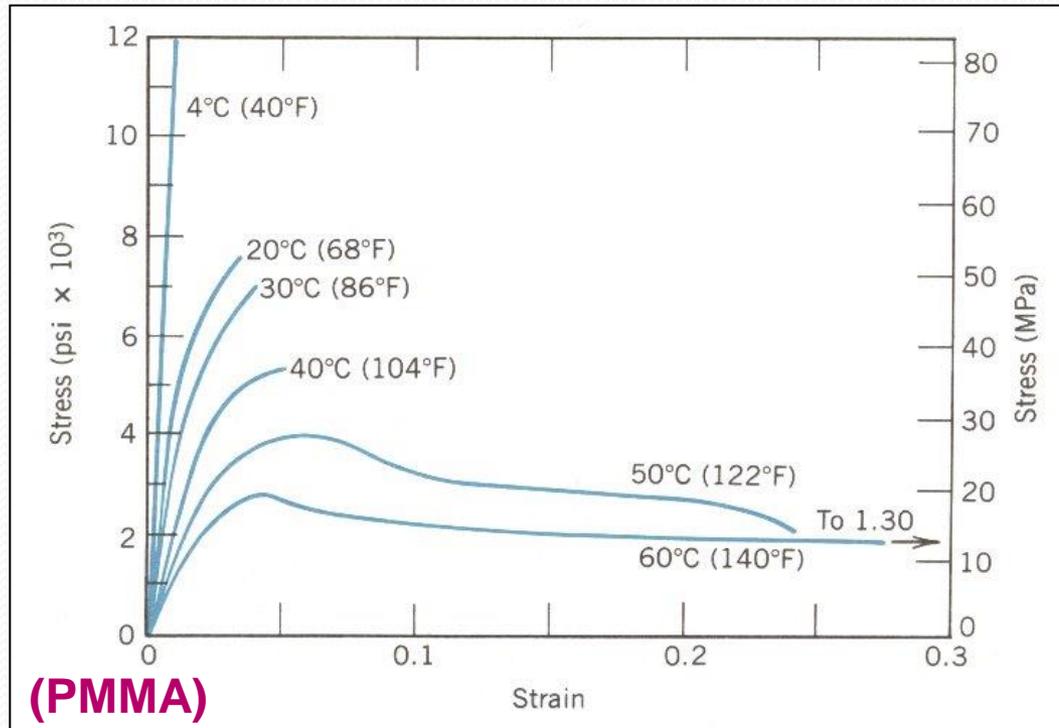
$$\gamma_{\text{sol}}^{\text{vap}} = \gamma_{\text{liq}}^{\text{sol}} + \gamma_{\text{liq}}^{\text{vap}} \cdot \cos \theta$$



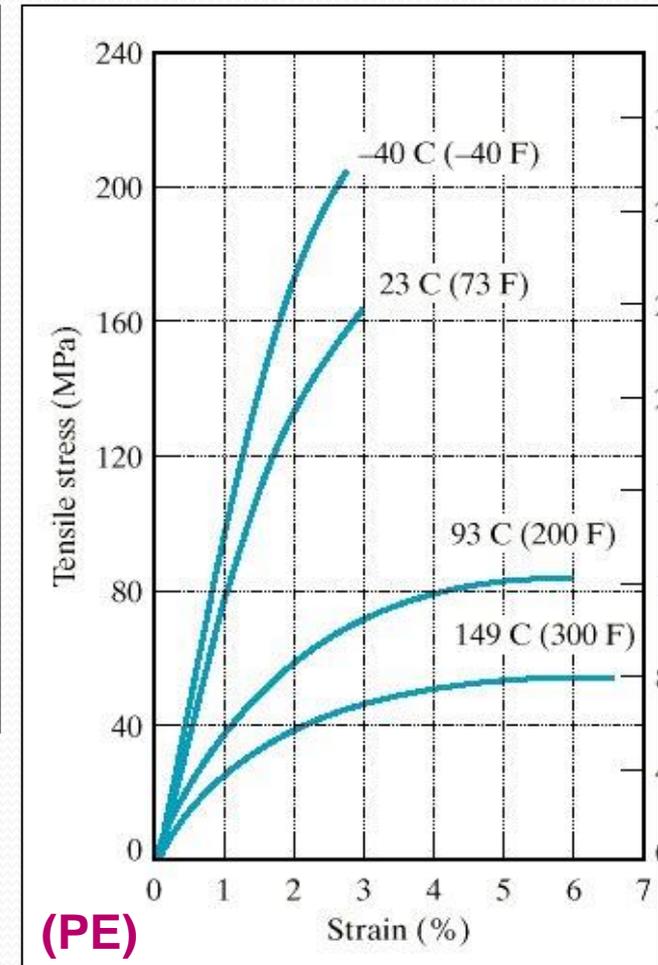
Caracterização dos polímeros

- Propriedades Mecânicas
 - E , ν , alongamento, σ_{rup} , σ_y , etc..
- Propriedades dinâmico-mecânicas – DMTA
 - E' , E'' e E^* (G' , G'' e G^*)
- Dureza (cuidado com o tempo de aplicação da carga)
- Densidade de energia coesiva - ϵ_c
- Grau de cristalinidade (DSC)
- Temperaturas de transição T_m e T_g
 - DSC, TG-DTA, DMTA,
 - HDT e Vicat.
- Energia de superfície (γ)
- Trabalho de Adesão (W_{ab})
- Comportamento quanto a Fluência e a Fadiga
- Acabamento Superficial (rugosidade)

Comportamento Mecânico x Temperatura



As propriedades mecânicas são fortemente dependentes da temperatura, do peso molecular e da umidade relativa.



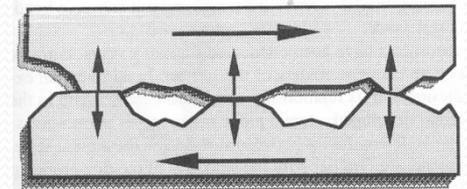
*COEFICIENTE DE ATRITO NOS
TRIBOSSISTEMAS COM
POLÍMEROS*

TEORIAS DE ATRITO

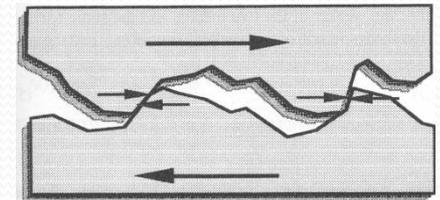
Modelo de Bowden e Tabor (1951)

$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{def}$$

μ_{adh} - Componente de adesão entre as asperezas.

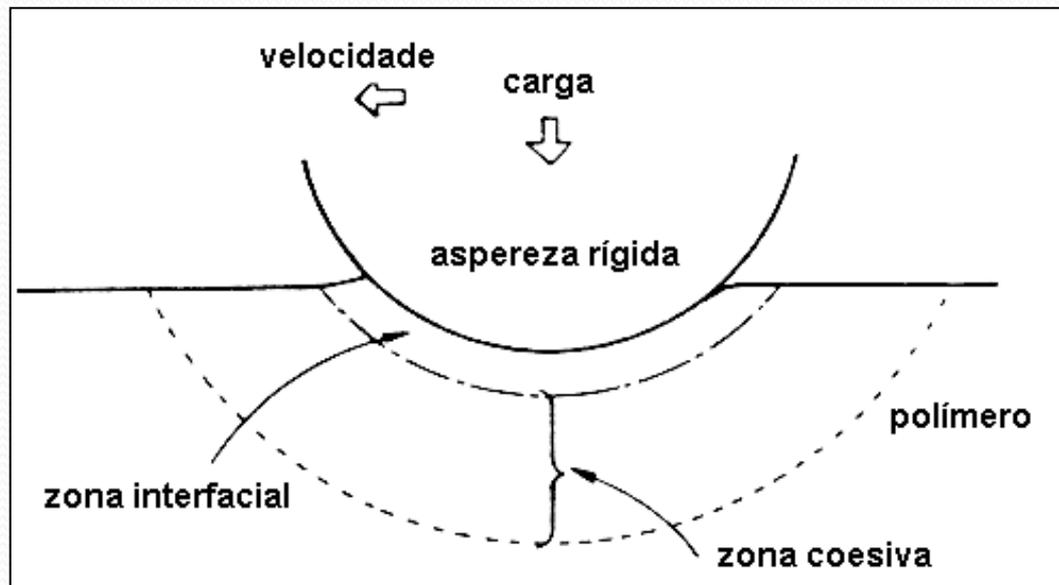


μ_{def} - Componente de sulcamento na superfície de menor dureza pelas asperezas da superfície de maior dureza.



➤ Dissipação de energia (Briscoe)

- Zona interfacial (relacionada à fenômenos adesivos – inferior a **10 nm**)
- Zona Coesiva (relacionada à deformações volumosas – **bulk**)

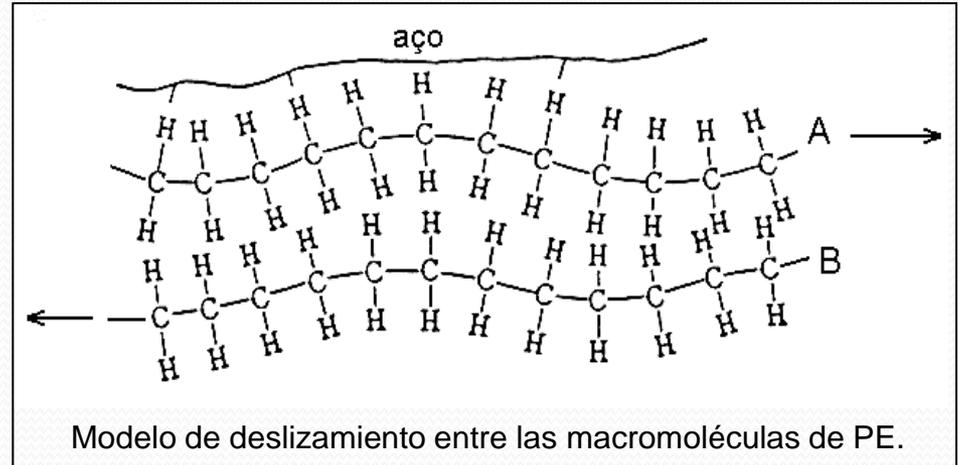


BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. *Tribology International*, p.231-243, 1981

COEFICIENTE DE ATRITO

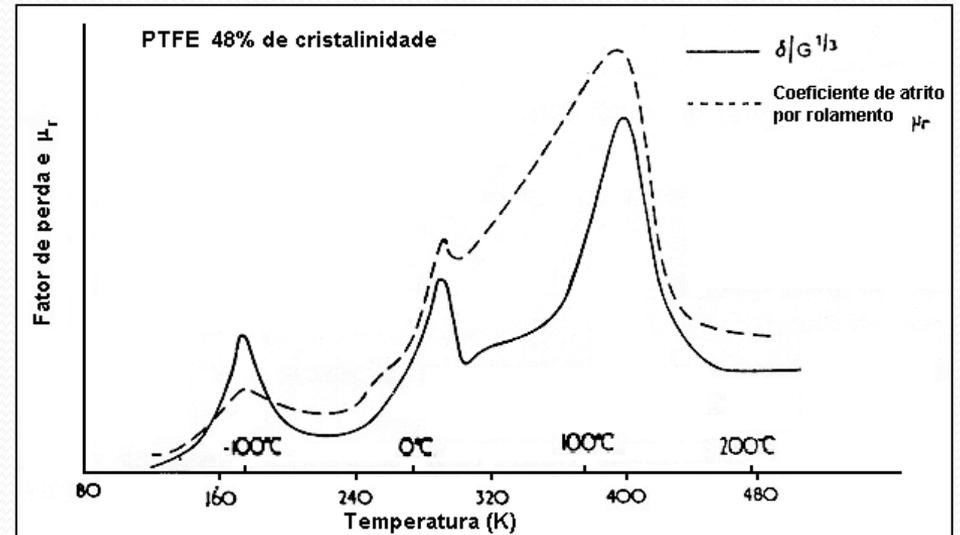
- Zona Interfacial (adesão)

- Ligações fracas
- Acabamento superficial
- Cadeias ramificadas
- Energia de superfície



- Zona Coesiva (deformação)

- Velocidade de deslizamento
- Rugosidade
- Propriedades Mecânicas
- Propriedades Viscoelásticas

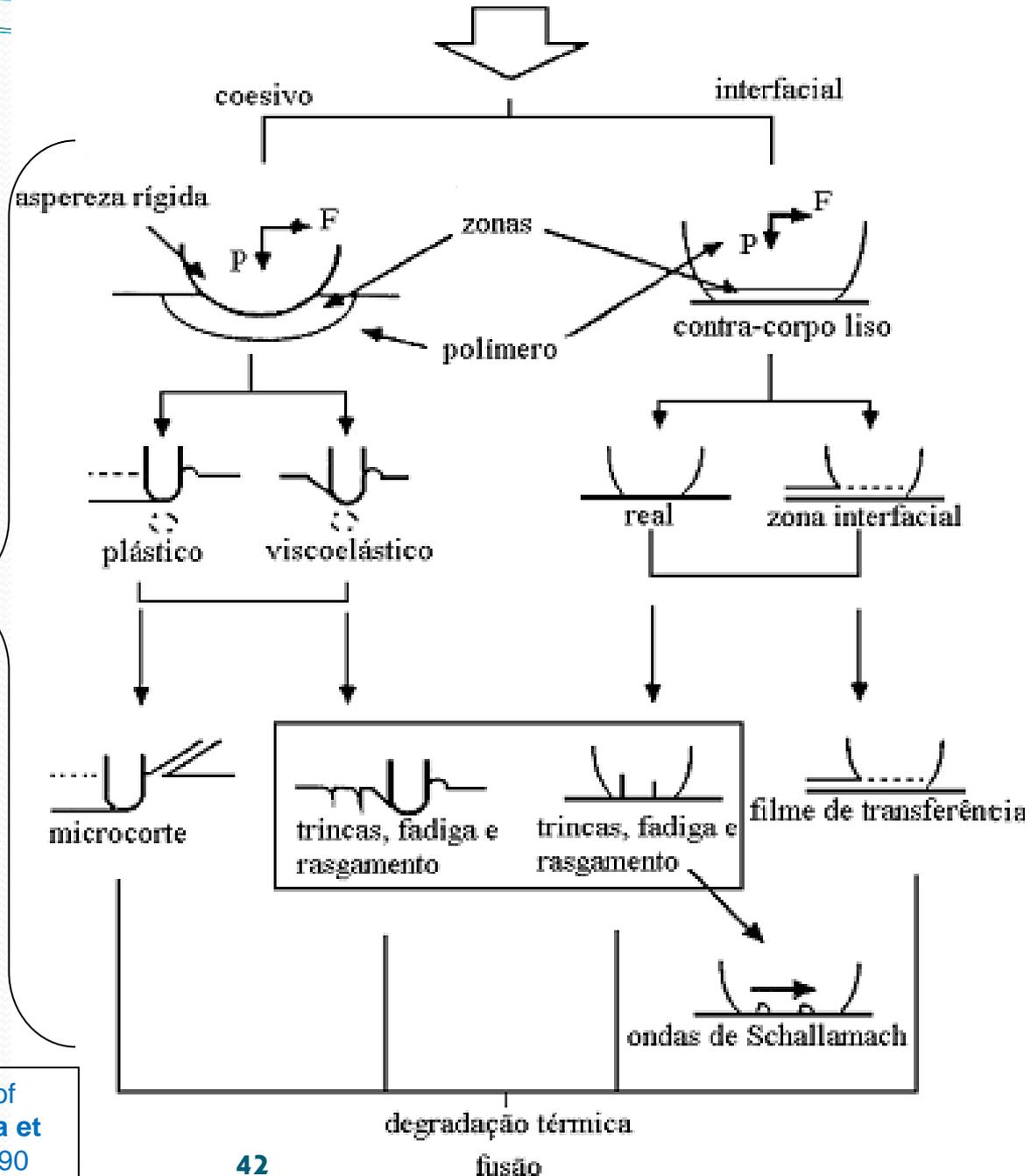


⇒ **Temperatura** ⇐

MECANISMOS DE DESGASTE DE POLÍMEROS

DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

- Zona Coesiva
- Zona Interfacial



Descrição dos mecanismos de dissipação de energia no deslizamento de um polímero contra um contra-corpo rígido.

BRISCOE, B.J. Material aspects of polymer wear. *Scripta Metallurgica et Materialia*. Vol. 24, p. 839-844, 1990

• PROCESSOS INTERFACIAIS

- Adesão / Transferência de filme
 - Transferência 'Normal'
 - Transferência Lamelar
 - Transferência por Fusão

⇒ Os termofixos, por exemplo, não formam filmes de transferência, mas seu desgaste ocorre por processos de fadiga e abrasão, além da degradação térmica.

STACHOWIAK, G. W & BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, 2a Edição, Butterworth-Heinemann, 2001

BRISCOE, B.J. Material aspects of polymer wear. **Scripta Metallurgica et Materialia**. Vol. 24 (1990) p. 839-844

HUTCHINGS, I. M. **TRIBOLOGY: Friction And Wear of Engineering Materials**. Edward Arnold (1992)., p.51-57

SILVA, C. H. ; Tanaka, D. K. ; SINATORA, A. Mecanismos de desgaste do HDPE. 53º Congresso Anual da ABM, 1998,

• PROCESSOS COESIVOS

- Fadiga
 - Altas deformações
 - Altas tensões
- Deformação Plástica + Macrocisalhamento
- Micromecanismos de abrasão
 - *Microsulcamento, Microcorte e Microfadiga*

STACHOWIAK, G. W & BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, 2a Edição, Butterworth-Heinemann, 2001

HUTCHINGS, I. M. **TRIBOLOGY: Friction And Wear of Engineering Materials**. Edward Arnold (1992), p.51-57

BRISCOE, B.J. Material aspects of polymer wear. **Scripta Metallurgica et Materialia**. Vol. 24 (1990) p. 839-844

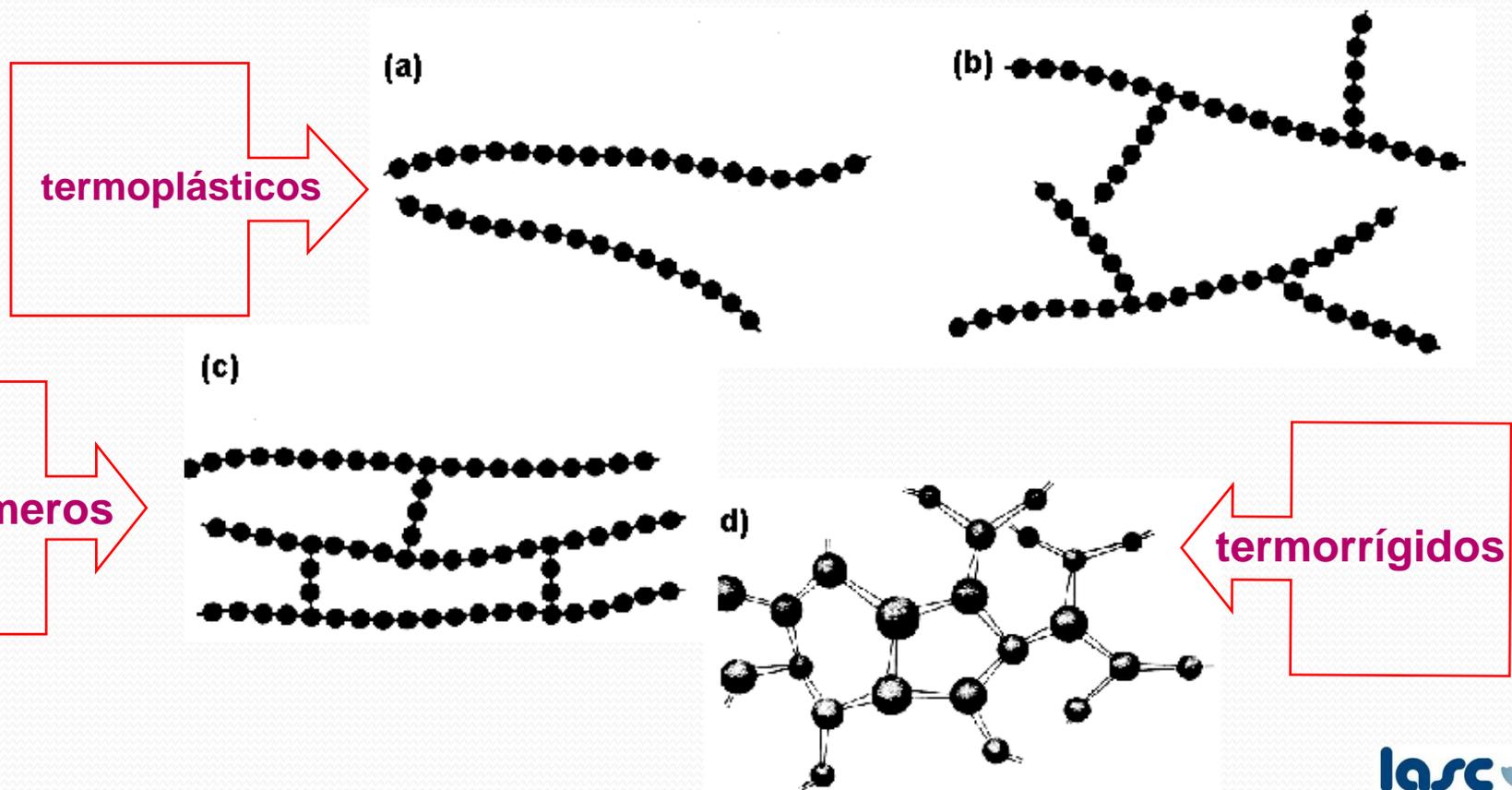
SILVA, C. H. ; Tanaka, D. K. ; SINATORA, A. Mecanismos de desgaste do HDPE. 53º Congresso Anual da ABM, 1998,

*TRIBOLOGIA DE BORRACHA /
ELASTÔMERO*

Classificação - Macromoléculas

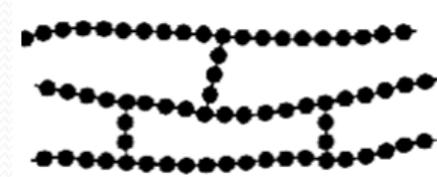
- Tipo de ligações atômicas

- lineares (a)
- ramificados (b)
- c/ ligações cruzadas (c)
- em rede (d)



MACROMOLÉCULAS + LIGAÇÕES

Elastômeros ou Borrachas



Poli-Isopreno: Borracha natural

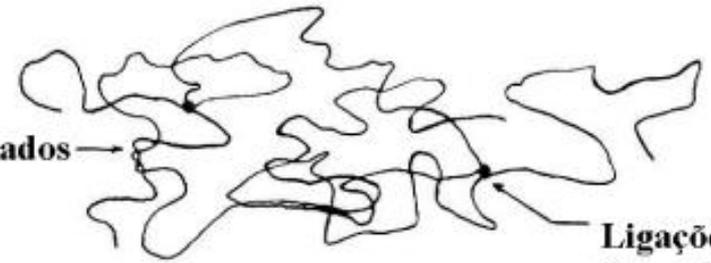
(Processo de Vulcanização)

Adição de enxofre (S) e peróxidos

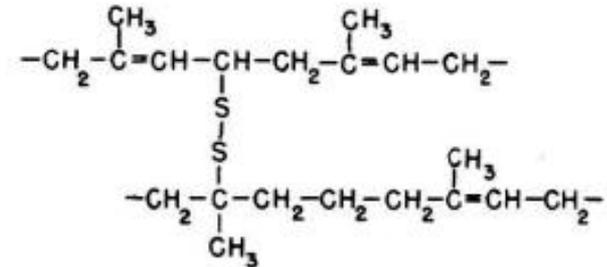
(Crosslink)

Efeito nas propriedades de Fluência, Dureza e Módulo de Elasticidade

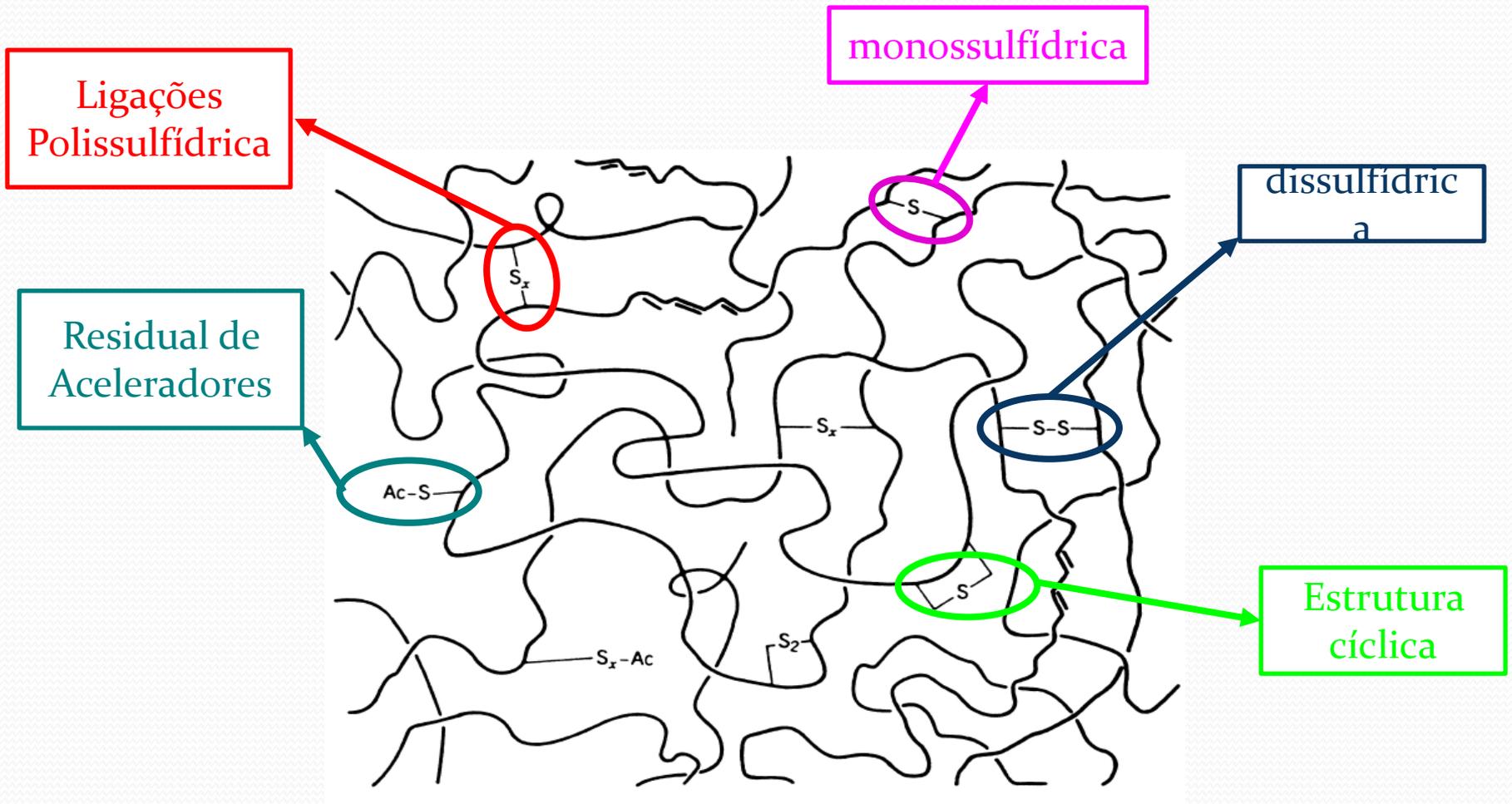
Emaranhados



Ligações Cruzadas



Macromoléculas + Ligações + Envelhecimento

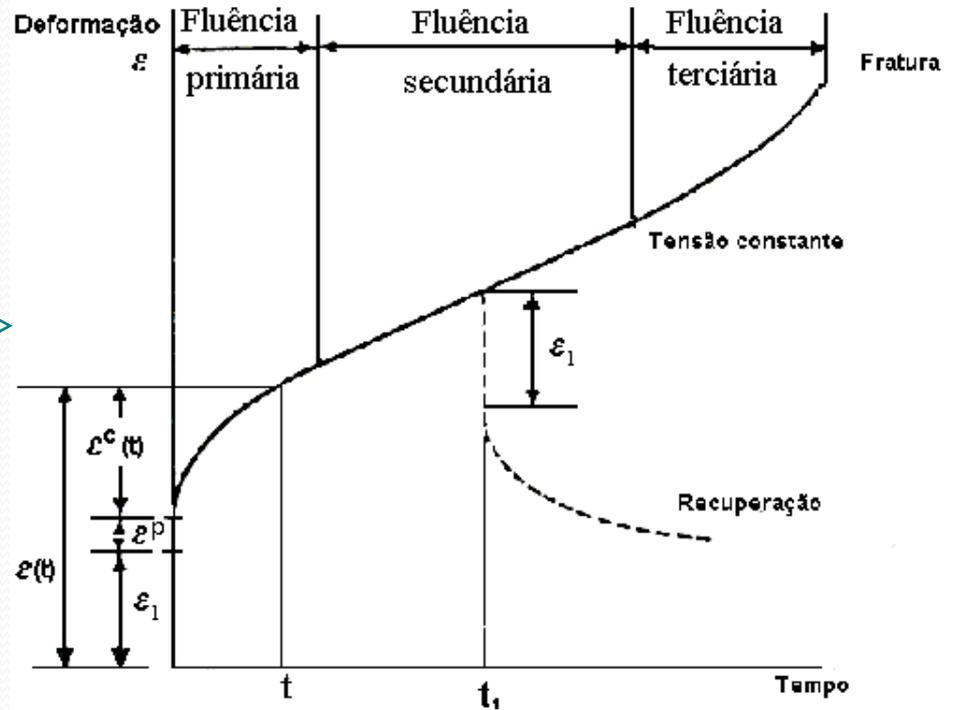
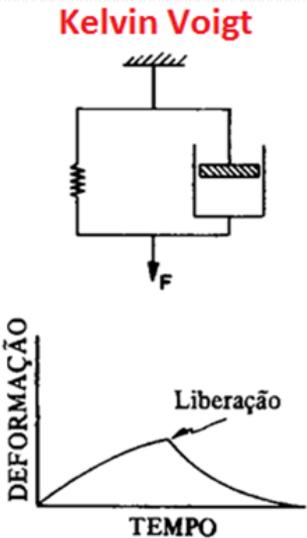
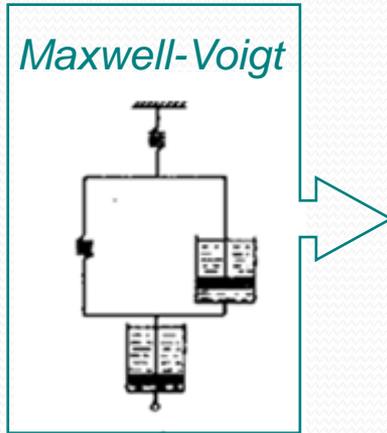
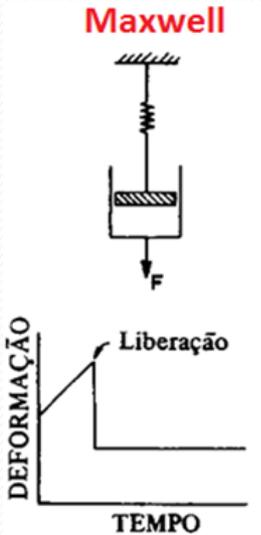
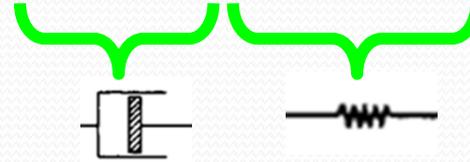


- *Possibilidade de envelhecimento*

MARK; ERMAN e ERICH (2005)

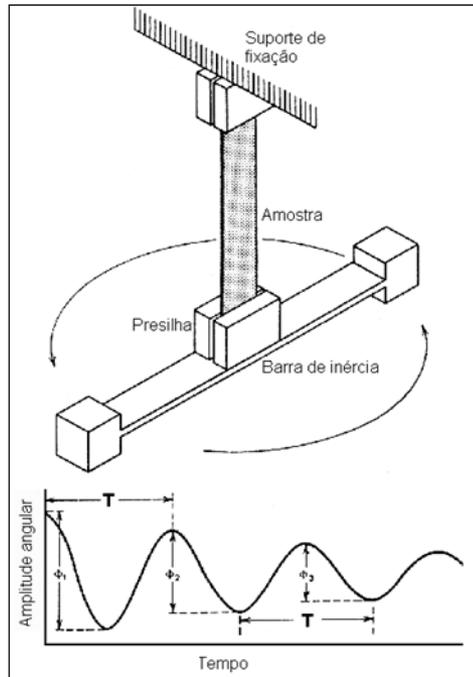
- Ozônio, Oxidação, Luz (UV), Carregamento Mecânico,...

Comportamento Viscoelástico

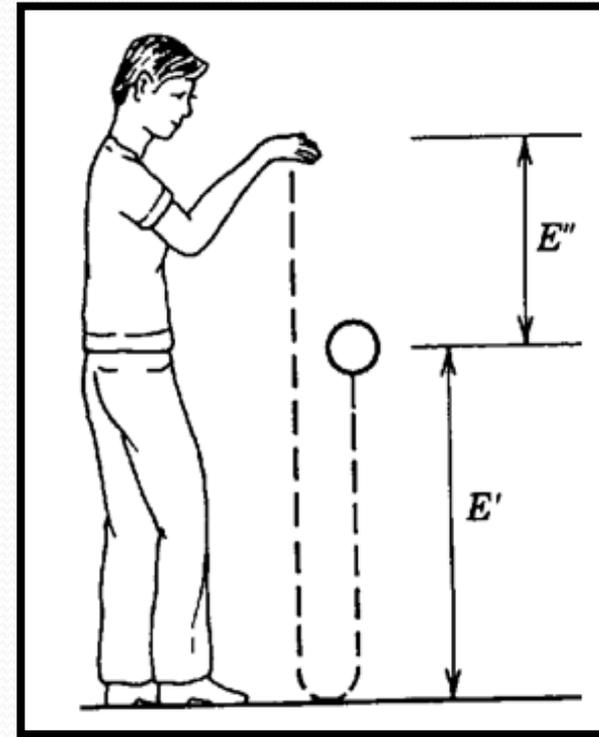


CALCOTE, L. R. INTRODUCTION TO CONTINUUM MECHANICS.
Princeton, D. Van Nostrand Company, Inc.

Comportamento Dinâmico-Mecânico



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



$$E' = \sigma' / \varepsilon_0 = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cdot \cos \delta = E^* \cdot \cos \delta \quad (\text{módulo de armazenamento})$$

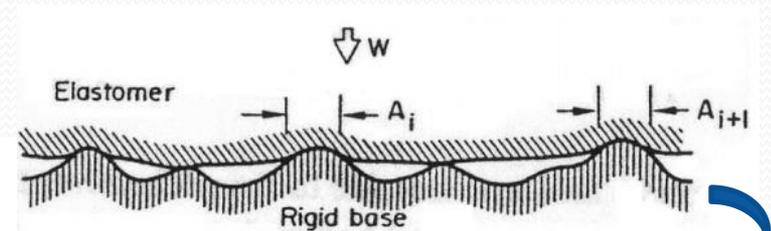
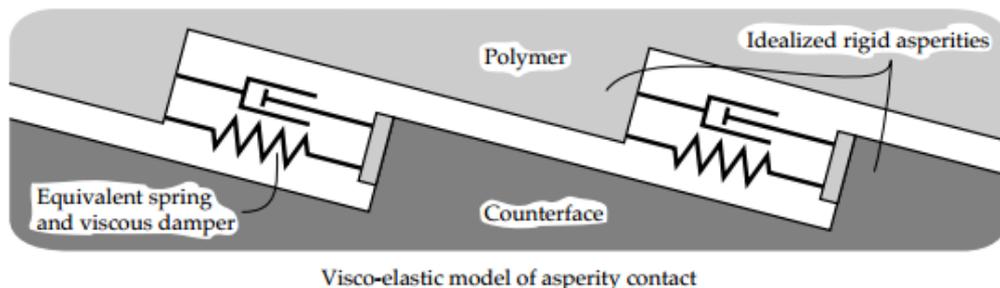
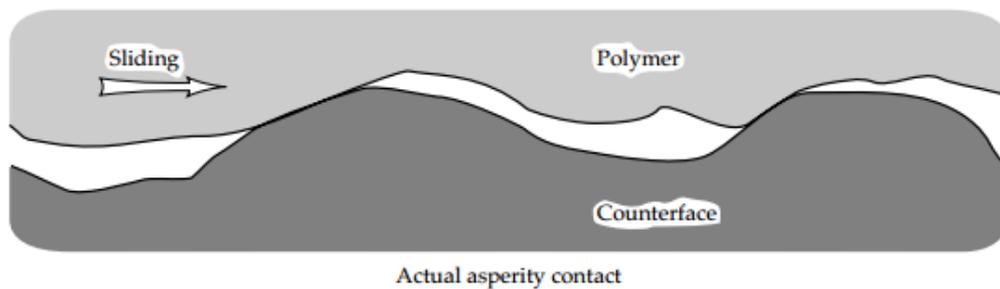
$$E'' = \sigma'' / \varepsilon_0 = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cdot \sin \delta = E^* \cdot \sin \delta \quad (\text{módulo de perda})$$

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

Tribologia

- Atrito e Desgaste

- *Combinação de baixo desgaste e alto atrito*
- *Elastômero = Sólido Amorfo*
- *Baixo módulo de elasticidade X elevada deformação*
- *Conduz á um comportamento no contato das asperezas muito diferente dos demais materiais*
- *Área de contato real muito elevada*



D. F. Moore, *The Friction and Lubrication of Elastomers*, (Pergamon Press, Oxford, 1972).

STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 2013

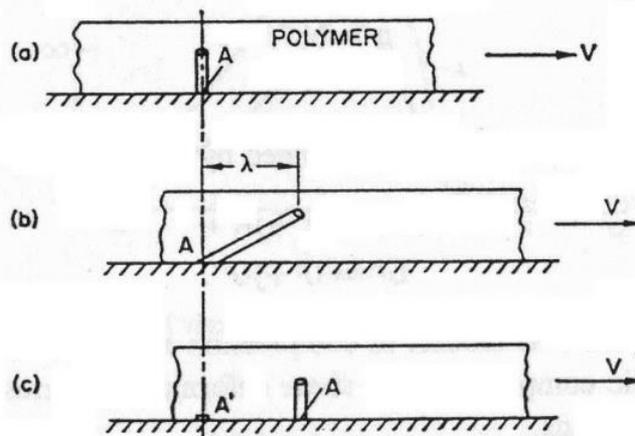
$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{def}$$

$$\mu_{adh} = B\Phi' \frac{E}{p^r} \tan(\delta)$$

E : módulo elástico (Modelo Voigt)
 B : constante de proporcionalidade
 r : expoente menor que 1
 p : pressão de contato
 Φ : habilidade de gerar adesão

$$\mu_{hyst} = 4C\gamma \left(\frac{p}{E}\right)^n \tan(\delta)$$

E : módulo elástico (Modelo Voigt)
 C : parâmetro de forma das asperezas
 n : parâmetro de forma das asperezas
 γ : fator de empacotamento (número de contatos)
 p : pressão de contato



Adhesion, (a) the adhesion junction is formed, (b) the shear strength holds the adhesive junction imposing a deformation on the rubber material, (c) adhesive junction broken (MOORE, 1975)

Asperity Shape	C	n
Sphere	$\frac{81\pi^5}{2048} (1 - \nu^2)^4$	3
Cylinder	$\frac{256\sqrt{2}}{3\pi^3} \left(\frac{L}{R}\right) (1 - \nu^2)^3$	2
Cone	$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} (1 - \nu^2)^{9/2} \left(\frac{W}{ER^2}\right)^{3/2} \left(\frac{\omega_0}{Z_0}\right) \left(\frac{R}{\epsilon}\right)^{15/2}$	2

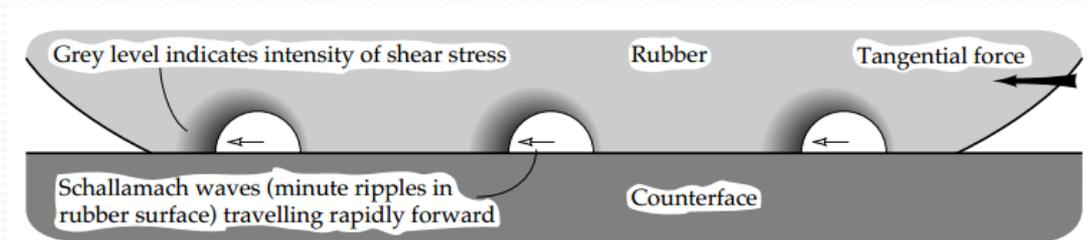
REFERENCE: Budinski, K. G., "Friction in Machine Design." Tribological Modeling for Mechanical Designers, ASTM STP 1105, K. C. Ludema and R. G. Bayer, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991.

Table 4 - Coefficient of friction of elastomers vs 440C stainless steel

Material	Shore Durometer	Static Coefficient Of Friction	Kinetic Coefficient Of Friction
Hypalon	82A	0.71	0.81
Neoprene	55A	1.22	1.46
Butyl Rubber	65A	1.58	2.27
Viton A	81A	0.93	0.83
Isoprene Rubber	40A	2.30	2.50
EPDM	65A	2.90	2.70
Nitrile Rubber	50A	3.20	3.30
Polyurethane	40A	0.89	1.10
Polyurethane	60A	0.66	0.65
Polyurethane	90A	0.64	0.73
Polyurethane	55D	0.27	0.27
Polyurethane	75D	0.12	0.14
Silicone (RTV-700)	30A	1.00	0.97
RTV-60	60A	1.40	1.20
RTV-631	70A	1.00	1.10
RTV-630	77A	1.20	1.20

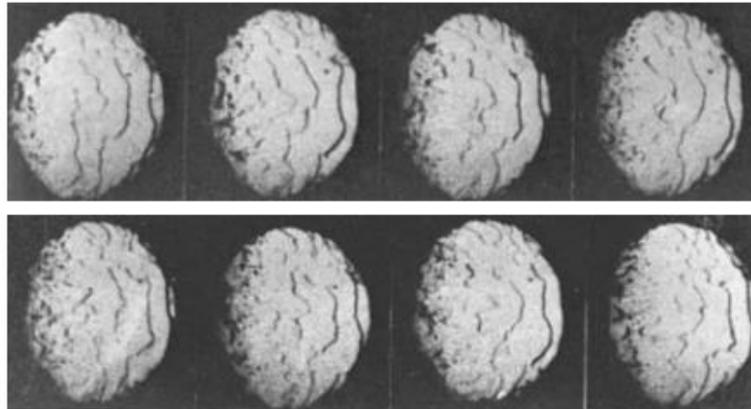
- **Mecanismo de desgaste**

- *Elevada deformação tangencial sem causar desgaste*
- *Forte adesão por ação de ligações de Van der Waals*
- *Evidente processo de fadiga*



STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A., Engineering Tribology, Butterworth-Heinemann, 2013

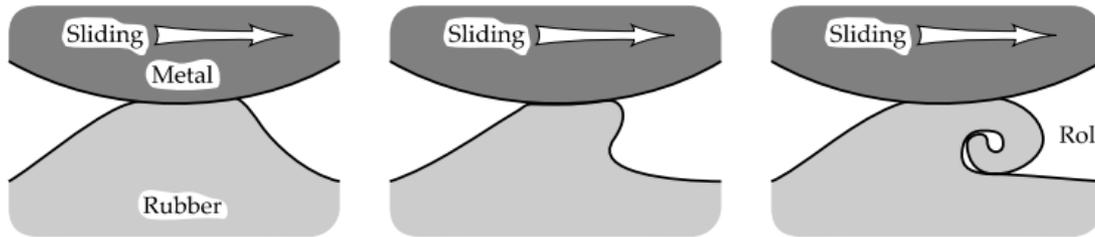
- *As ondas se movimentam com velocidades muito mais altas que a velocidade relativa entre os corpos: até 35 vezes maior para 0,2 mm/s*



A. SCHALLAMACH, How does Rubber Slide?, Wear, Vol. 17, 1971, pp. 301-312

Schallamach waves generated between a rubber sphere and a perspex plate at a sliding speed of 0.43 [mm/s] [31].

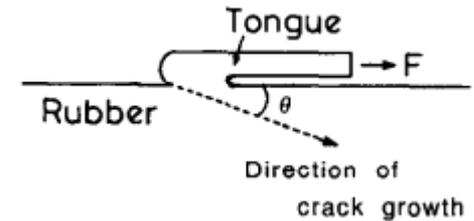
● *Mecanismo Particular de materiais com elevada elasticidade*



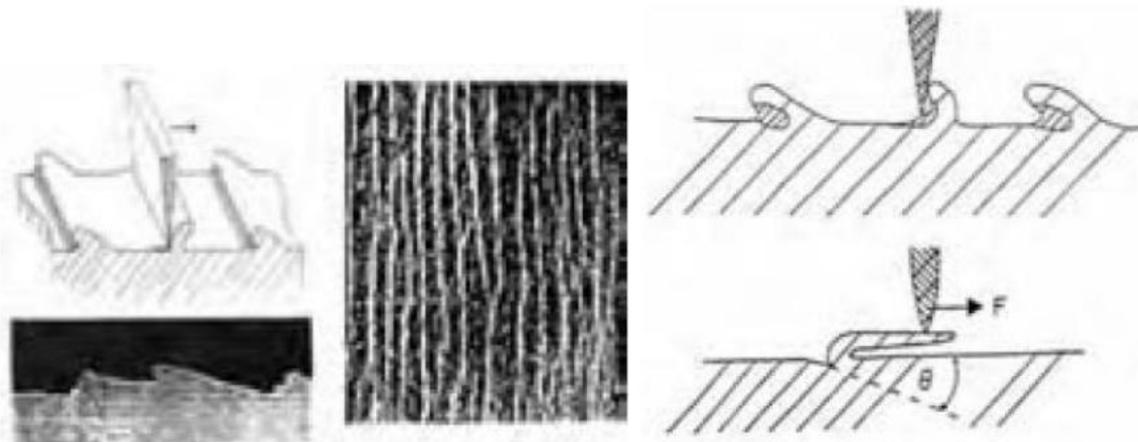
Mechanism of 'roll formation' on rubber surfaces.

STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 2013

Model of a single ridge subjected to a frictional force F



Y. Fukahori, H. Yamazaki / *Wear* 188 (1995) 19-26



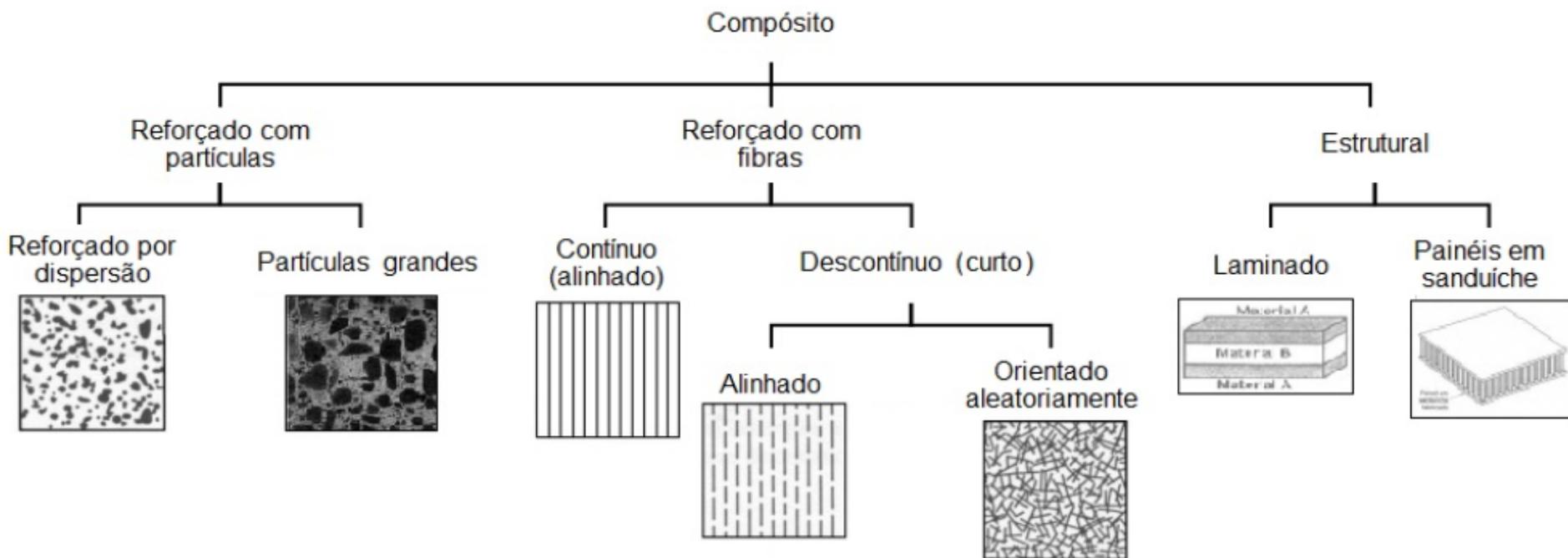
Esquema de uma lâmina deslizando sobre uma borracha demonstrando que o sentido de inclinação das ondas é contrário ao sentido de deslocamento do abrasivo. GENT (2006).

GENT, A. N. Mechanical Properties of Rubber. In: GENT, A. N.; WALTER, J. D. *The pneumatic tire*. Akron (Ohio, Estados Unidos), 2006. p. 28-76.

*TRIBOLOGIA DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS*

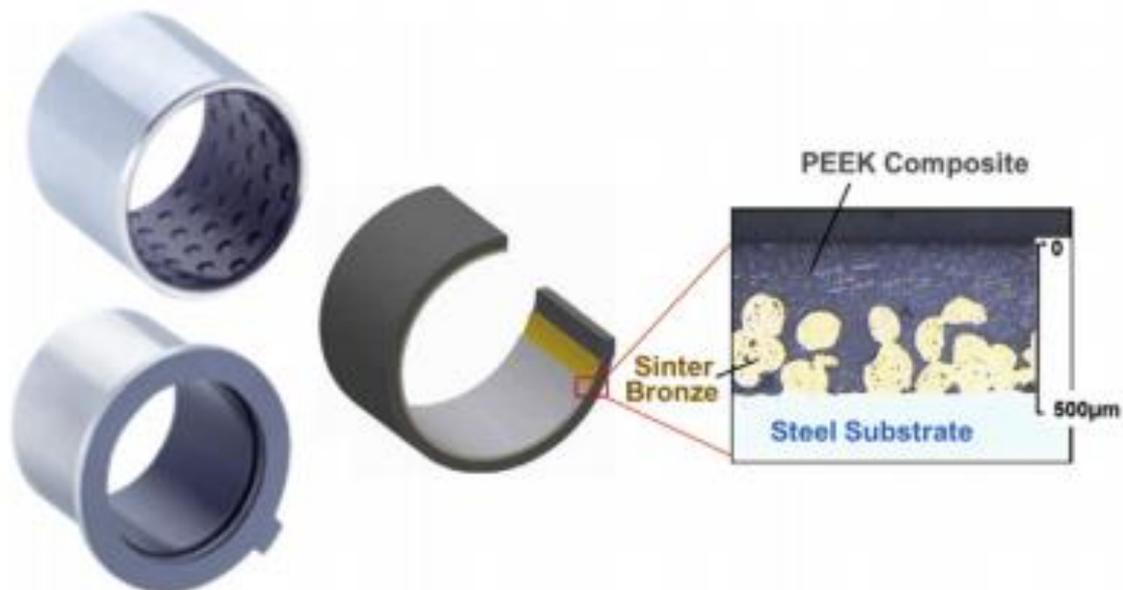
TRIBOLOGIA DE COMPÓSITOS

- Combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, com o objetivo de formar um composto de engenharia útil com certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente.
- Compósitos poliméricos: matriz de polímero + outro(s) material(s)



TRIBOLOGIA DE COMPÓSITOS

- Aplicações



Section through the Composite Material

Top: Polymer (light) and PTFE Fiber Bundles (dark) of the Sliding Layer

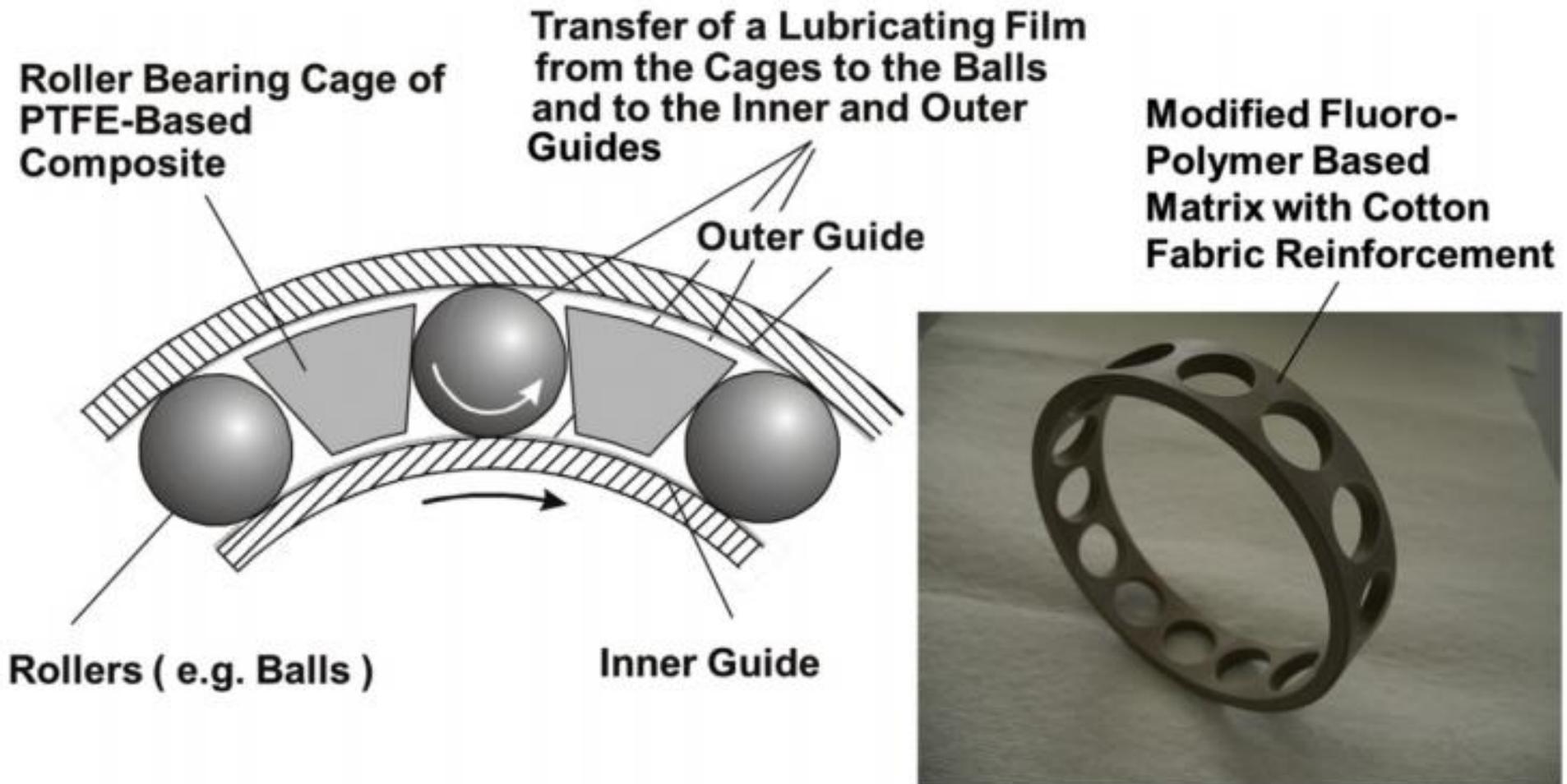
Bottom: Backing Layer Consists of High Strength Glass Fibers.

In both Layers: Fibers are Embedded in an Epoxy Resin Matrix



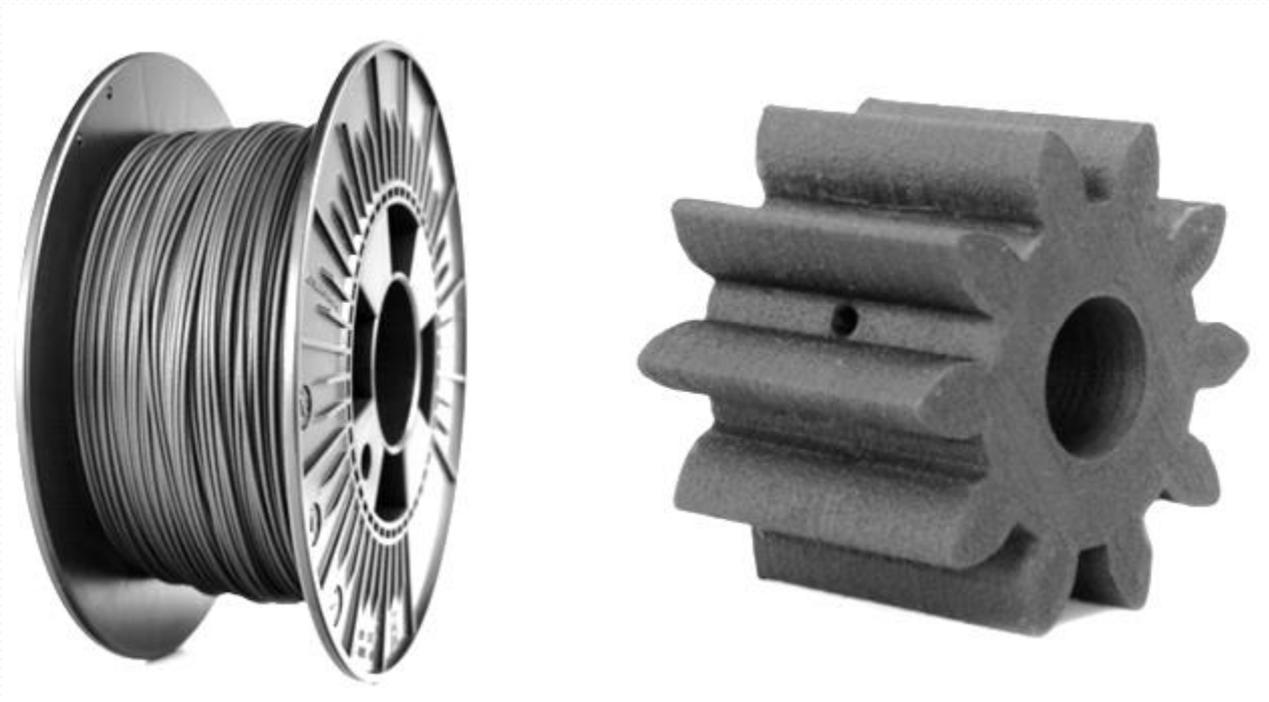
TRIBOLOGIA DE COMPÓSITOS

K. Friedrich / Advanced Industrial and Engineering Polymer Research 1 (2018) 3–39

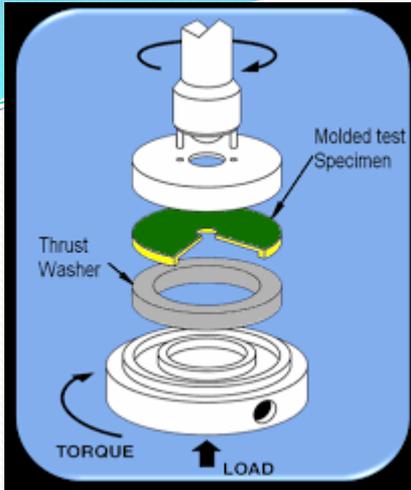


TRIBOLOGIA DE COMPÓSITOS

- Aplicações
 - (PEEK + FV)
 - Técnica de impressão 3D



Tribologia de Compósitos - **Atrito**

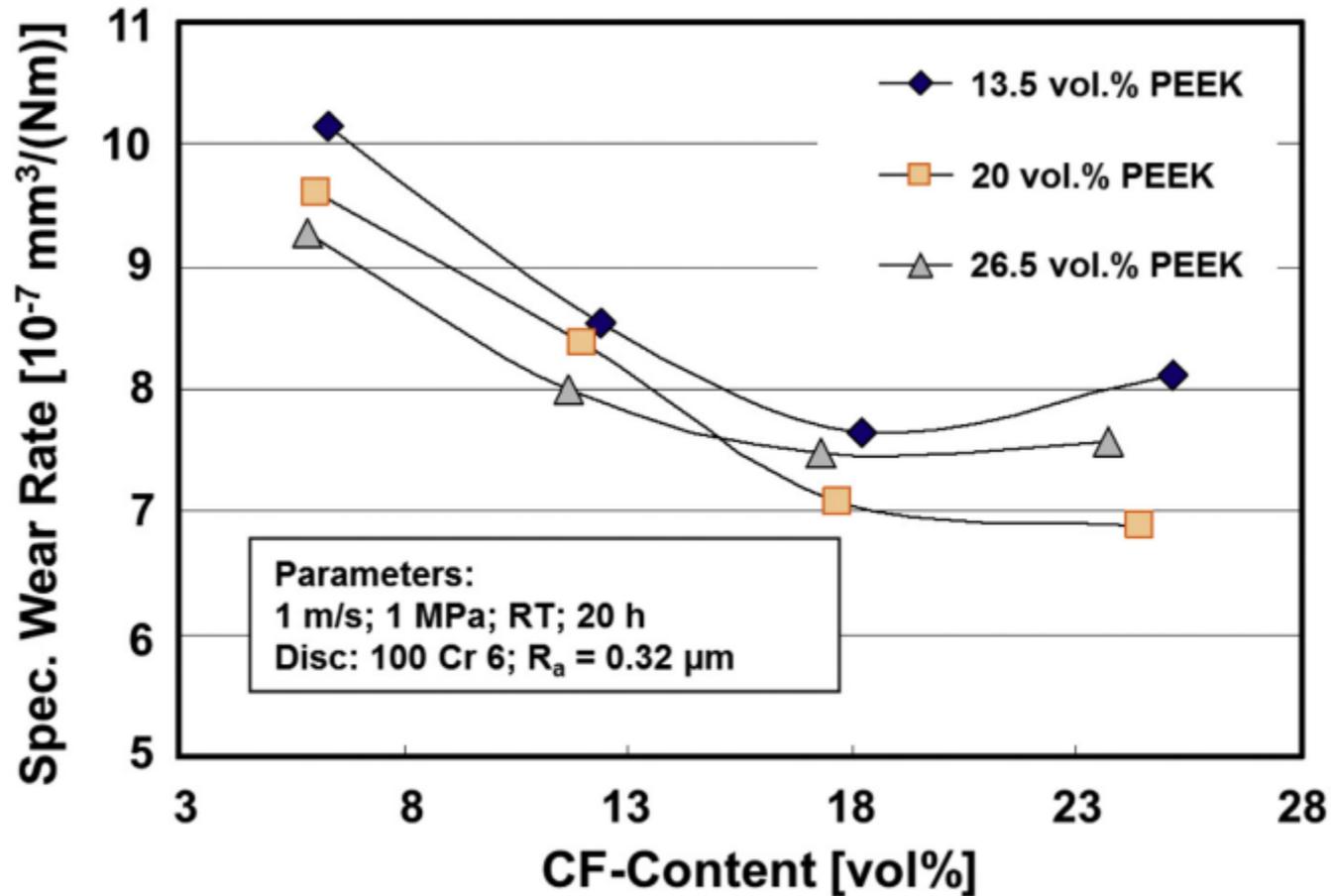


ASTM D3702 method and apparatus at a load of 0,277 N/mm² and 253 mm/s

K. Friedrich / Advanced Industrial and Engineering Polymer Research 1 (2018) 3–39
 Dynamic friction coefficients for some common groups of polymers |

PTFE	0.10	PVC	0.30
PVDF	0.24		
UHMWPE	0.12	HDPE	0.28
UHMWPE, oil filled	0.13	LDPE	0.60
		PP, homo-pol.	0.26
PA 6	0.26	PA 66	0.25
PA 6, oil filled	0.14	PA 66 + 30% GF	0.31
PA 6, wax filled	0.04		
POM, homo-polymer	0.20	POM, co-polymer	0.18
PEEK	0.18	PEEK + 30% Gr	0.30
PEEK + 30% GF	0.31	PEEK + 30% CF	0.22
PSU	0.37	PPO/PS	0.39

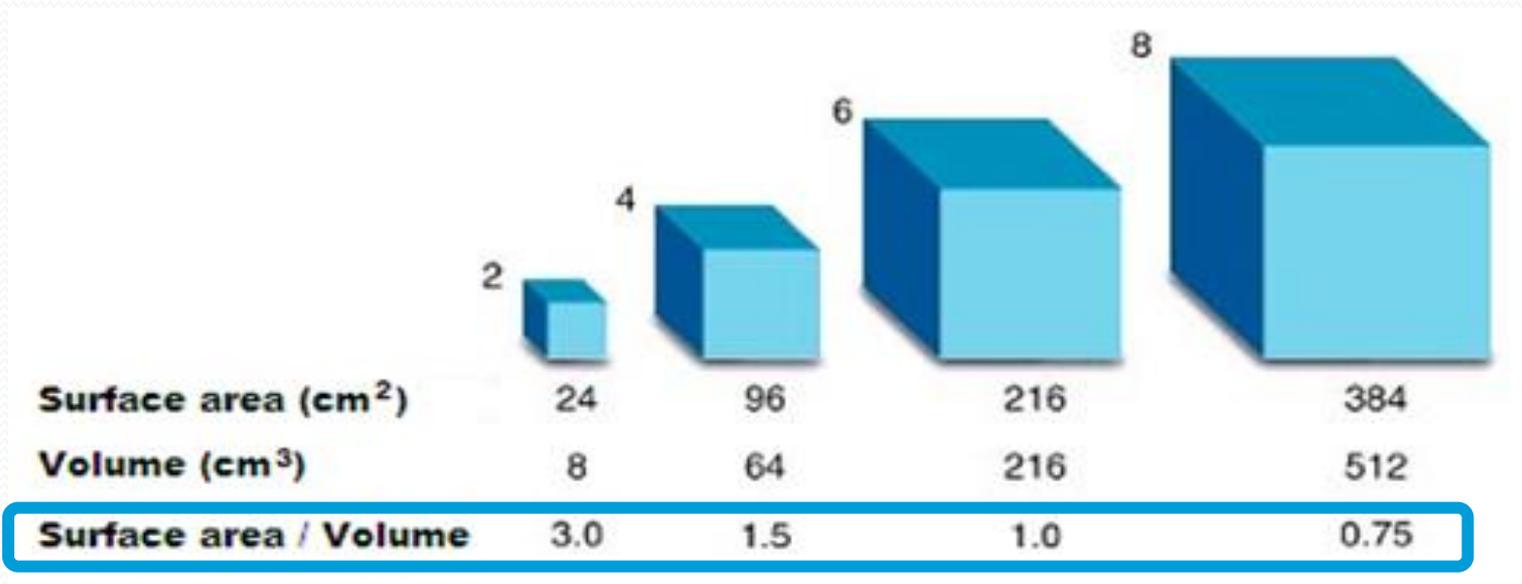
Tribologia de Compósitos - Desgaste



Specific wear rate of PTFE composites as a function of CF content and PEEK particles (value of neat PEEK/PTFE blend = $(6-8) \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$).

nanocompósitos

- Componentes com alta razão área/volume



*COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
COMERCIAIS: Estudo de Caso*



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group



Tribology
Transactions

Effect of Graphite and Bronze Fillers on PTFE Tribological Behavior: A Commercial Materials Evaluation

Caio Augusto Garcia Sampaio Valente , Felipe Fernando Boutin, Lucas Prado Caetano Rocha, João Luiz do Vale & Carlos Henrique da Silva

Received 04 Jul 2019, Accepted 14 Nov 2019, Accepted author version posted online: 19 Nov 2019, Published online: 27 Dec 2019

UTFPR - LONDRINA

UTFPR - CURITIBA

METODOLOGIA

• TRIBÔMETRO

- Pino ($\phi = 6,35$ mm / PTFE puro ou Compósito) sobre disco (Aço AISI 304)
- Norma ASTM G99 – 95a (2000)

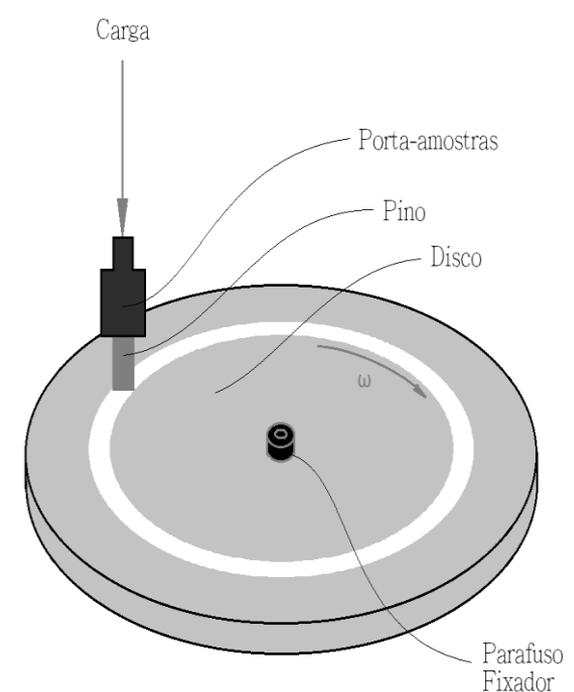
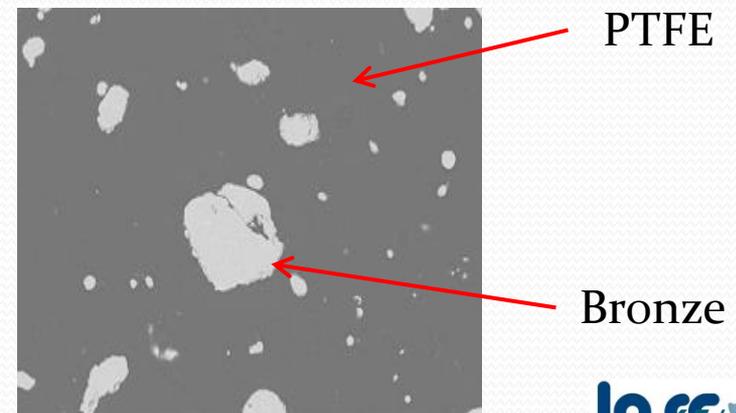
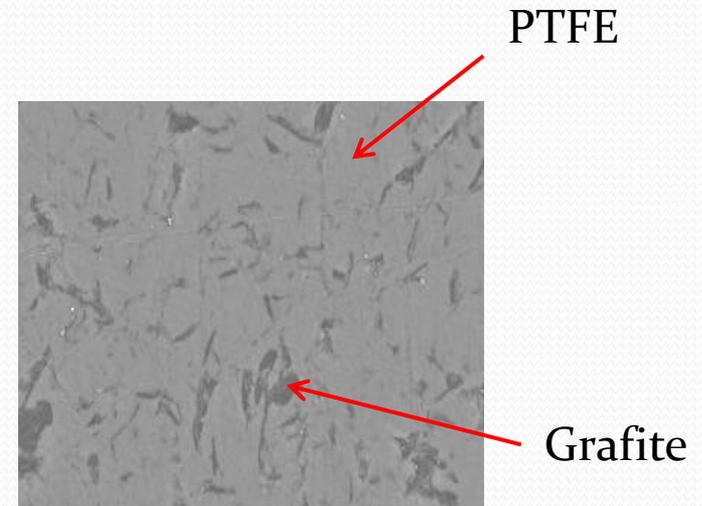


Table 1. Planning of the wear tests.

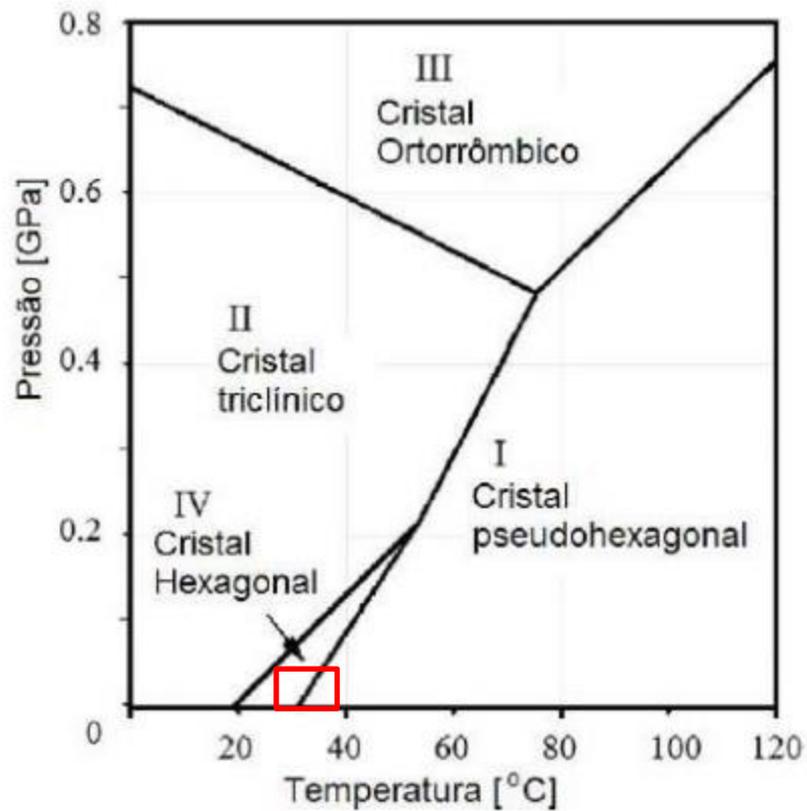
Parameter	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Total sliding distance [m]		500		
PV_{mean} [MPa.m.s ⁻¹]		0.49		
Apparent contact area [mm ²]		31.7		
Repetitions [-]		5		
Normal force [N]	18.4	23.7	28.8	32.0
Mean contact pressure [MPa]	0.58	0.75	0.91	1.01
Disc rotation [rpm]	230.1	208.4	205.8	231.5
Radius of sliding track [mm]	35	30	25	20
Sliding velocity [m.s ⁻¹]	0.84	0.65	0.54	0.48
Testing duration [s]	593	764	928	1031

MATERIAL DOS PINOS

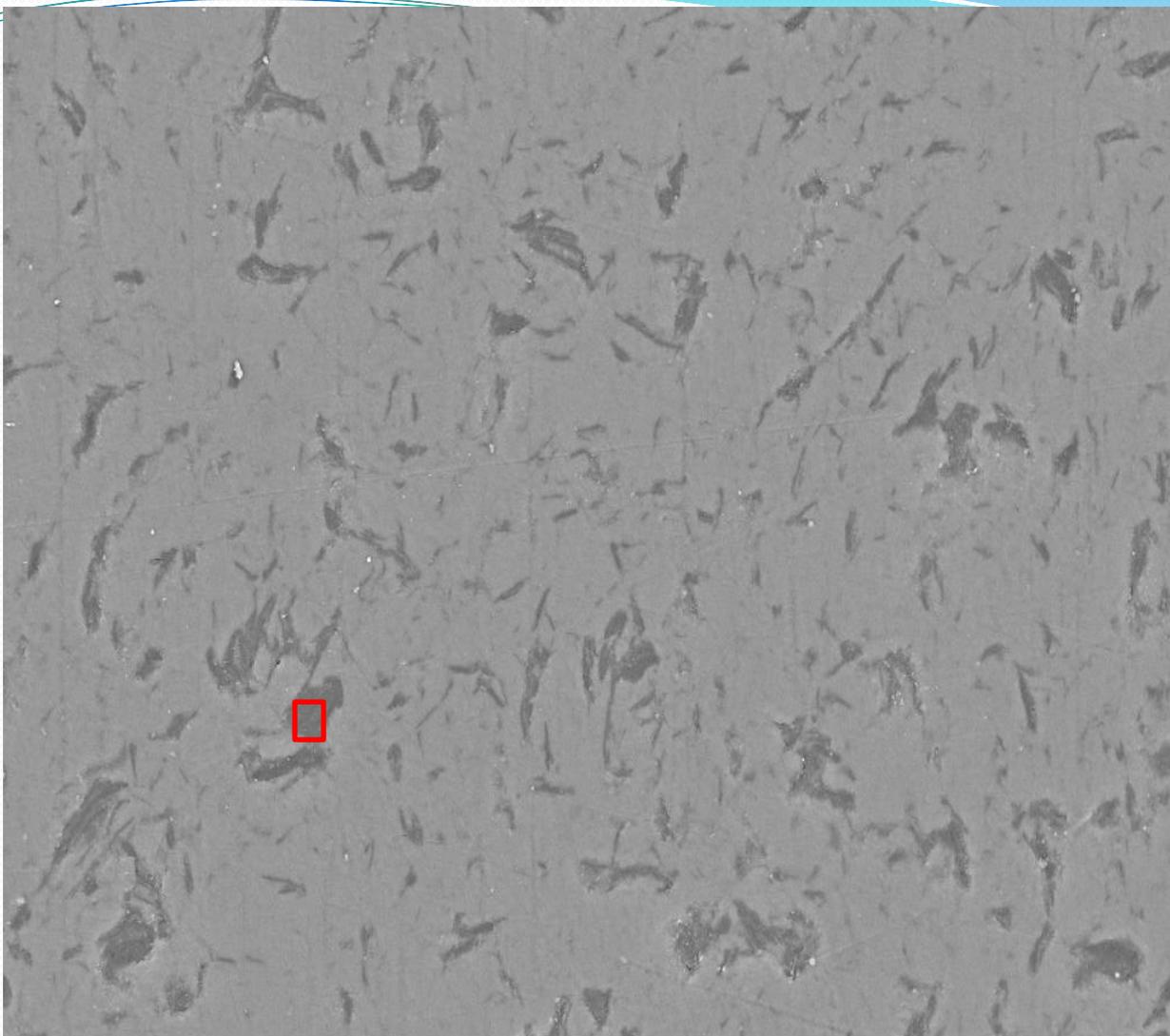
- PTFE PURO
- PTFE + 25% Grafite
 - Distribuição homogênea
 - Partículas lamelares
- PTFE + 40% Bronze
 - Heterogêneo
 - Partículas irregulares



PTFE PURO



PTFE + Grafite



20 μm
┆

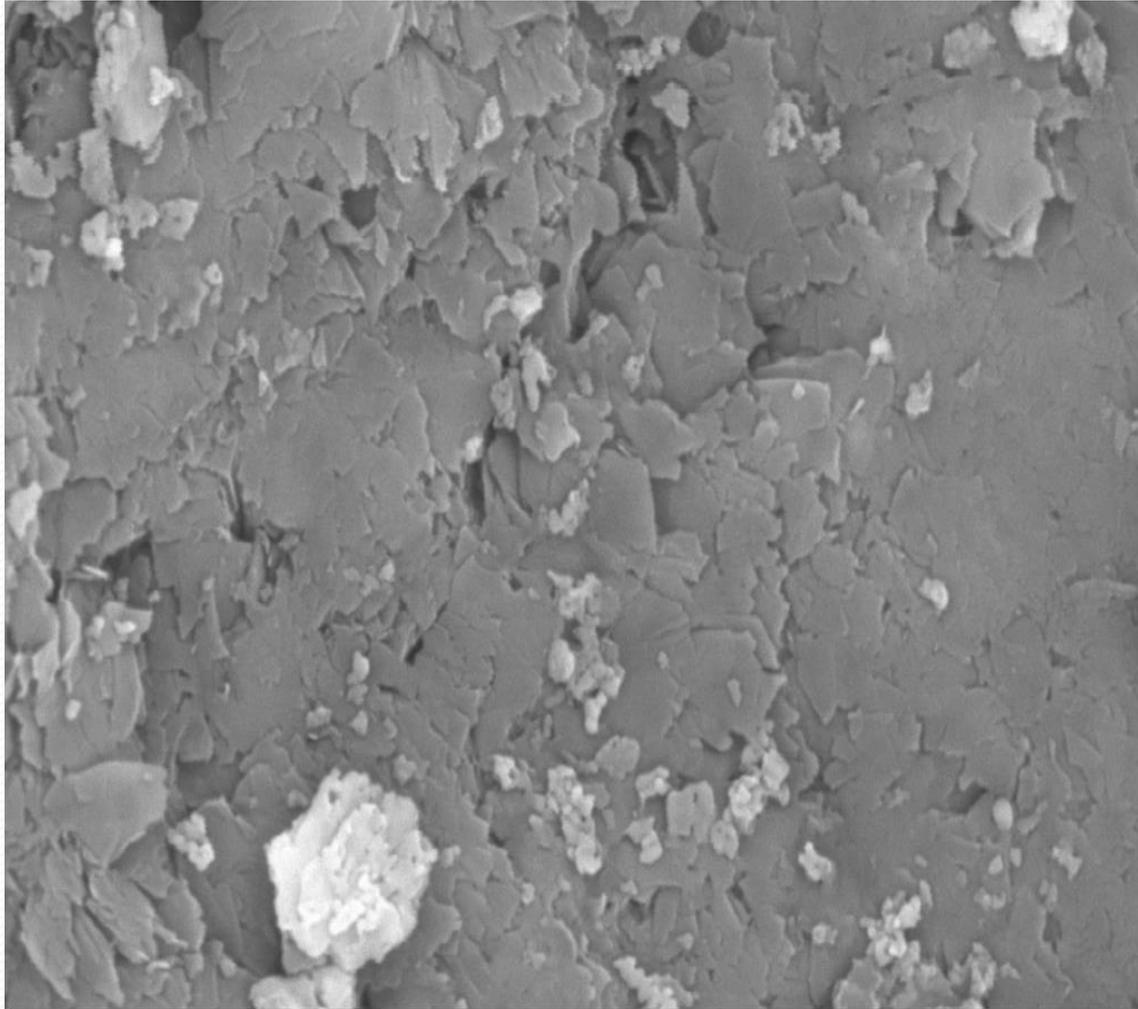
EHT = 20.00 kV
WD = 8.0 mm

Signal A = NTS BSD
Mag = 500 X

Date :14 Sep 2016

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Partícula de Grafite



1 μ m

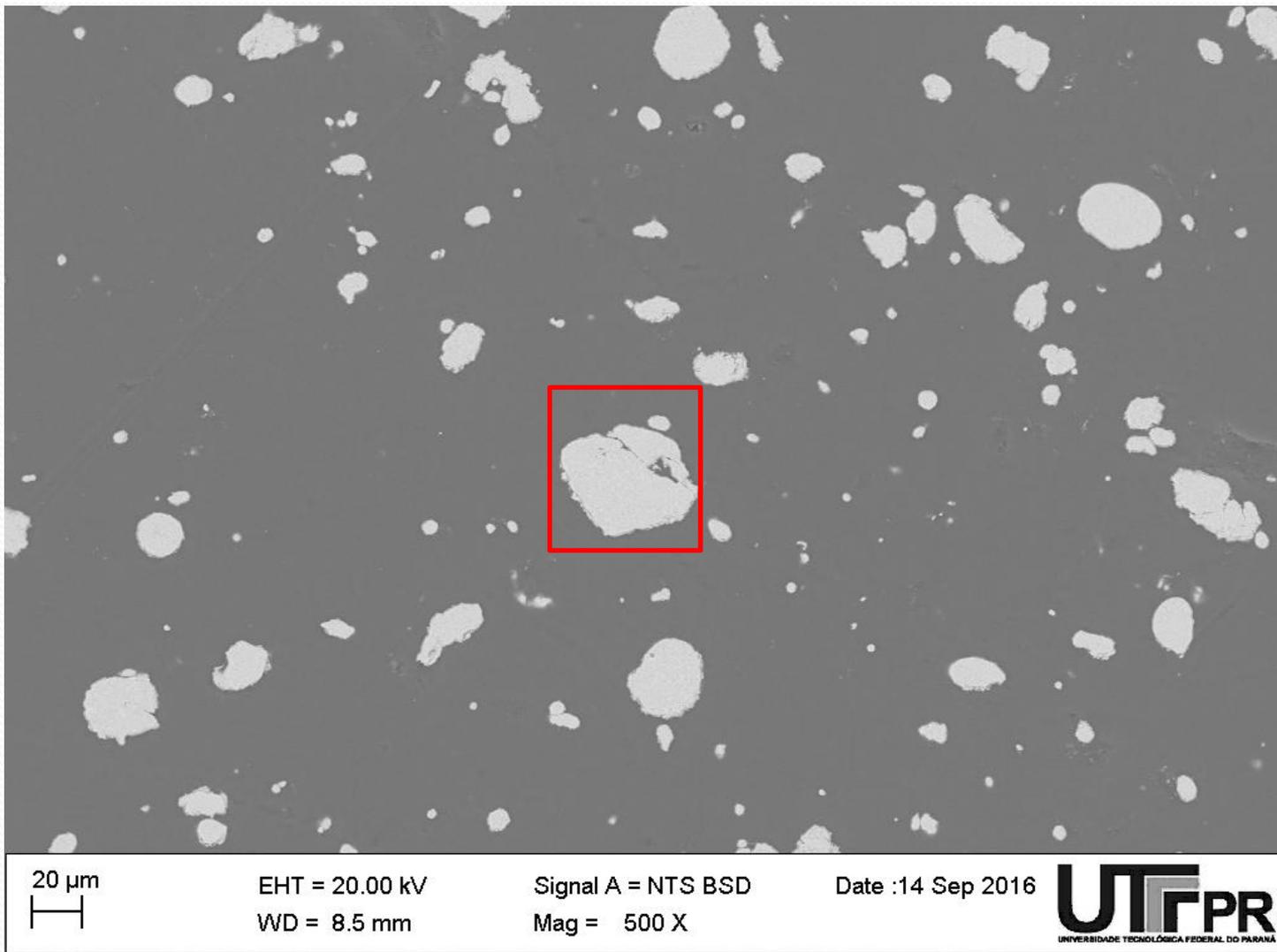
EHT = 20.00 kV
WD = 8.0 mm

Signal A = NTS BSD
Mag = 15.00 K X

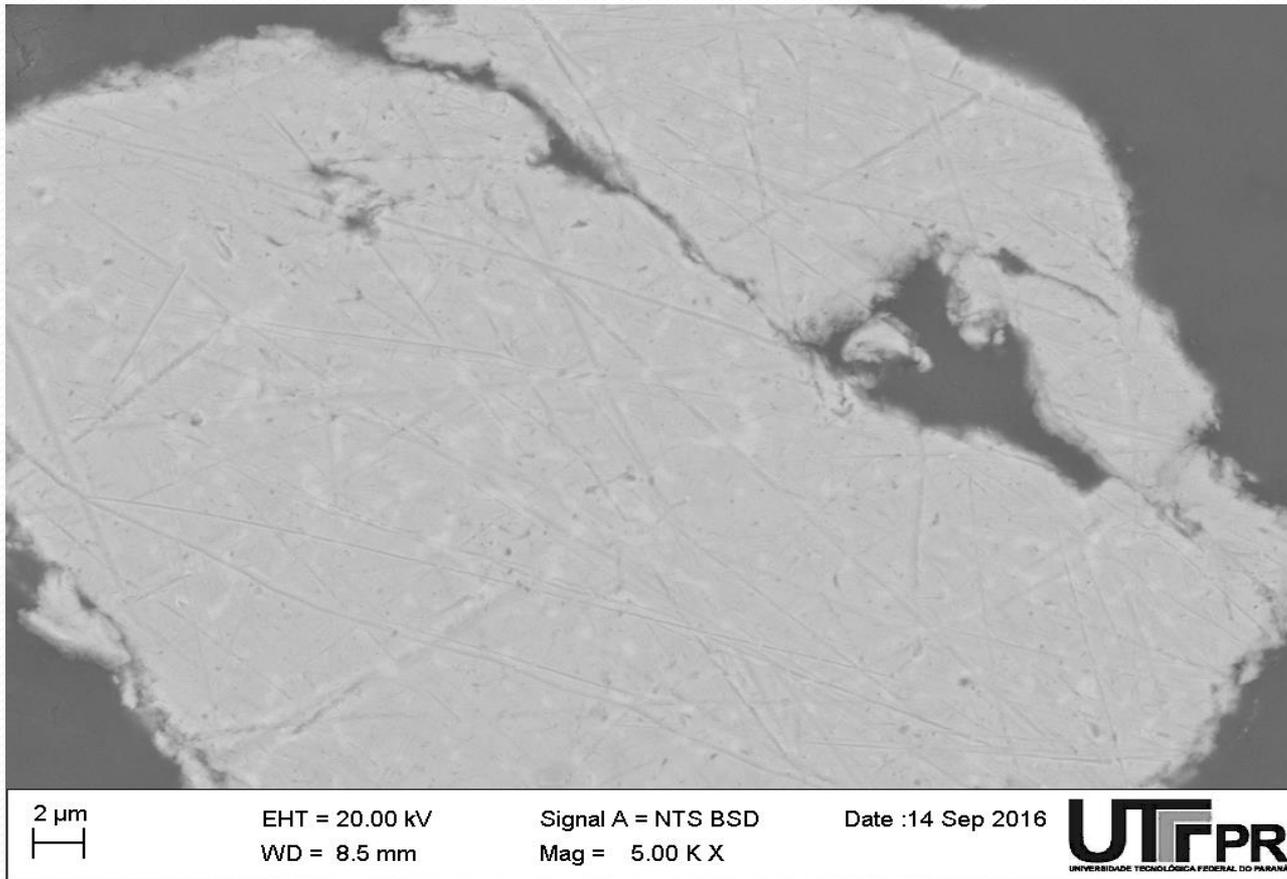
Date :14 Sep 2016

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PTFE + Bronze

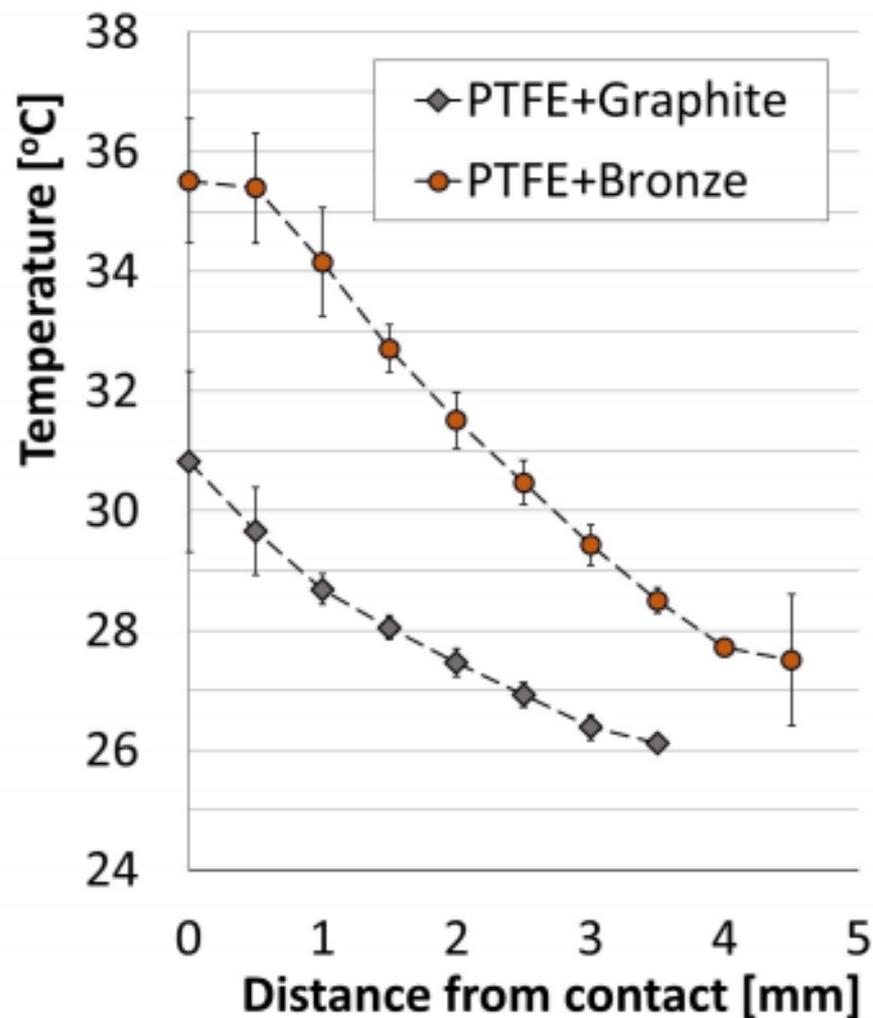
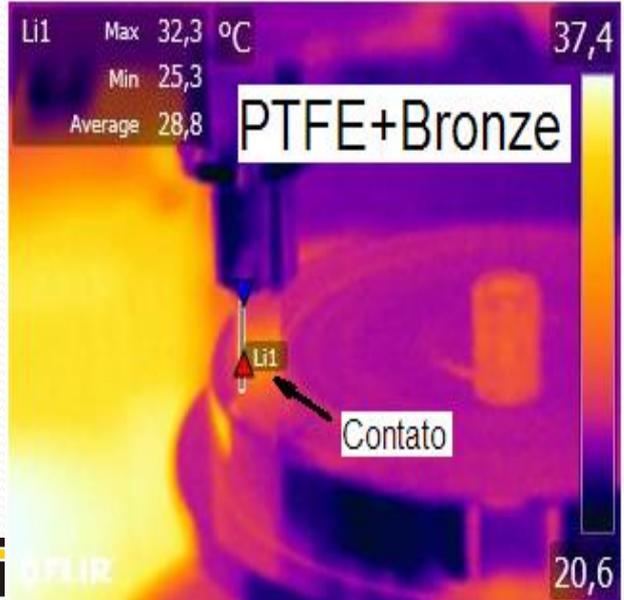
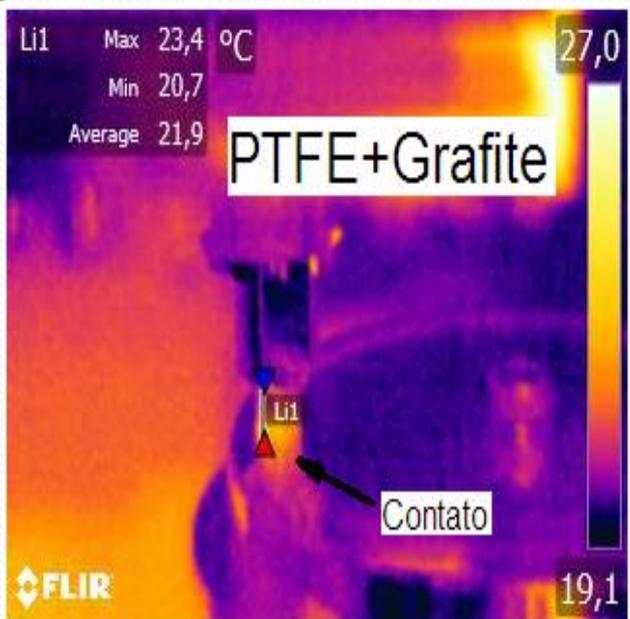


Partícula de Bronze

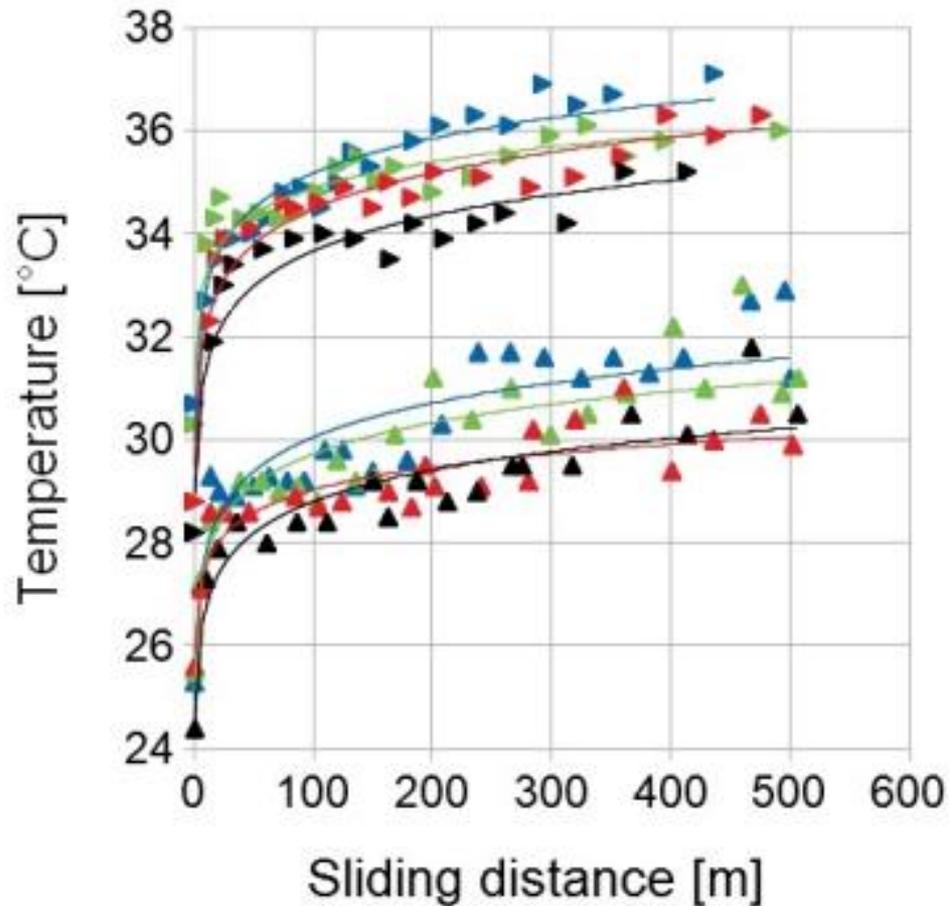


Elemento	Valor medido[%(m/m)]	ABNT C-90500[%(m/m)]
Cu	87,8	86-89
Sn	10,2	9,0-11,0
Zn	2,0	1,0-3,0

RESULTADOS



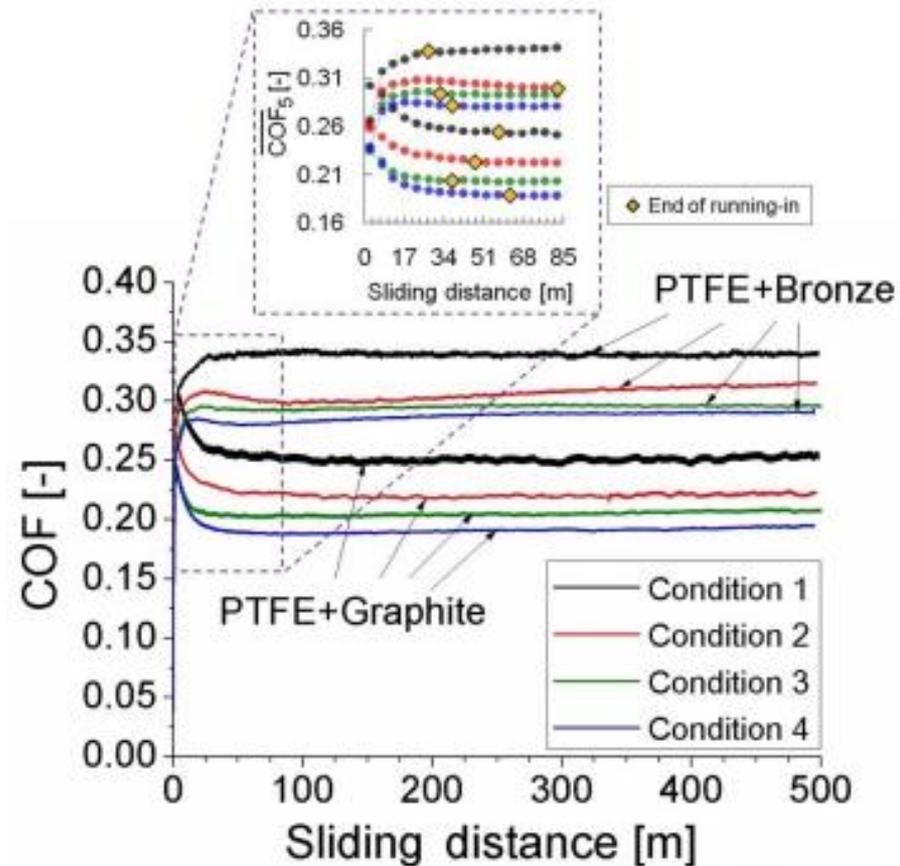
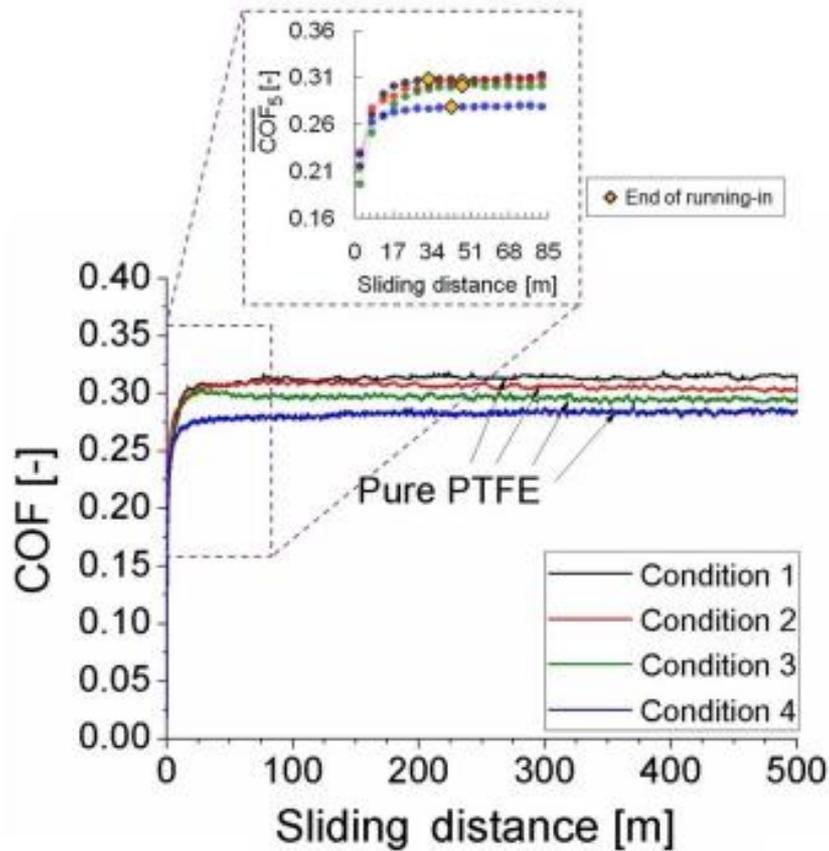
RESULTADOS

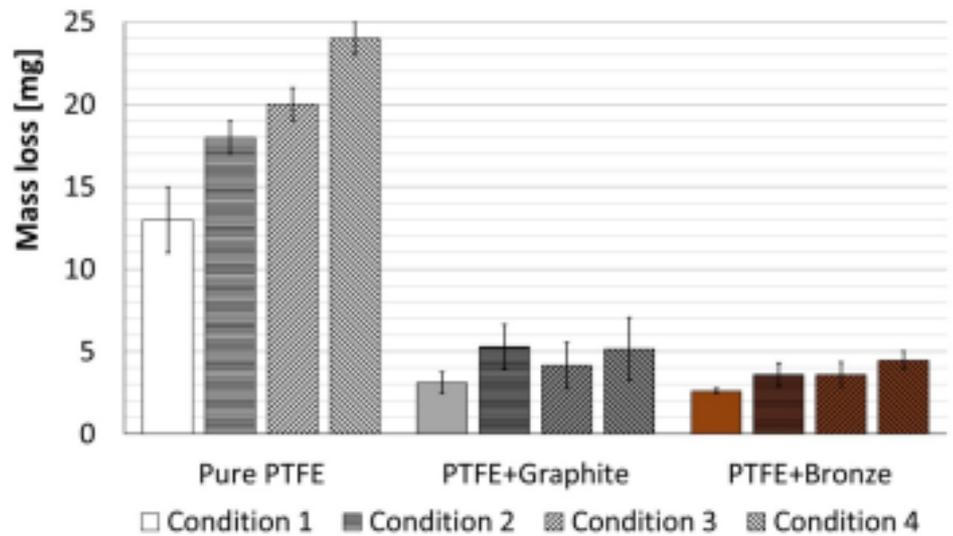
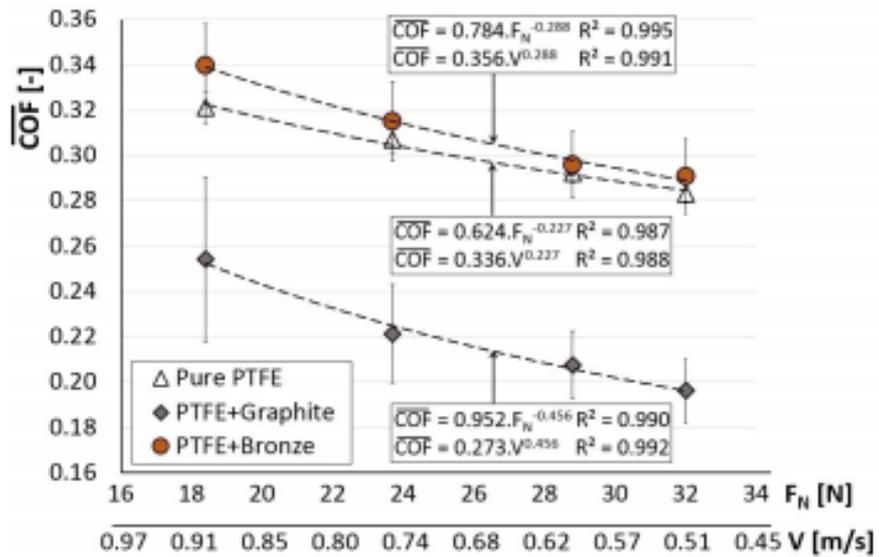


- ▶ Condition 1 (PTFE+Bronze)
- ▶ Condition 2 (PTFE+Bronze)
- ▶ Condition 3 (PTFE+Bronze)
- ▶ Condition 4 (PTFE+Bronze)

- ▶ Condition 1 (PTFE+Graphite)
- ▶ Condition 2 (PTFE+Graphite)
- ▶ Condition 3 (PTFE+Graphite)
- ▶ Condition 4 (PTFE+Graphite)

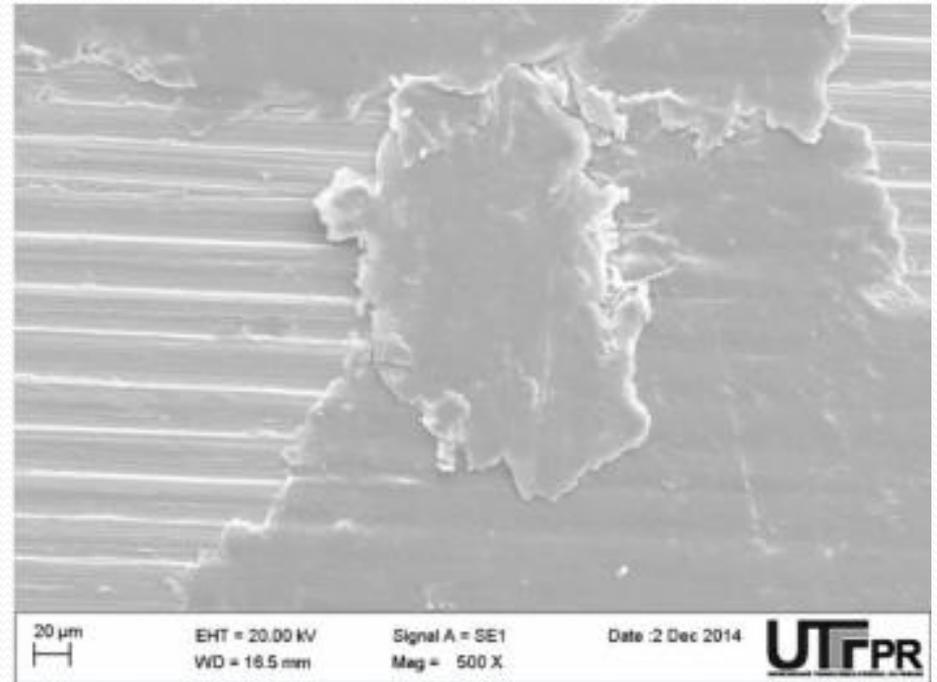
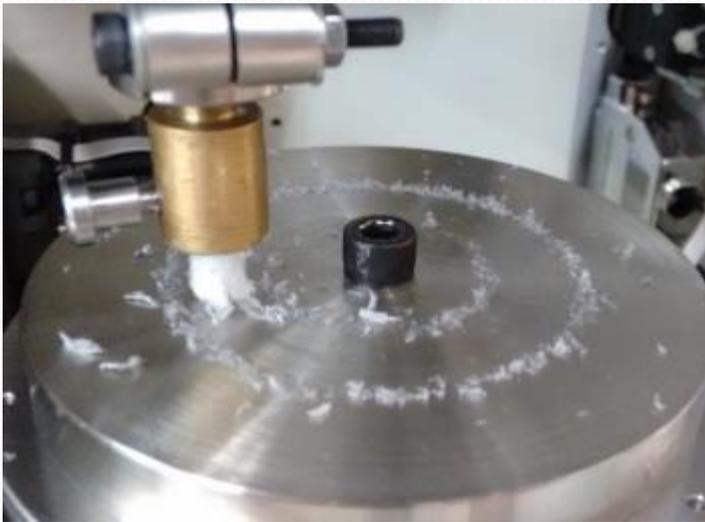
RESULTADOS



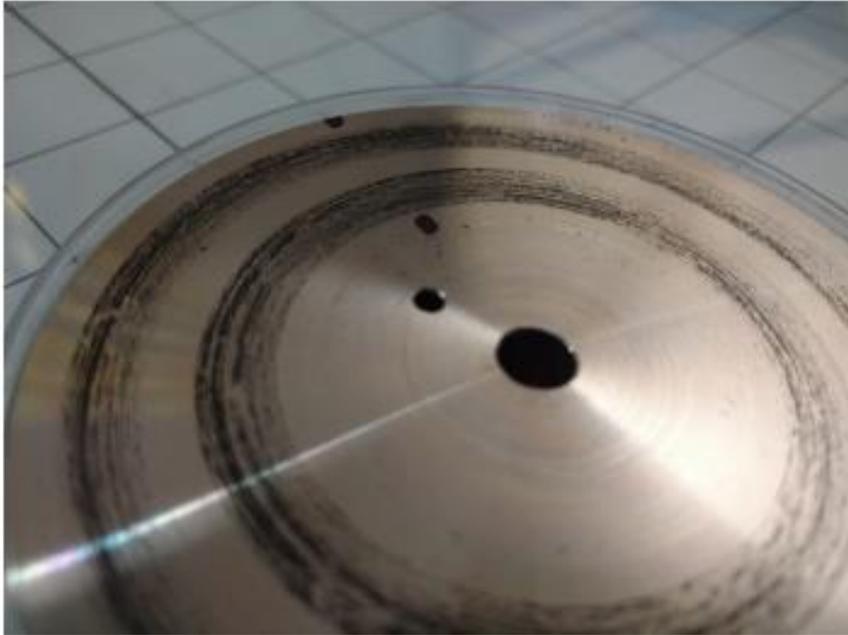


$PV = 0,49$ [MPa.m/s]

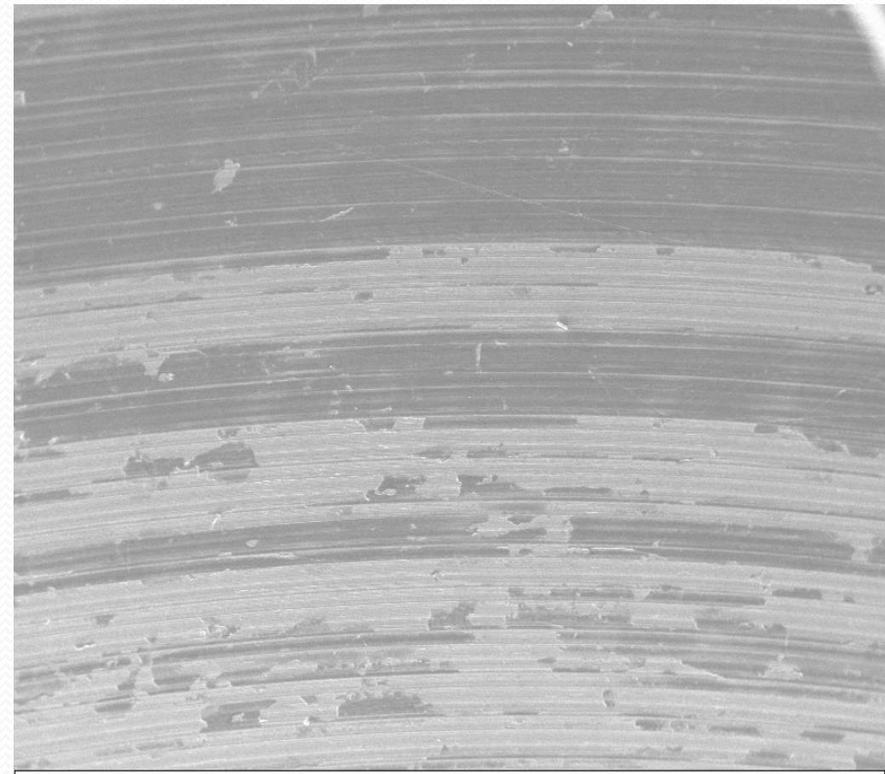
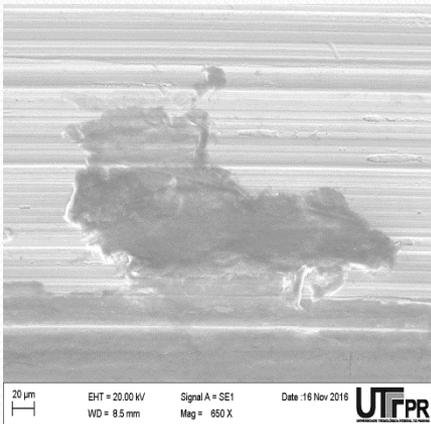
PTFE PURO



Transferência de filme

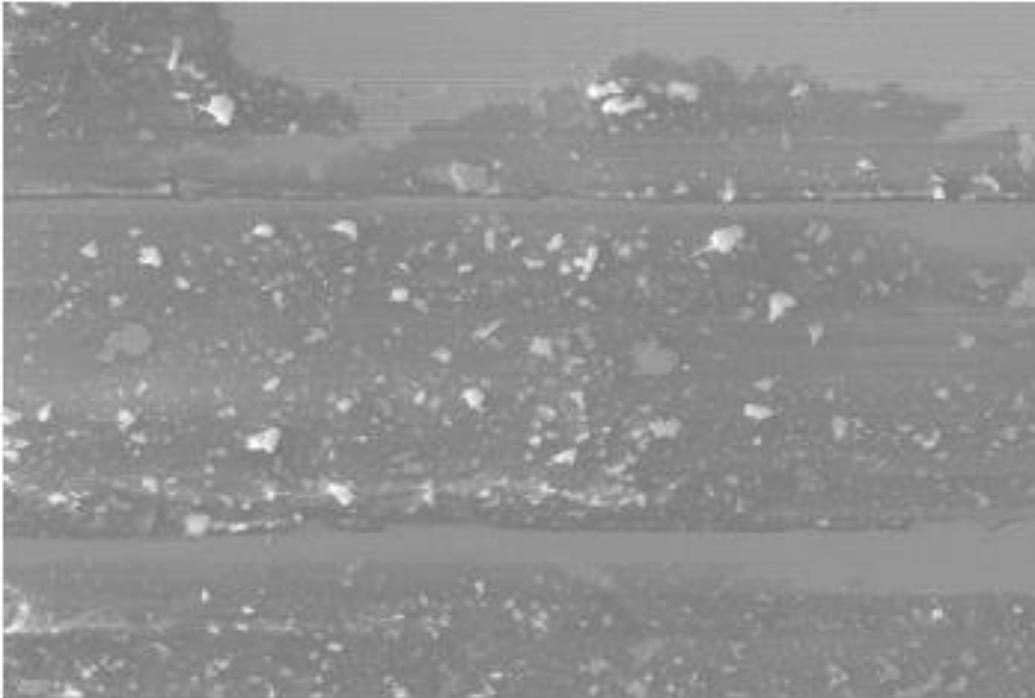


PTFE + Grafite

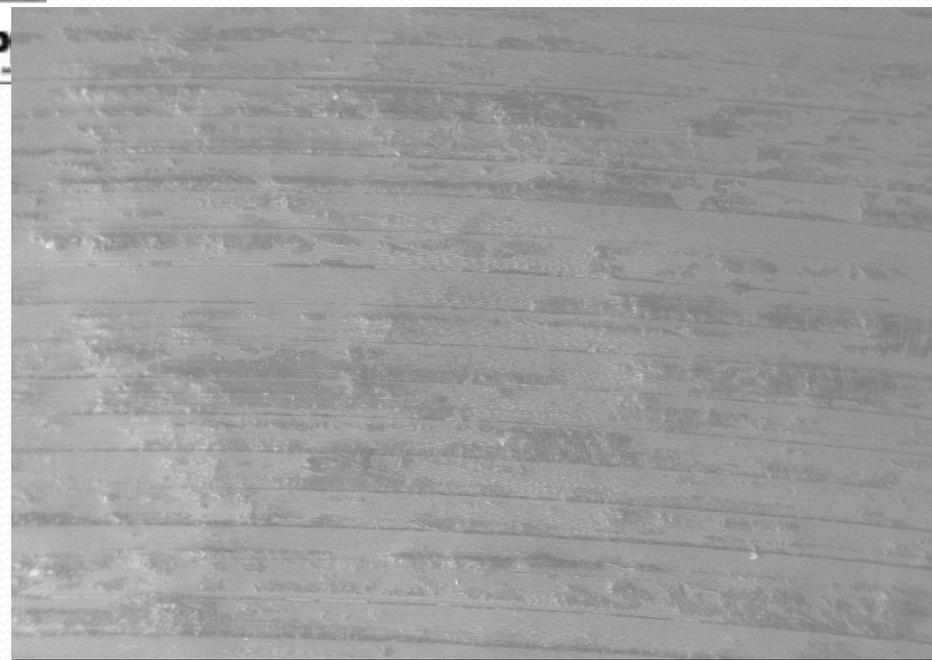
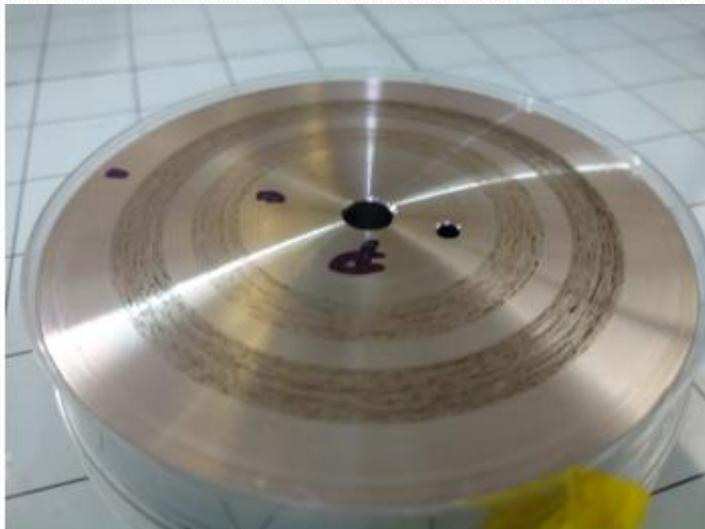


PTFE + Bronze

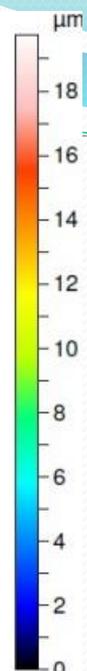
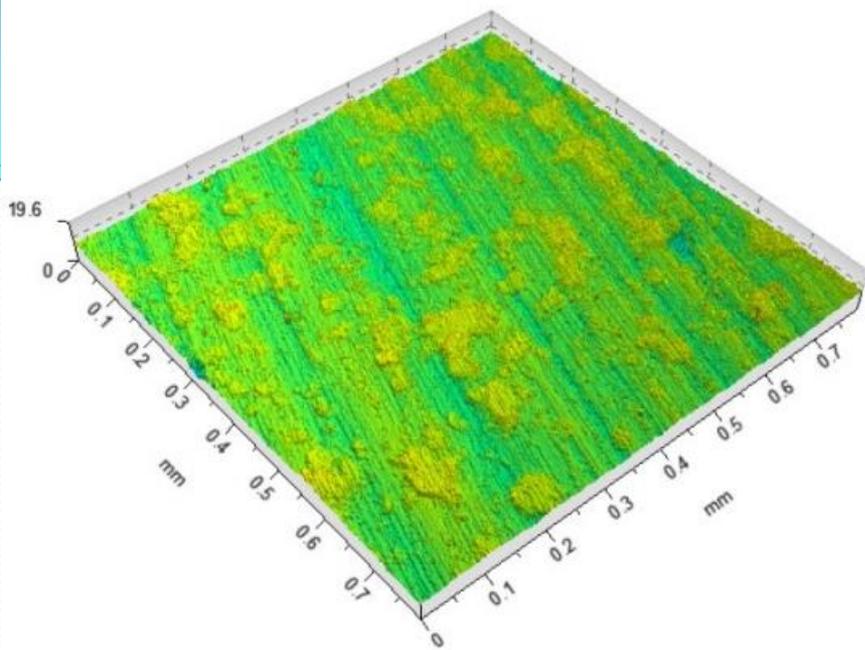
Menor adesão
Presença de Partículas



20 μm
EHT = 20.00 kV
WD = 8.5 mm
Signal A = SE1
Mag = 500 X
Date :16 Nov 2016
UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



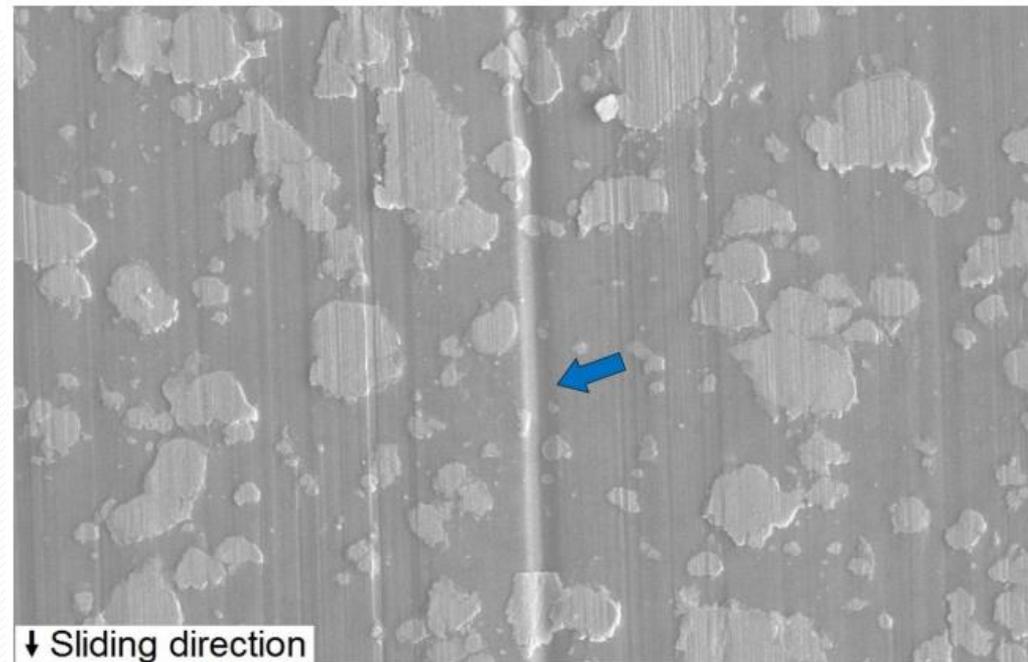
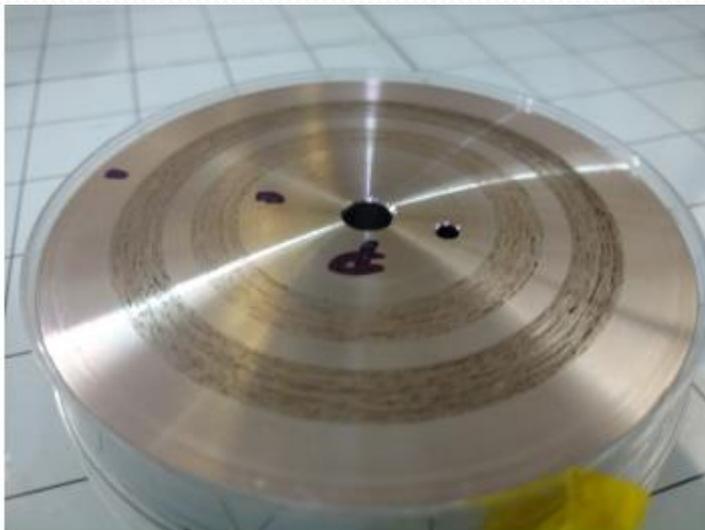
200 μm
EHT = 20.00 kV
WD = 8.5 mm
Signal A = SE1
Mag = 60 X
Date :16 Nov 2016
UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ



PTFE + Bronze

MICROSULCAMENTO
MICROCORTE

DESGASTE PREFERENCIAL



20 μm

EHT = 20.00 kV
WD = 10.0 mm

Signal A = SE1
Mag = 500 X

Date :16 Nov 2016

CONCLUSÕES

- The fillers did affect significantly, in relation to pure PTFE, the coefficient of friction (COF) and both minimized the mass loss. Both fillers increased the time required to reach steady-state related to COF and showed a great influence of the normal force in this parameter. The graphite filler acted as a solid lubricant and exhibited reductions in COF while the bronze filler imposed a COF increase (especially for conditions with lower normal force);
- Both composites had an influence of the test condition on contact temperature. Furthermore, applying a model that considers heat generated by friction, a better agreement was found when considering the contact as a unique asperity rather than contact of multiple asperities;
- Adhesion (transfer films) and abrasive (microploughing and microcutting) wear mechanisms were identified for both composites. PTFE+Bronze presented more scratches occurrence which was explained by the three-body abrasion mechanism related to hardened bronze wear debris acting as a third body. The fillers were decisive to increase the wear resistance of pure PTFE ;
- Since each composite has a soft phase, preferential wear occurred. For PTFE+Graphite, graphite particles were initially removed due to higher ease of shearing their layers. In contrast, for PTFE+Bronze, preferential wear occurs in the PTFE matrix itself because it acted as the soft phase for this composite.

*COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
CONDUTORES DE ELETRICIDADE:
PoliAnilina (PAni):
Primeiros Resultados*

Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos Condutores de Eletricidade para Aplicações Tribológicas

Thiago Daroz Pinheiro – Bolsista IC
Caio Valente – Mestrando PPGEM

Carlos Cruz – Coorientador (DAQBi)
Carlos Henrique da Silva – Orientador (DAMEC)

Polímeros condutores de eletricidade

Polímeros **extrinsecamente** condutores

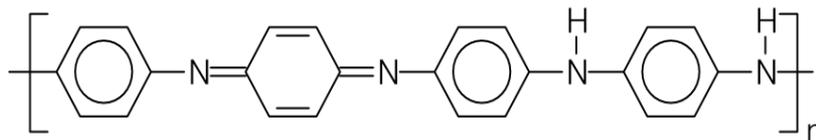
- Anos 50
- Adição de materiais condutores (negro de fumo, fibras metálicas)

Polímeros **intrinsecamente** condutores

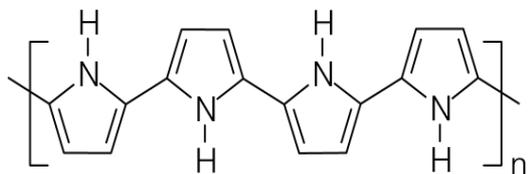
- Anos 70
- Conduz corrente elétrica sem incorporar outros materiais
- Polímero conjugado, isto é, contem ligações simples (σ) e ligações duplas (σ e π) alternadas em toda sua cadeia polimérica



Poliacetileno

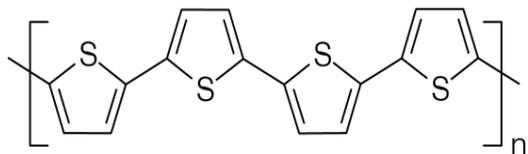
10³ a 10⁶

Polianilina

10 a 10³

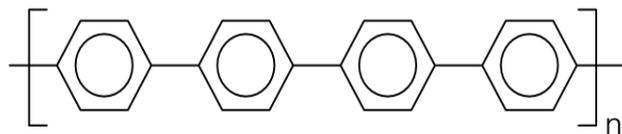
Polipirrol

600



Politiofeno

200



Poli(p-fenileno)

500

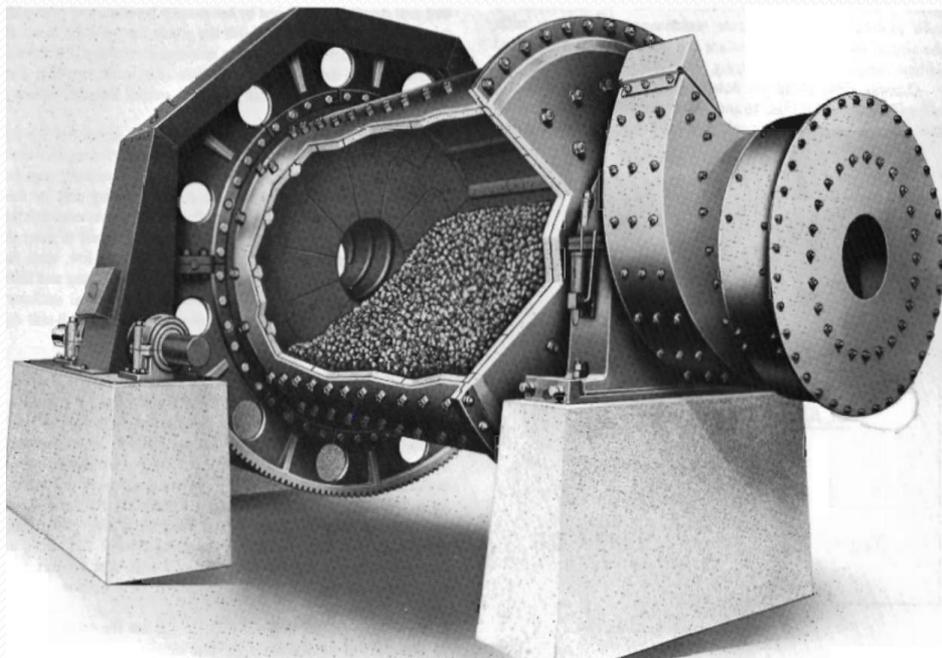


Poli(p-fenileno vinileno)

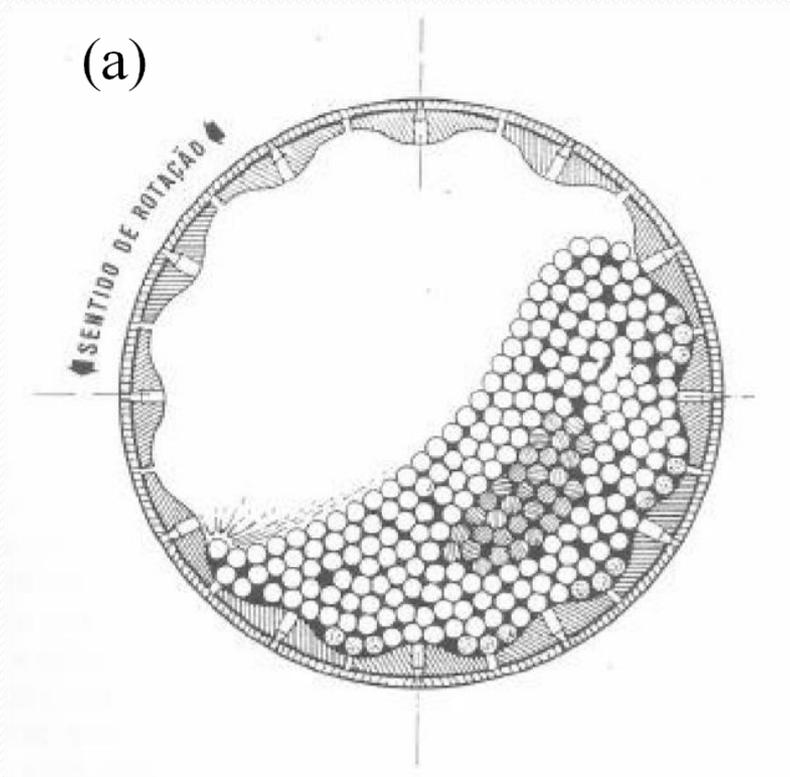
1

Processo de moagem

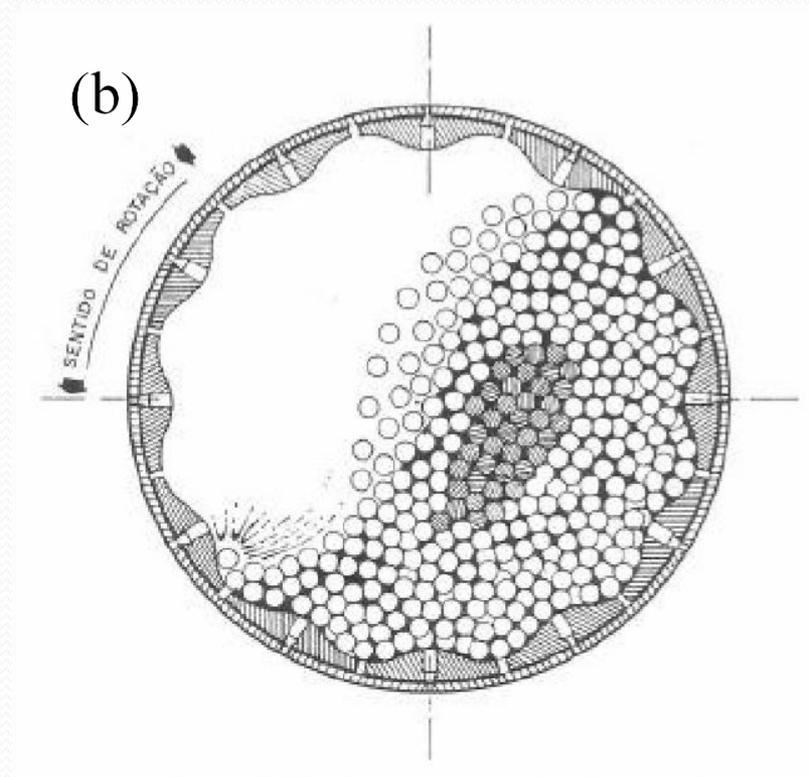
- Moinho de bolas



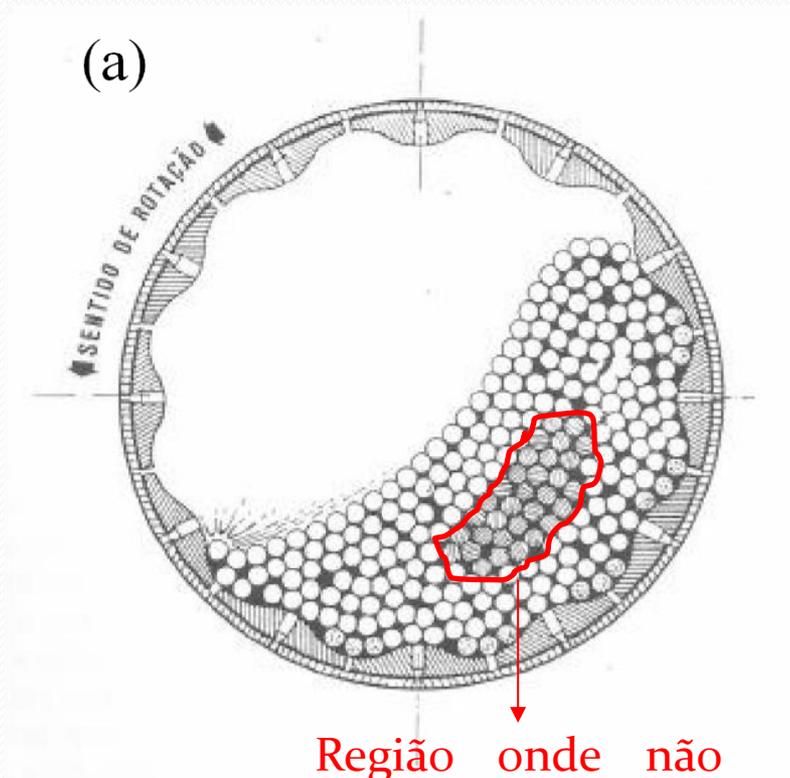
a) Cascata



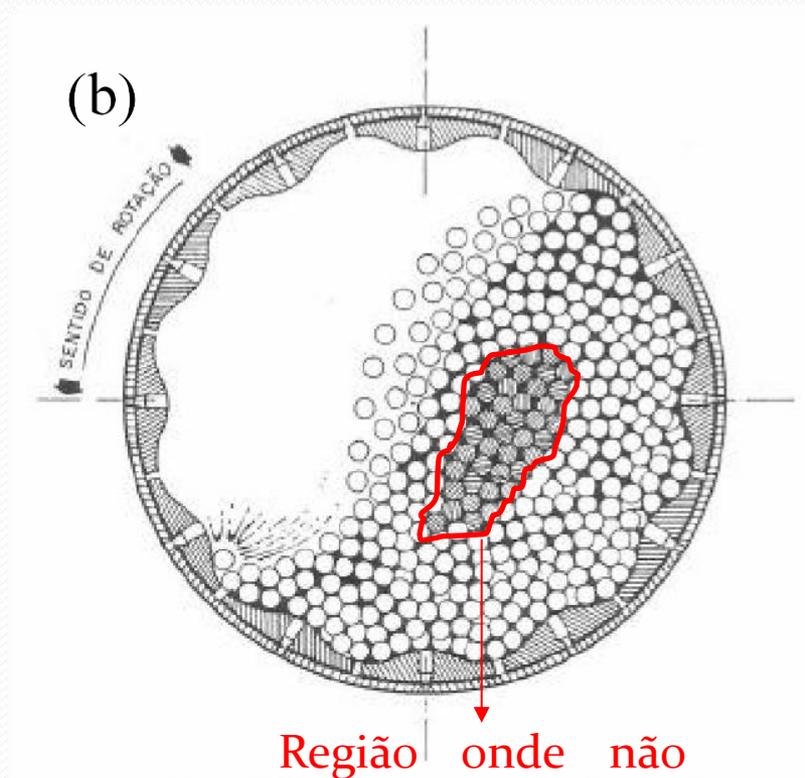
b) Catarata



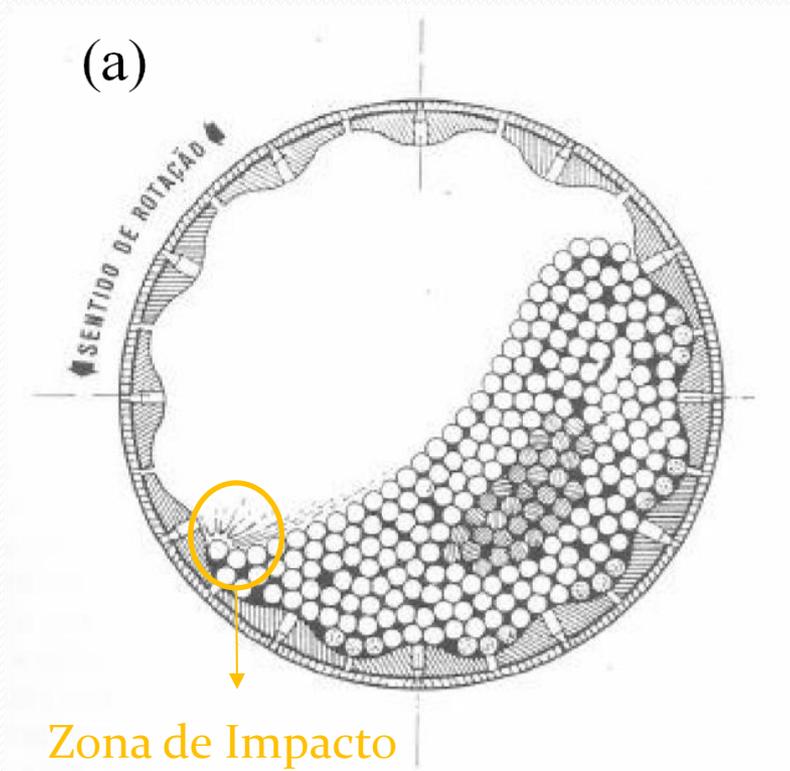
a) Cascata



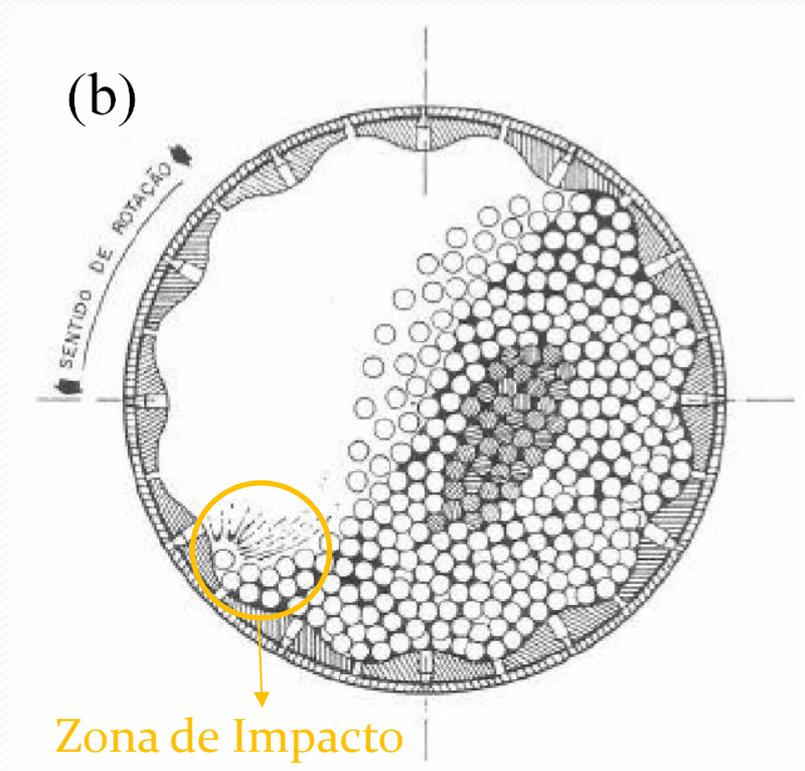
b) Catarata



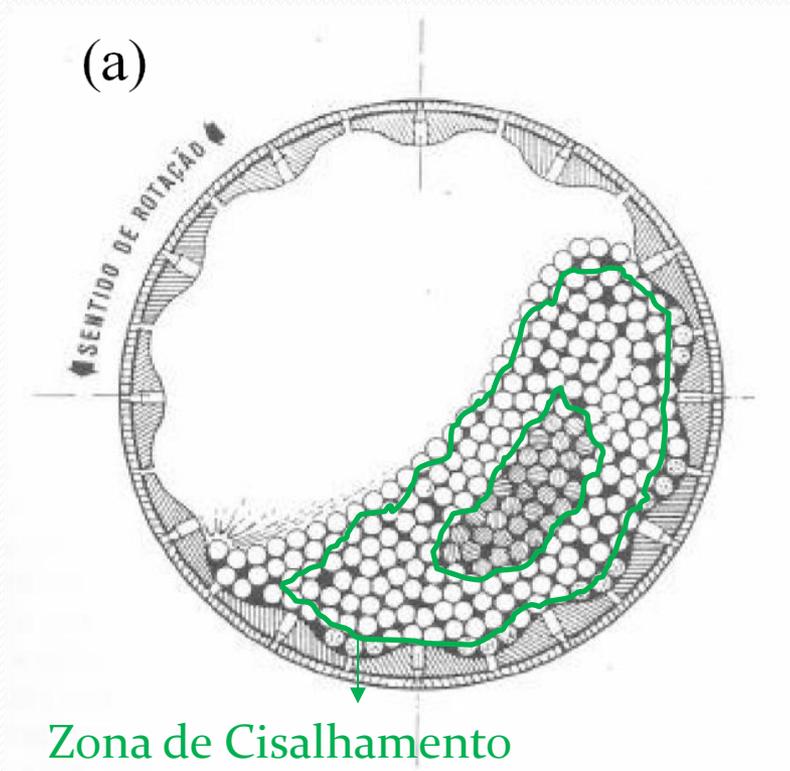
a) Cascata



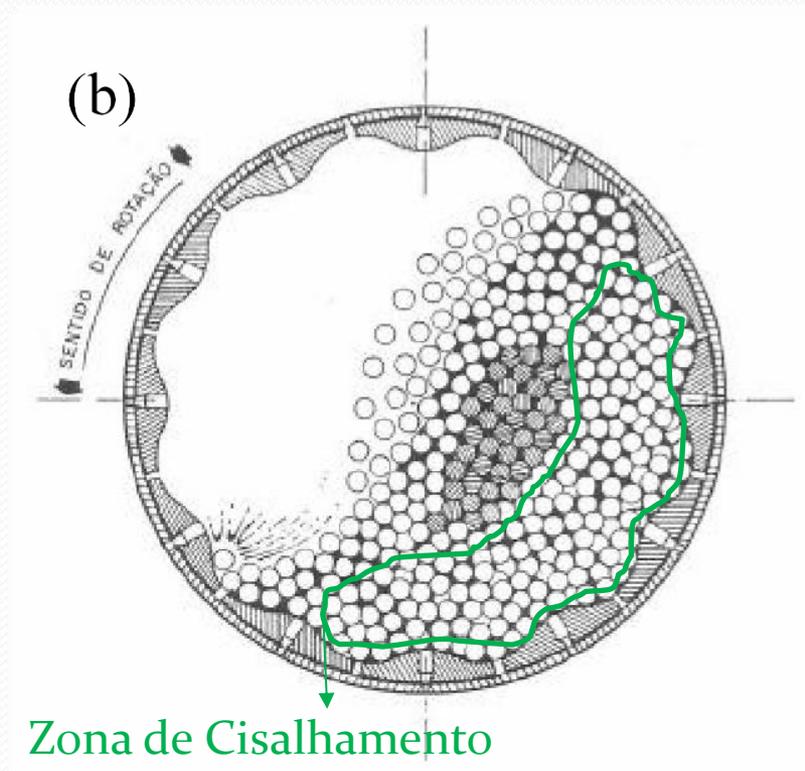
b) Catarata



a) Cascata



b) Catarata



Corpos moedores

- Tamanho de esfera x
Tamanho de partícula



Velocidade de operação

- Determina o movimento de carga
- Influencia no desgaste das bolas
- 60 – 85% da velocidade crítica

$$v_c = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \text{ [rpm]}$$

Fator de enchimento

- Percentual do volume do moinho ocupado pelas bolas
- 30 – 45% do volume do moinho

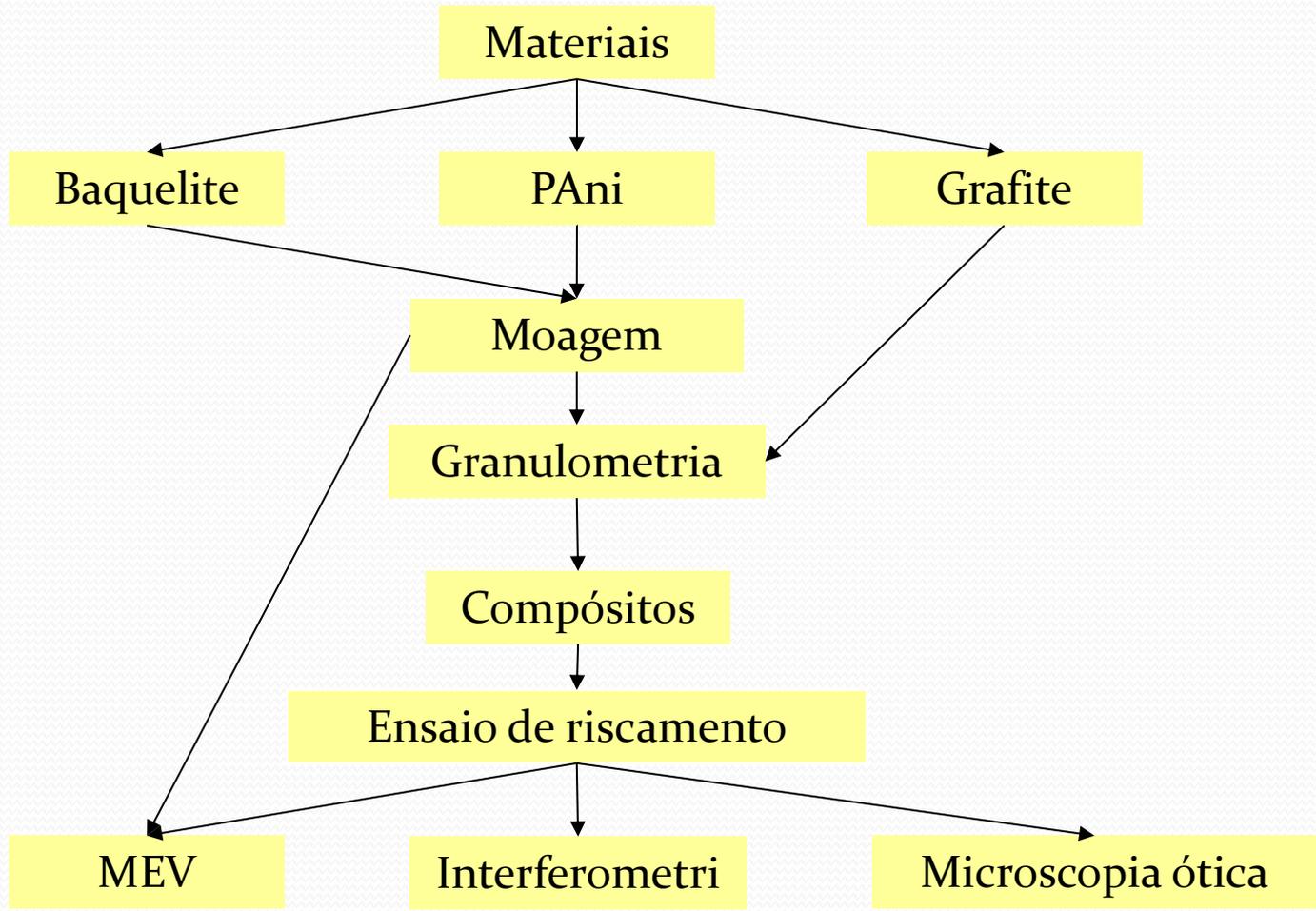
Volume de carga

- Quantidade de carga
- 50 – 60% do espaço vazio entre as bolas
- Influencia na velocidade de quebra

Objetivo

Desenvolver metodologias para o estudo das características tribológicas de compósitos poliméricos condutores

Metodologia



Moagem da PAni

- Dimensões internas de 35 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento
- Esferas de aço cromo com 8 mm de diâmetro
- Moagem contínua por 4 horas a 150 RPM

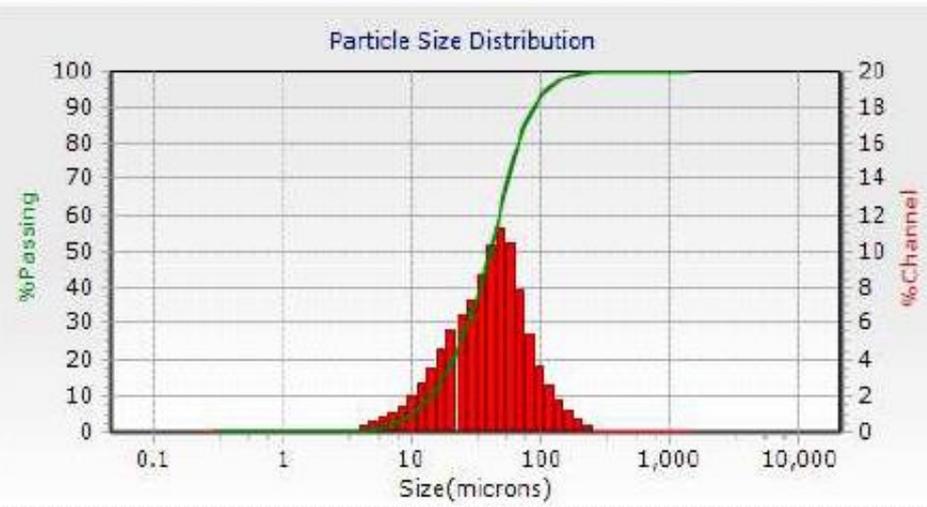


Cálculo do número de esferas

Diâmetro (mm)	35	D
Comprimento (mm)	100	l
Volume interno (mm ³)	96211,275	$V_i = \frac{\pi D^2}{4} * l$
Diâmetro esferas (mm)	8	d
Volume un. esf. (mm ³)	268,08257	$V_e = \frac{\pi d^3}{6}$
Fator de empacotamento	68%	FAE
Fator de enchimento	30%	f
Número de esferas	73	$N = FAE * f * V_i/V_e$
Velocidade crítica (RPM)	226,09287	$v_c = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}}$
Rotação mínima: 60% v_c	135,65572	$v_{min} = 0,6 * v_c$
Rotação máxima: 85% v_c	192,17894	$v_{max} = 0,85 * v_c$
Densidade Pani (g/mm ³)	0,00133	δ
Volume materia prima min (mm ³) (Volume de carga: 50%)	4618,1412	$V_{min} = 0,5 * f * (1 - FAE) * V_i$
Volume materia prima max (mm ³) (Volume de carga: 60%)	5541,7694	$V_{max} = 0,6 * f * (1 - FAE) * V_i$
Massa materia prima min (g)	6,1421278	$m_{min} = \delta * V_{min}$
Massa materia prima max (g)	7,3705534	$m_{max} = \delta * V_{max}$

Granulometria

- Baquelite: 40 μm
- PAni: 12 μm
- Grafite: 6 μm



Preparação dos corpos de provas

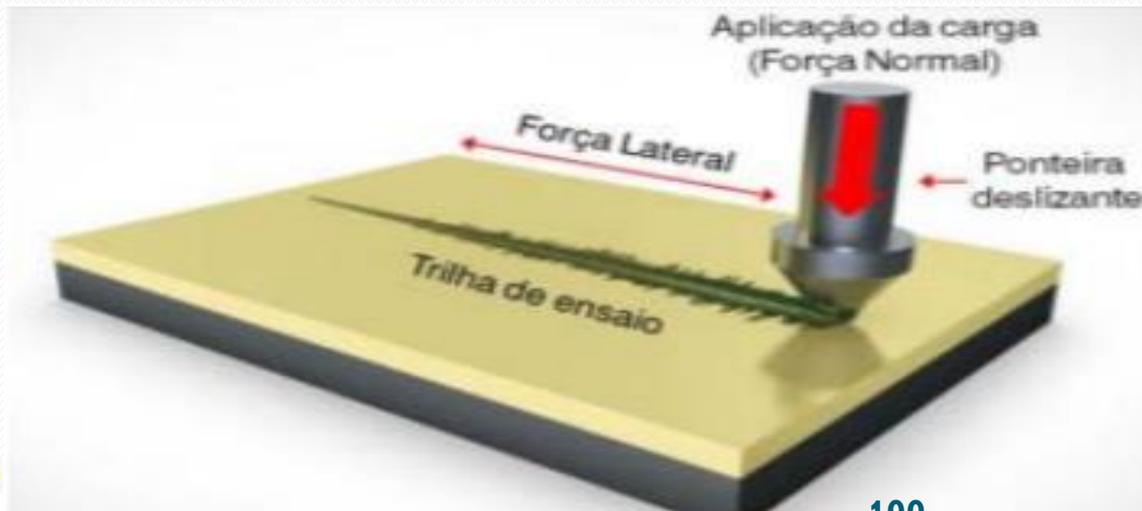
- B (Baquelite pura)
- B10P (90% baquelite + 10% Pani)
- B20P (80% baquelite + 20% PAni)
- B10G (90% baquelite + 10% Grafite)
- B20G (80% baquelite + 20% Grafite)



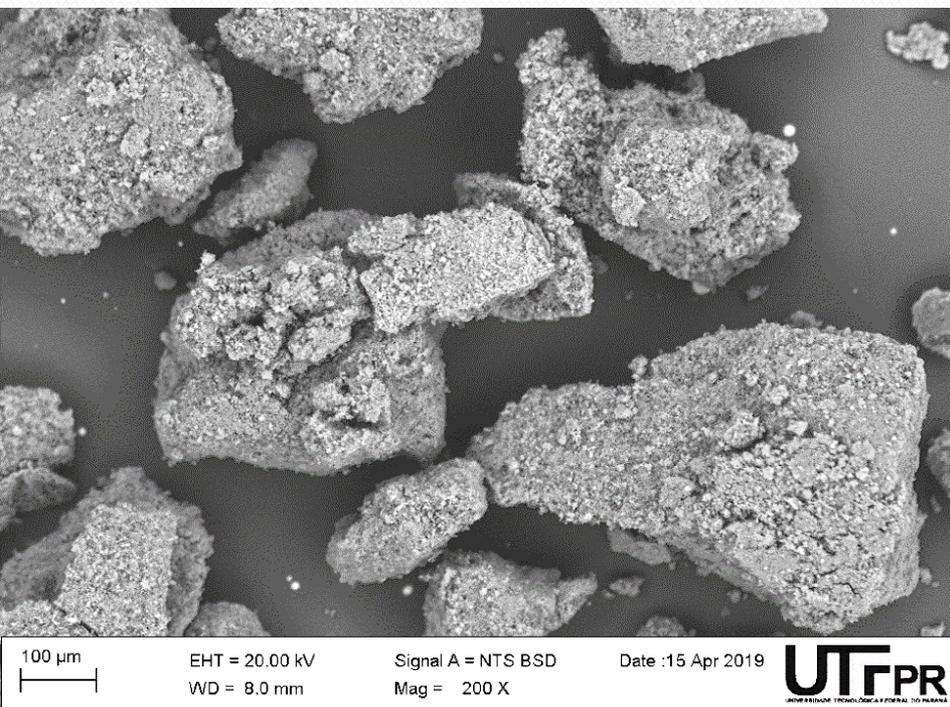
Ensaio de riscamento

Condições de ensaio:

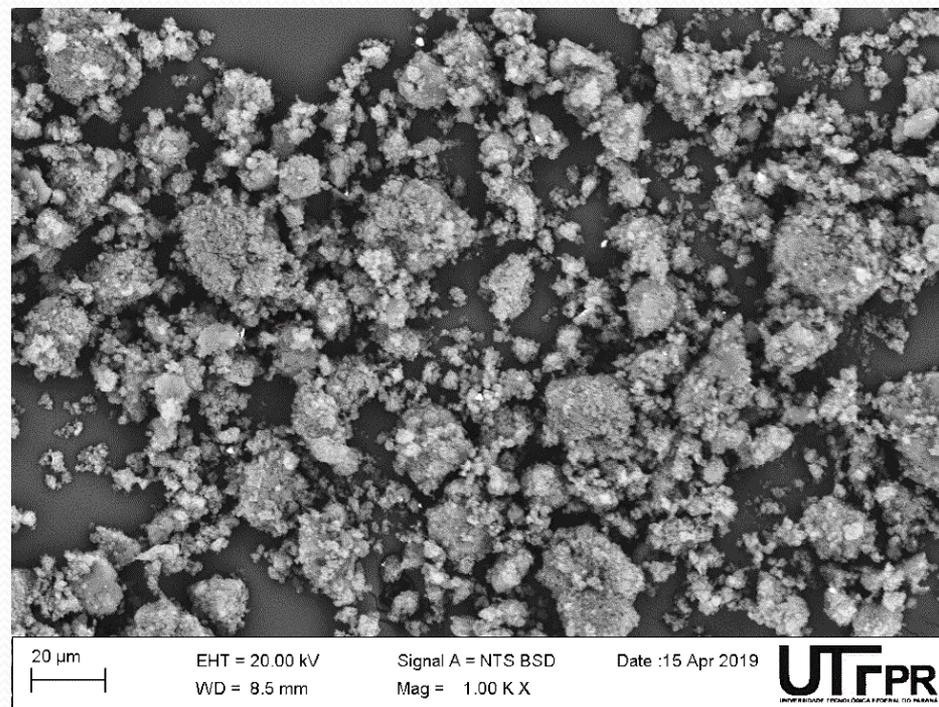
- Penetrador Rockwell C
- Força normal constante: 8N
- Velocidade: 1 mm/s
- Pista: 5 mm



Eficiência da moagem

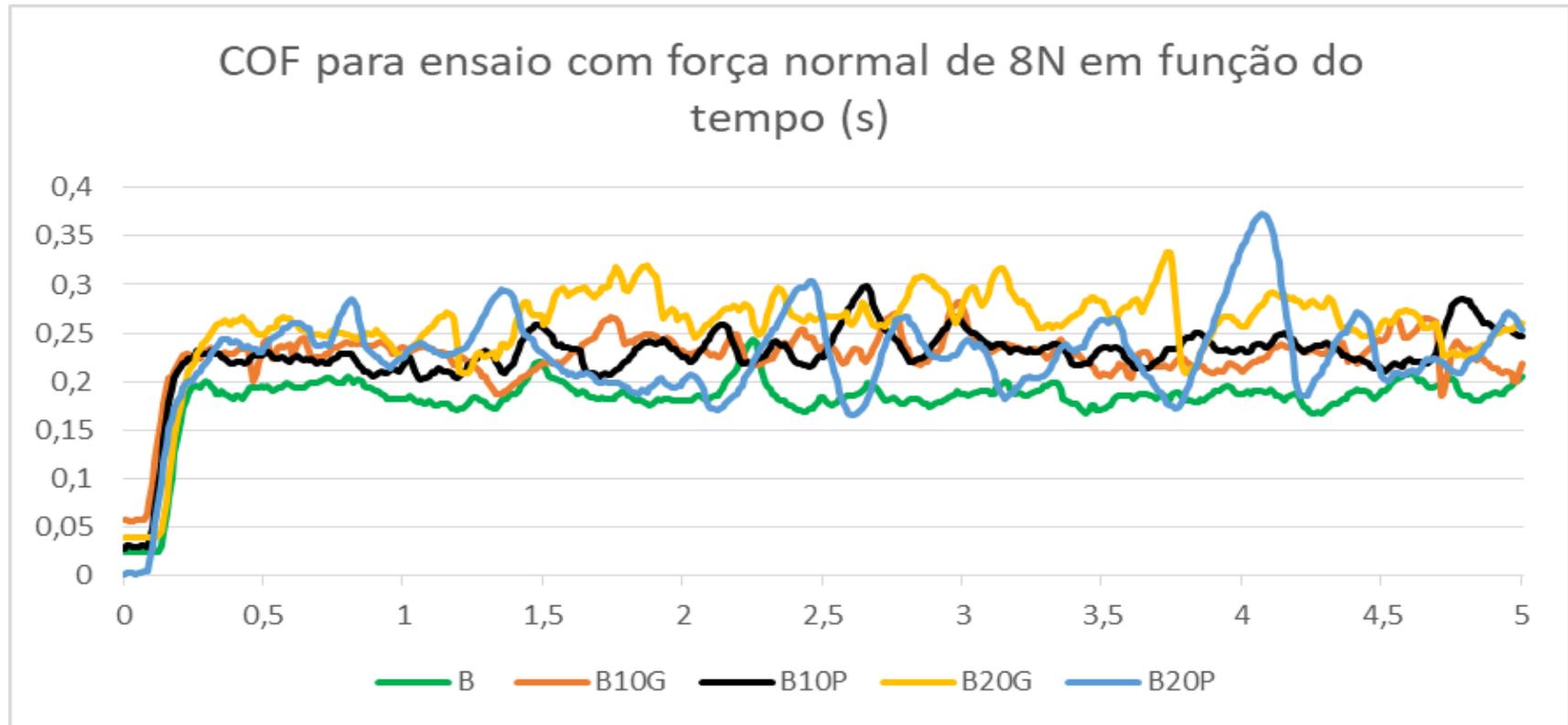


- PANi não moída



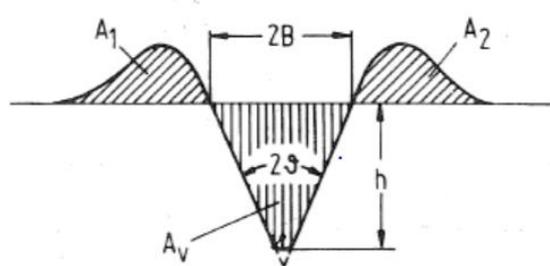
- PANi moída

Coeficiente de atrito (COF)



Profundidade de risco

Fator de abrasão

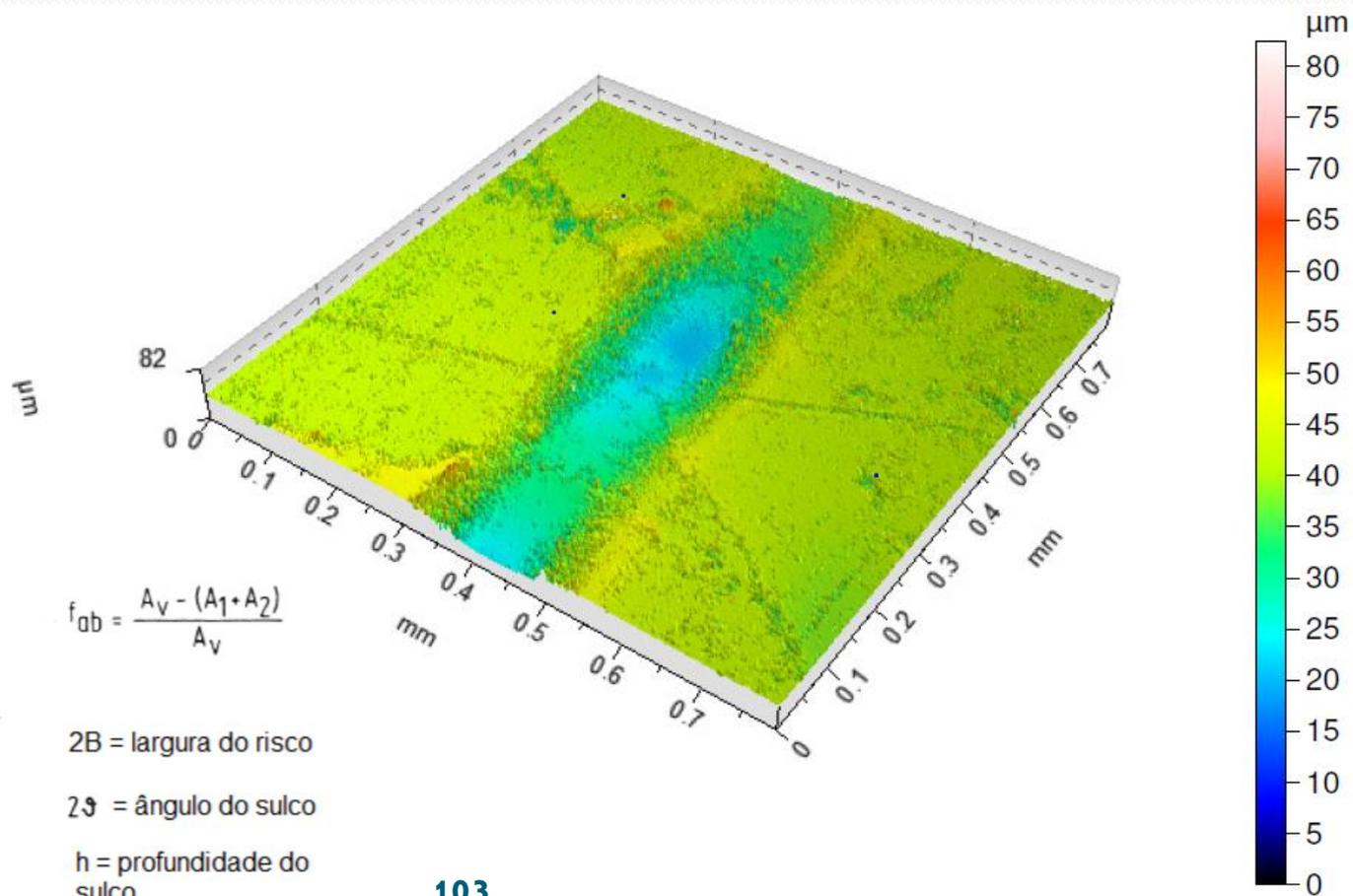


$$f_{ab} = \frac{A_V - (A_1 + A_2)}{A_V}$$

$2B$ = largura do risco

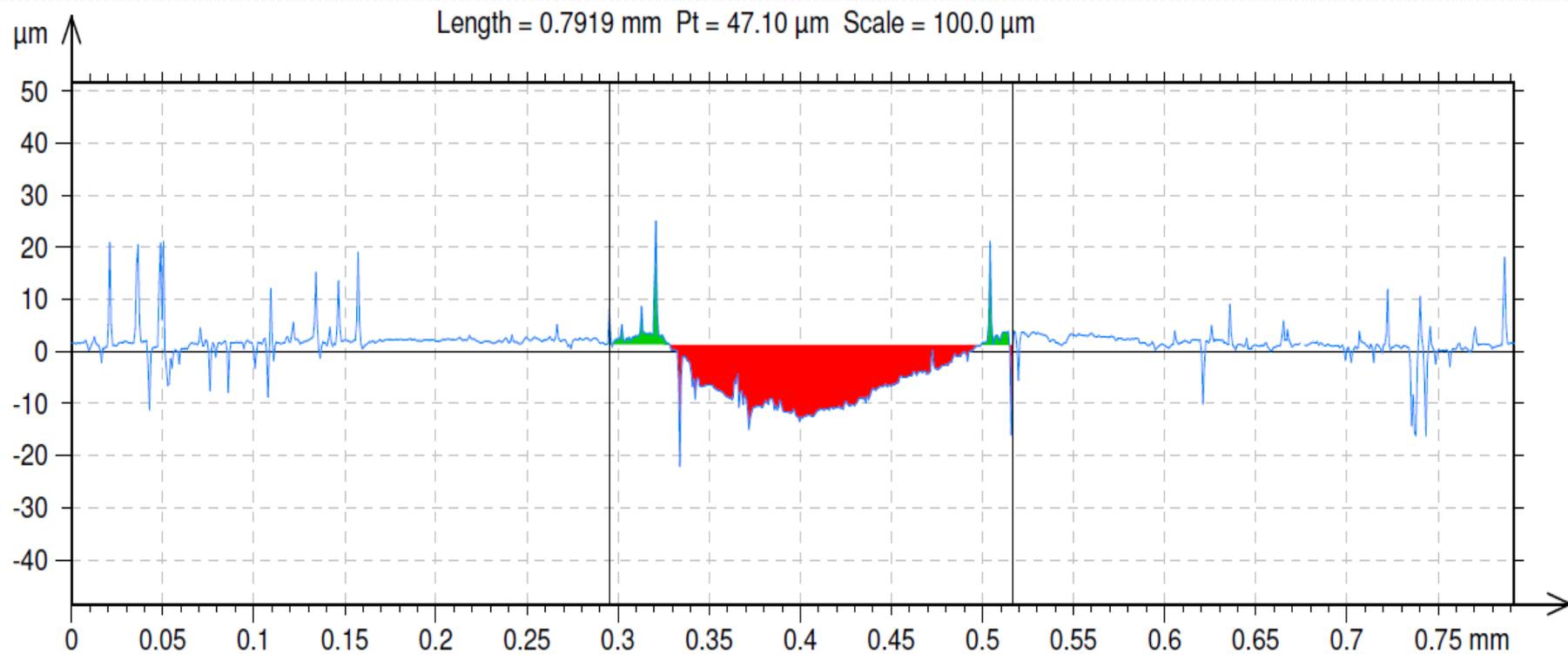
2θ = ângulo do sulco

h = profundidade do sulco



Profundidade de risco

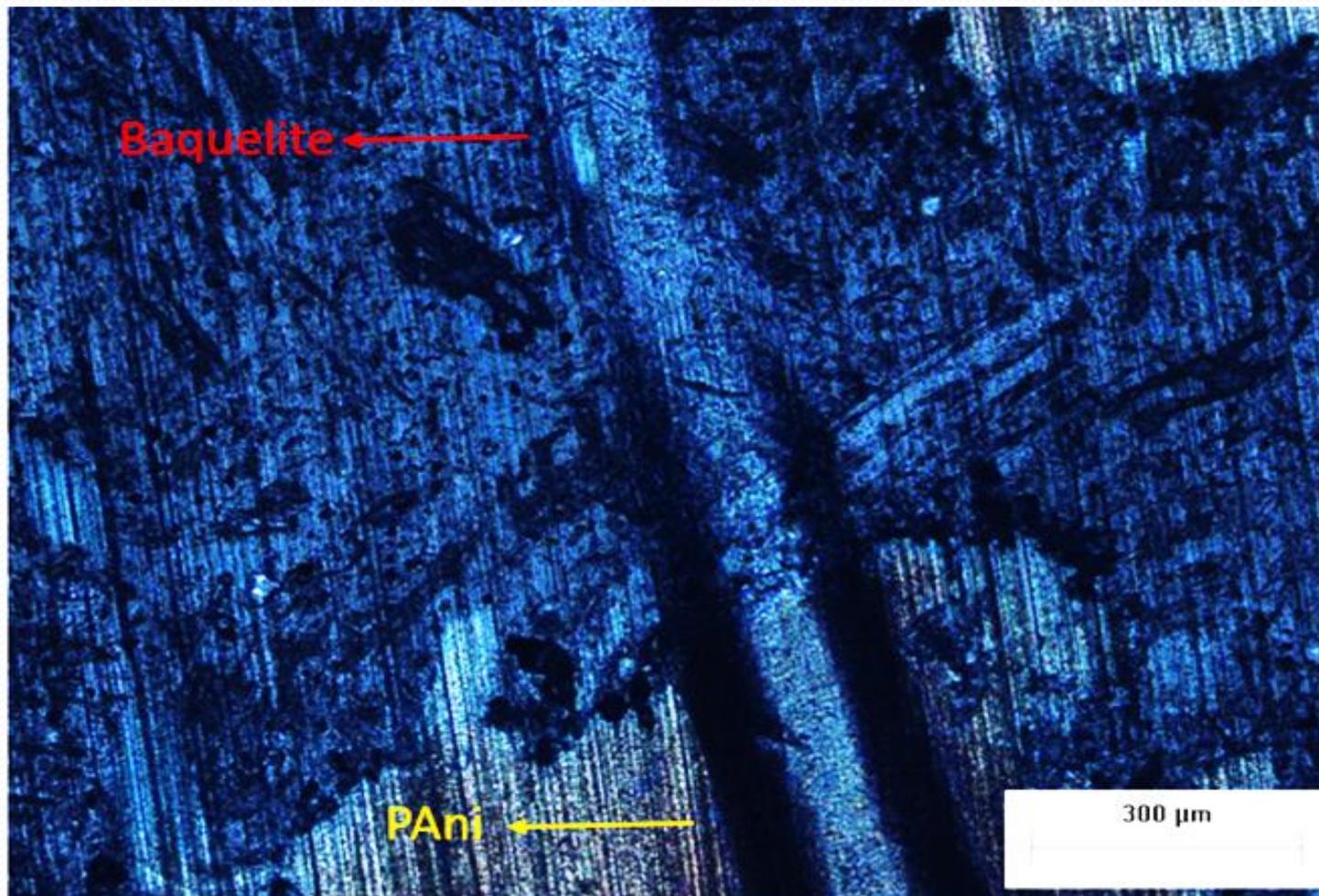
Fator de abrasão



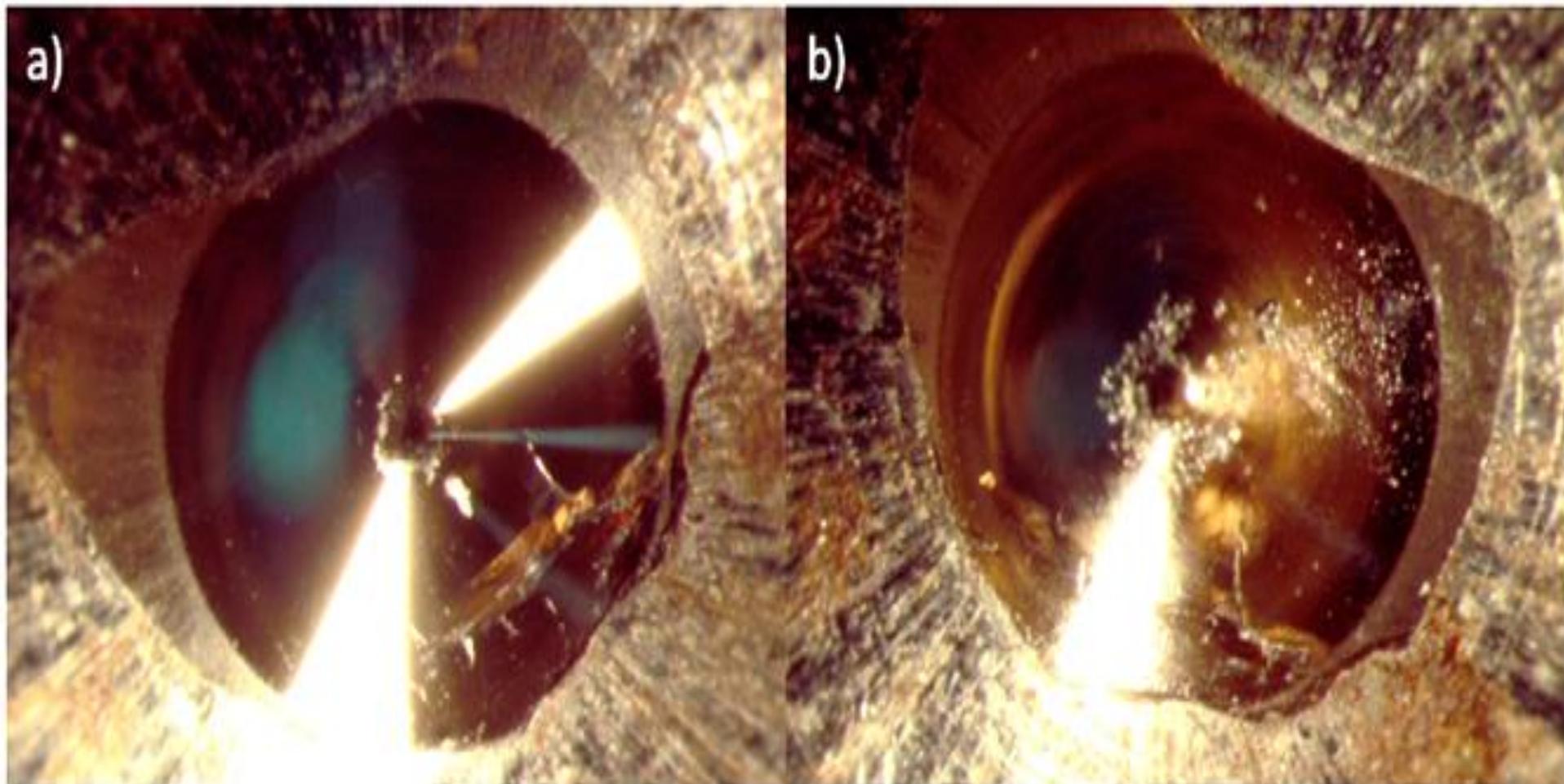
Maximum depth 23.83 μm Area of the hole 1535 μm^2

Maximum height 23.27 μm Area outside 100.3 μm^2 **104**

Carregamento	Compósitos	COF	Profundidade [μm]	f_{ab}
8N	B	$0,19 \pm 0,02$	*	*
	B10G	$0,23 \pm 0,02$	$4,4 \pm 1,6$	$0,68 \pm 0,09$
	B10P	$0,25 \pm 0,03$	7 ± 4	*
	B20G	$0,27 \pm 0,03$	10 ± 2	$0,84 \pm 0,15$
	B20P	$0,23 \pm 0,04$	13 ± 8	$0,78 \pm 0,15$



Micrografia de um corpo de prova B20P após riscamento (força normal de 8N)



Ponta do penetrador: a) Limpa b) Após ensaio de riscamento de força normal de 5N no corpo de prova BioG

Conclusão

- Eficiência de moagem
- Efeito força no ensaio de riscamento
- Efeito do material aditivo
- Compósito frágil