

PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2021

Aula 13 – Tribologia – Atrito / Desgaste

Professores: Benedito de Moraes Purquerio
Carlos Alberto Fortulan

Escopo:

Introdução

Tribologia na Engenharia

Superfície

Atrito

Desgaste

Lubrificação

Regimes

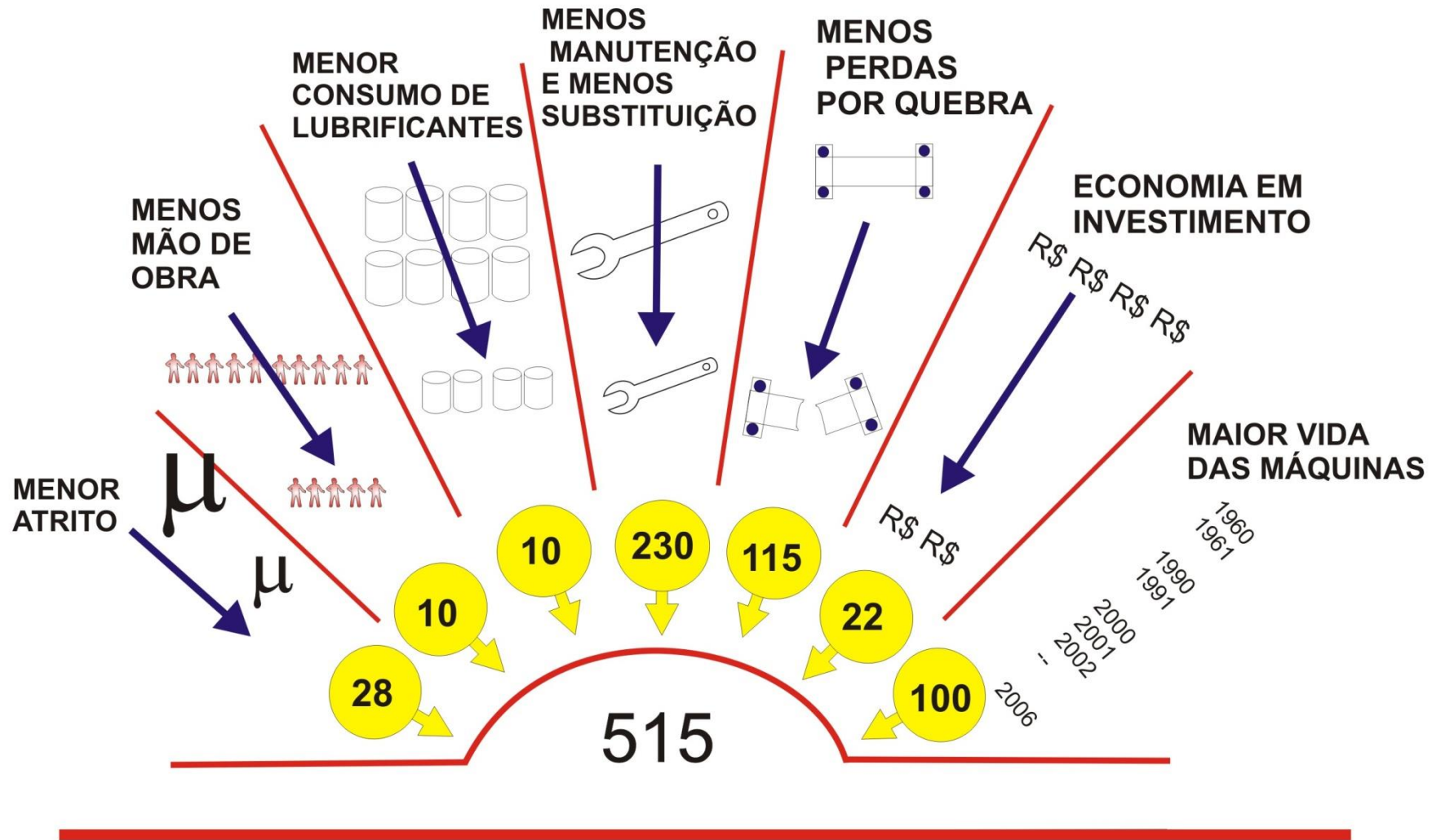
Lubrificantes

Engenharia de Superfícies

Tribologia na Engenharia

TRIBOLOGIA

ECONOMIA



APLICAÇÕES TÍPICAS DE TRIBOLOGIA LUBRIFICAÇÃO-ATRITO-DESGASTE

PAR TRIBOLÓGICO METAL - METAL

MÁQUINAS ALTERNATIVAS.

PROJETO DE FERRAMENTAS - OPERAÇÕES DE MANUFATURA.

TREFILAÇÃO - MATRIZES - EXTRUSÃO.

CONTATOS: ENGRENAGENS - CAMES - MANCAIS DE ROLAMENTO.

TRIBOLOGIA

CONCEITUAÇÃO

MORFOLOGIA DA PALAVRA

TRIBOS + LOGIA

ATRITO + ESTUDO

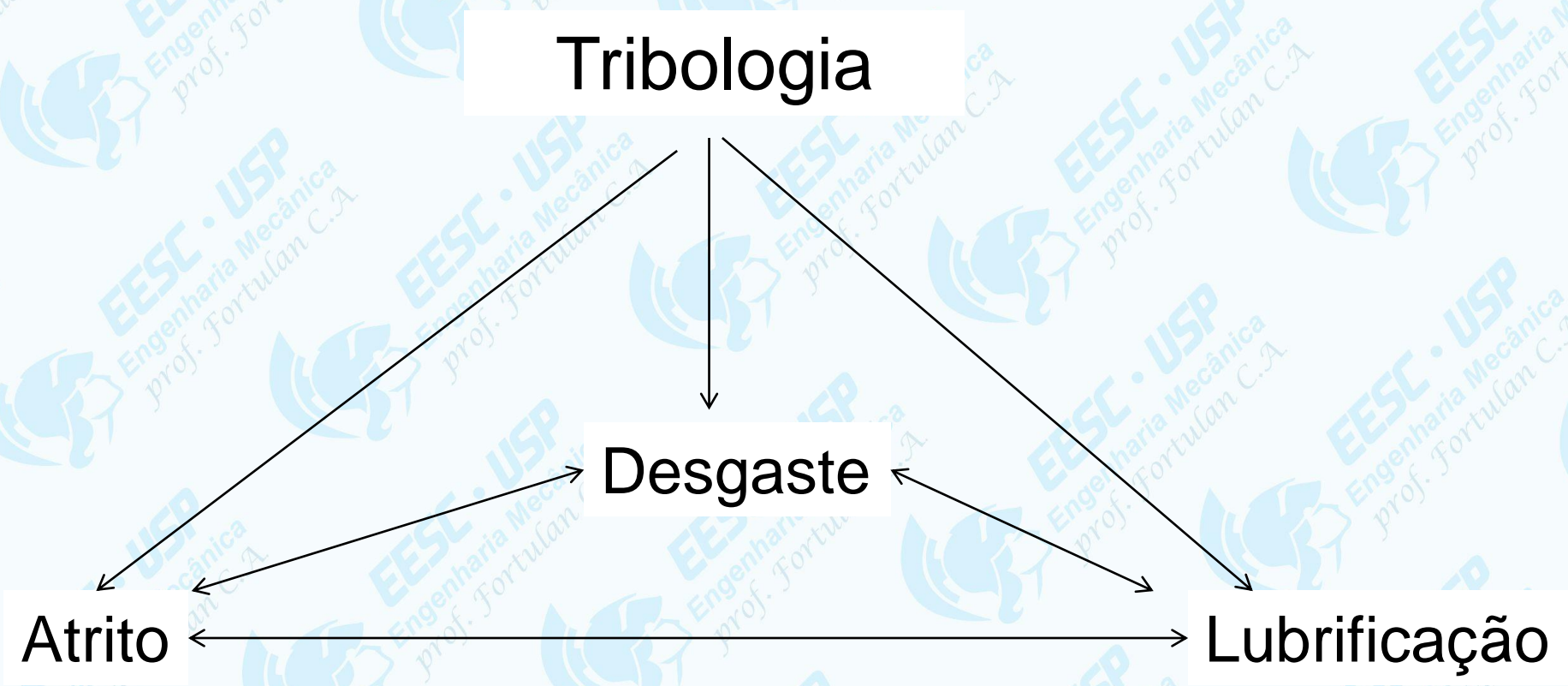
TRIBOLOGIA : ESTUDO DO ATRITO

TRIBOLOGIA

DEFINIÇÃO

"A CIÊNCIA E TECNOLOGIA DAS SUPERFÍCIES QUE SE INTERAGEM EM MOVIMENTO RELATIVO E DAS PRÁTICAS A ELAS RELACIONADAS".

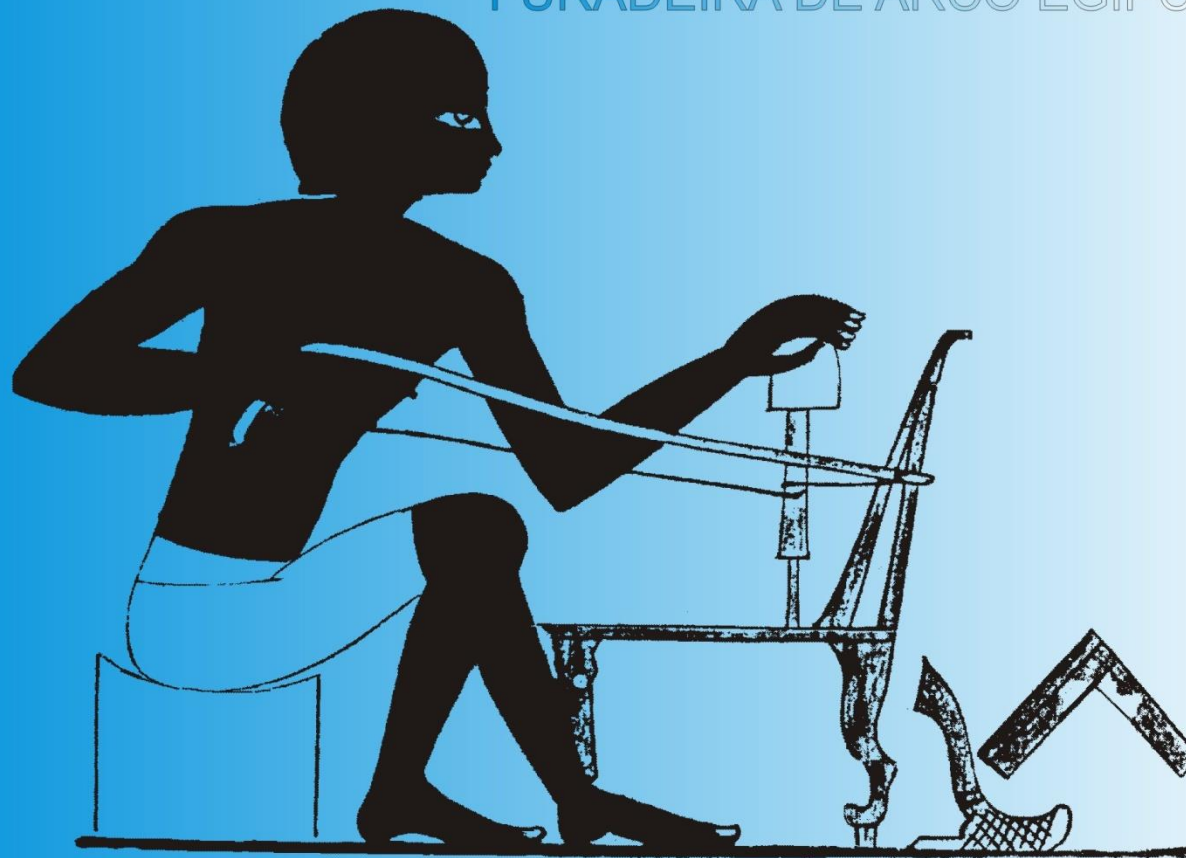
H. Peter JOST, Lubrication - Tribology - Report, 1966.



PROPÓSITO BÁSICO DA TRIBOLOGIA

A MINIMIZAÇÃO/ELIMINAÇÃO
DAS PERDAS EM TODOS OS
NÍVEIS DA TECNOLOGIA

FURADEIRA DE ARCO EGÍPCIA



Um dos primeiros "TRIBOLOGISTAS", LUBRIFICANDO O TRENÓ DA ESTÁTUA DE TII. SACCARA - 2400 AC.



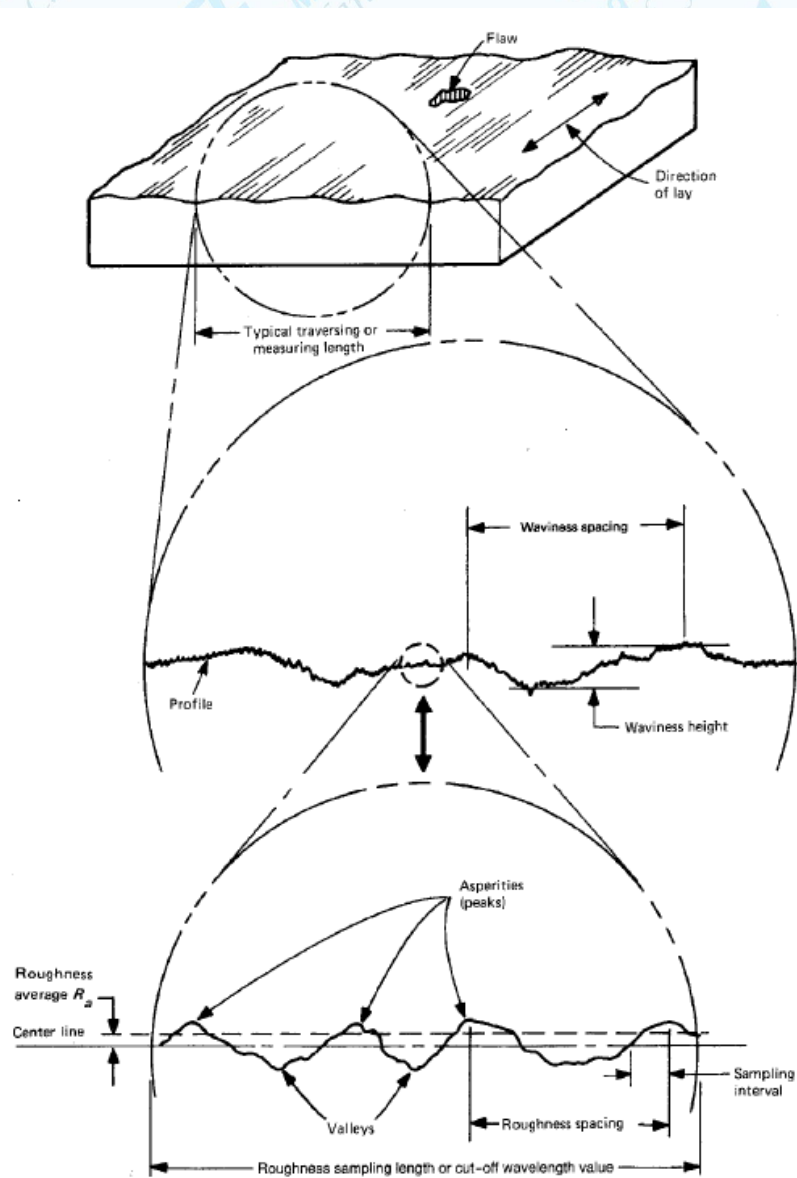


Superfície

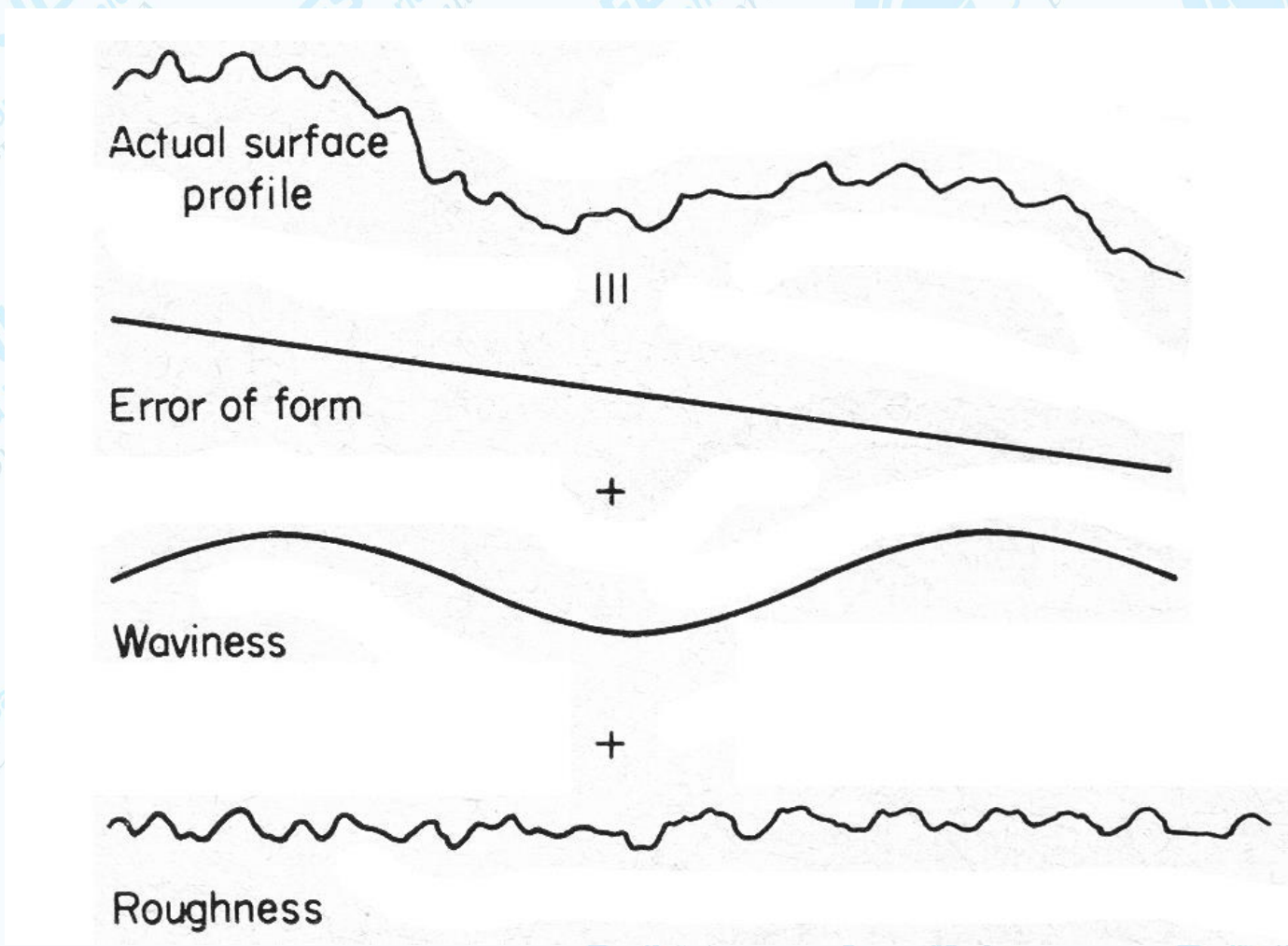
TEXTURA SUPERFICIAL



Macro e Micro



Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay), ANSI/ASME B46.1, ASME, New York



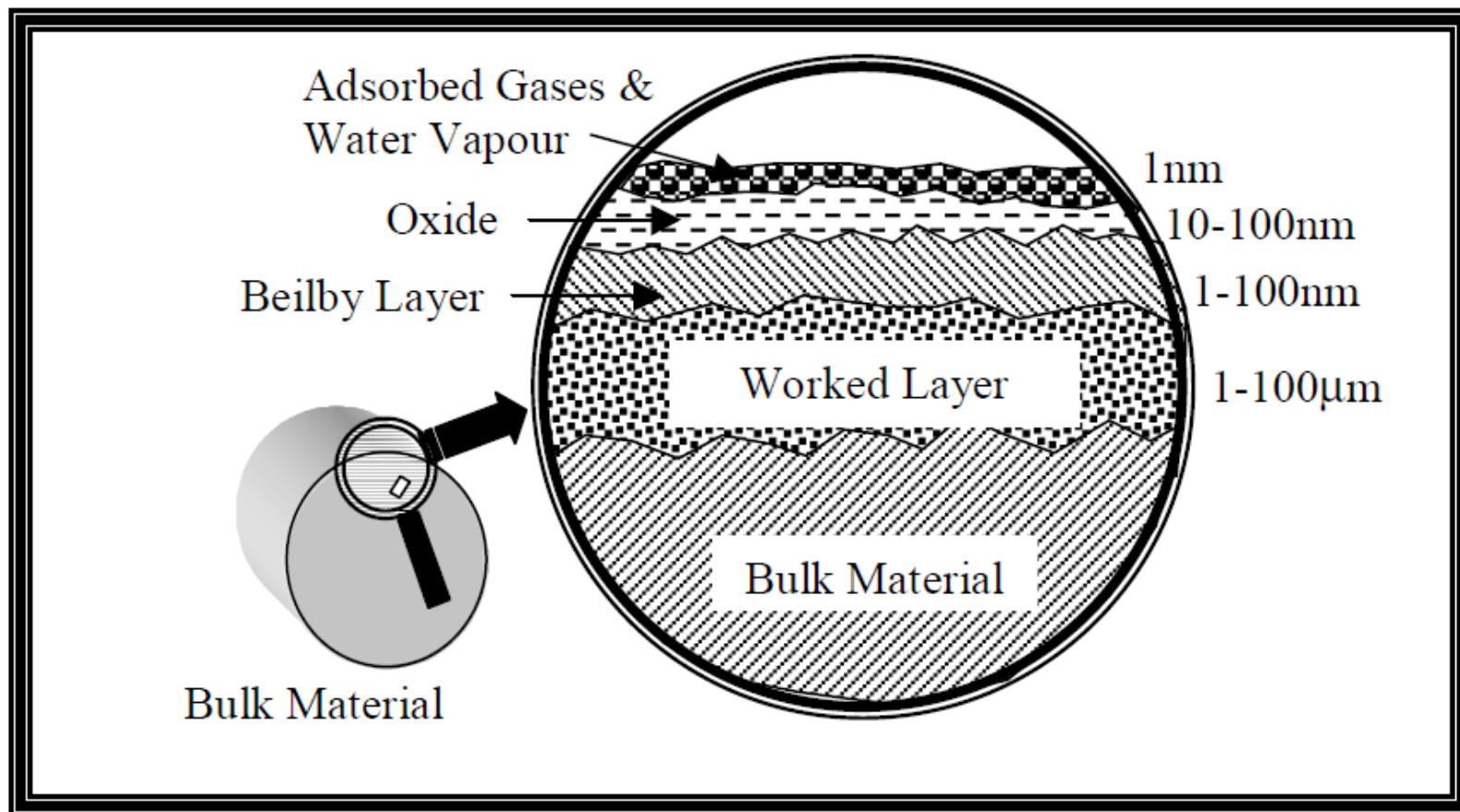
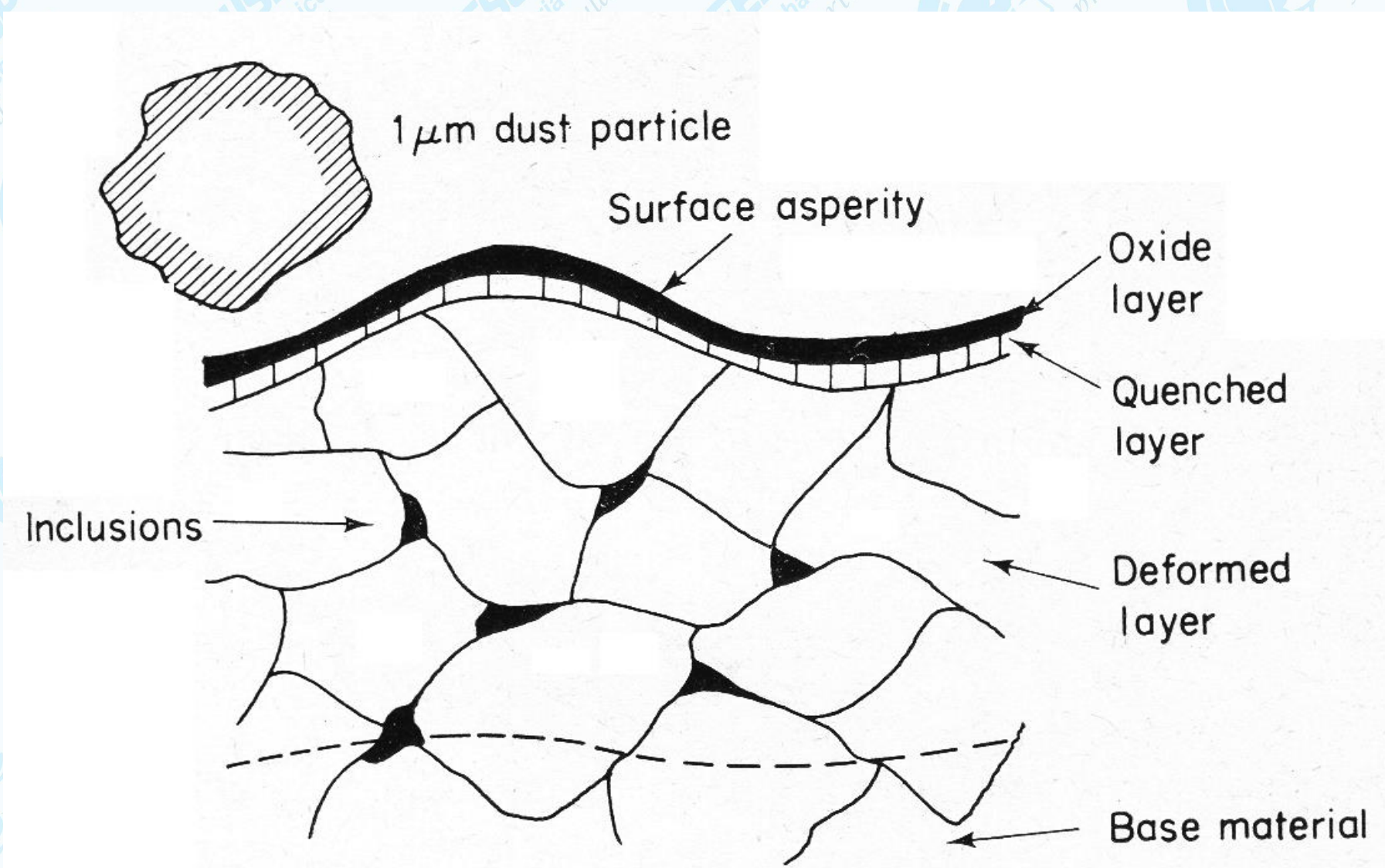


Figure 1.1, Schematic representation of a metal surface, adapted from **Bhushan and Gupta (1991)**



Halling, J. Introduction to Tribology. Wykeham Publications.1976. p.17

“Muitas das superfícies são quimicamente reativas. Com a exceção dos metais nobres, os metais e suas ligas formam camadas de superfície de óxido no ar, e em outros ambientes podem formar outras camadas (por exemplo, nitretos, sulfetos e cloretos).

Além da película de corrosão química, também existem filmes adsorvidos que são produzidas quer por adsorção física e química à partir do ambiente de: oxigênio, vapor de água e hidrocarbonetos. Ocasionalmente, do próprio ambiente, em superfícies metálicas e não metálicas, haverá um filme gorduroso ou oleoso.

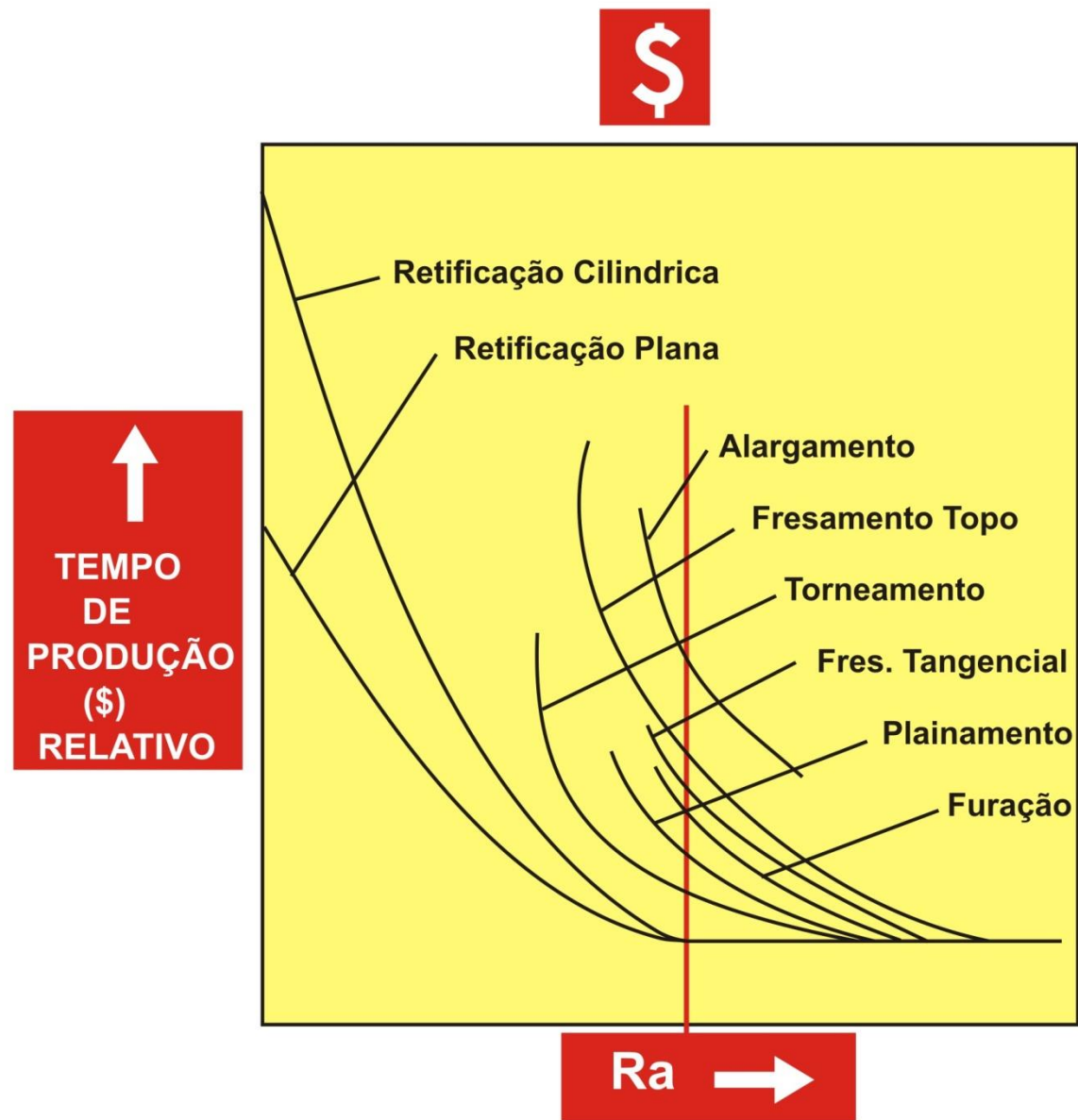
“Nenhum método de usinagem, por mais preciso que seja, pode produzir uma superfície plana molecularmente em materiais convencionais. Mesmo as menos rugosas, tais como aqueles obtidos por clivagem de alguns cristais, contém irregularidades onde as alturas excedem as distâncias inter-atômicas”.

(Bhushan, 1999a, b)

“Para aplicações tecnológicas, tanto a macro quanto micro/nanotopografia das superfícies (textura de superfície) são importantes “

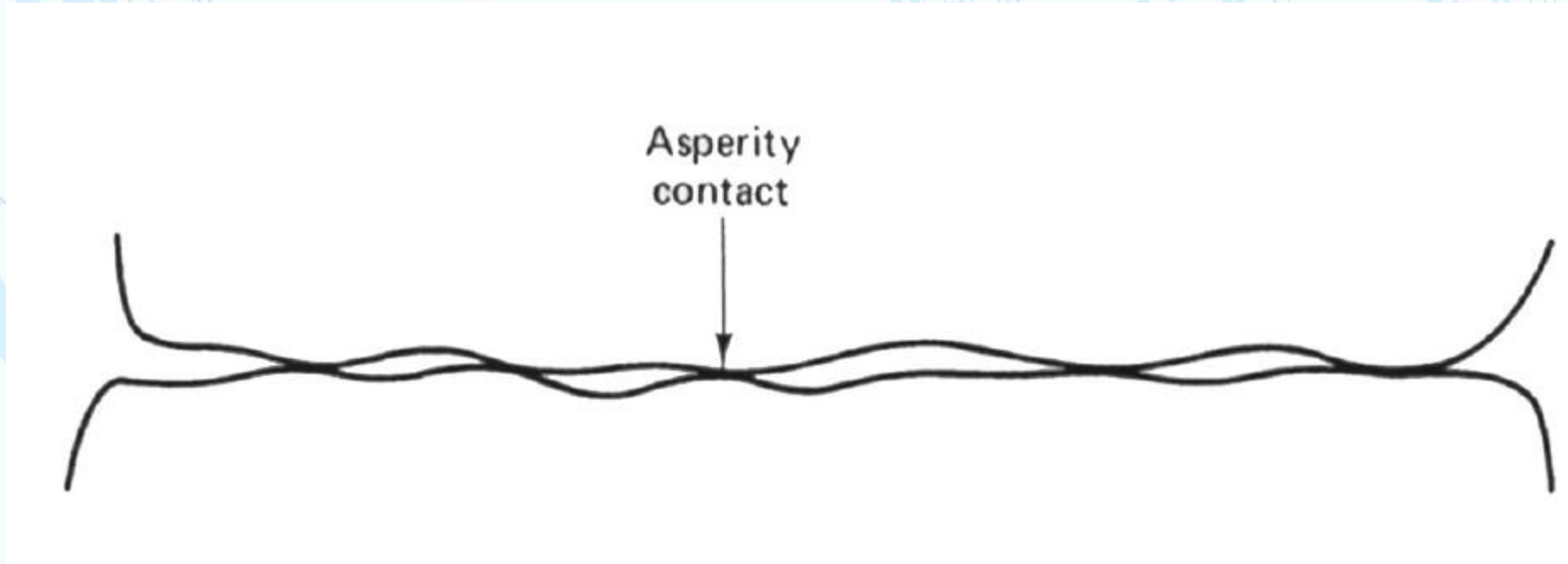
(Bhushan, 1999a, b)

Bhushan B. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques cap2. In: *MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. V1 Principles of Tribology. CRC. 2001*



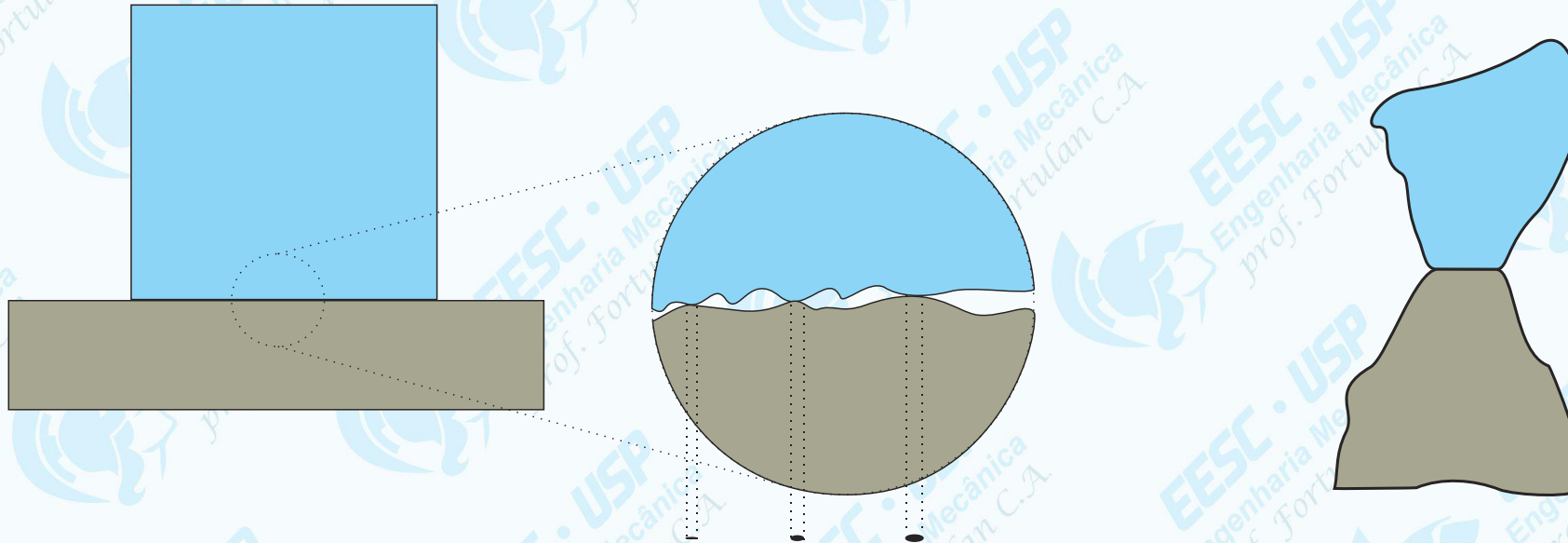
Contato

Contato em Macro-escala



Sub (2986), fig. 1.4

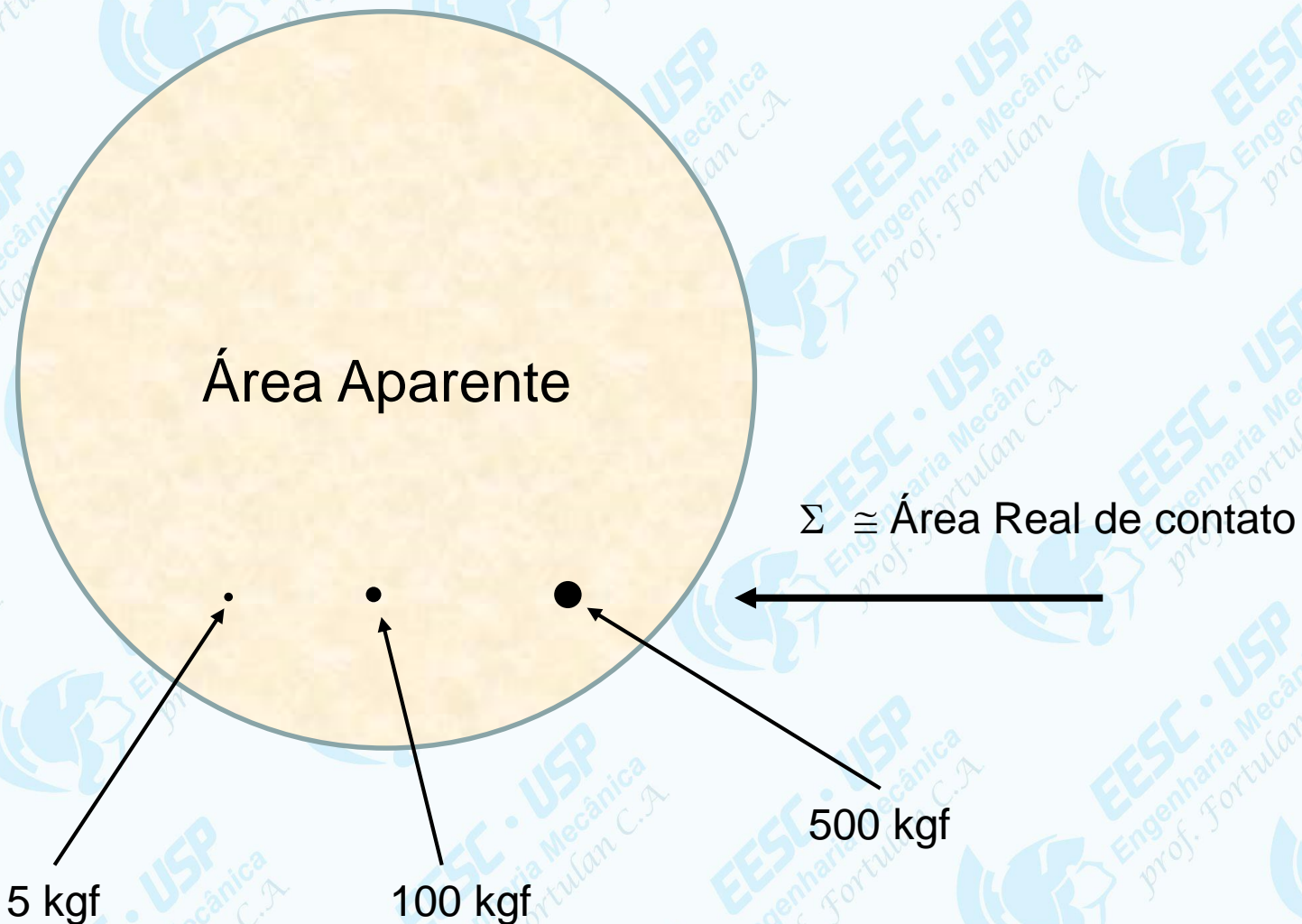
Área de contato real



- **Área de contato real** = Soma de todas as junções tipicamente representa de 1% - 0.0001% da área aparente de contato.

- **Junção** – Regiões em que há interação atômica devido à proximidade dos átomos de ambas superfícies

Área real de contato

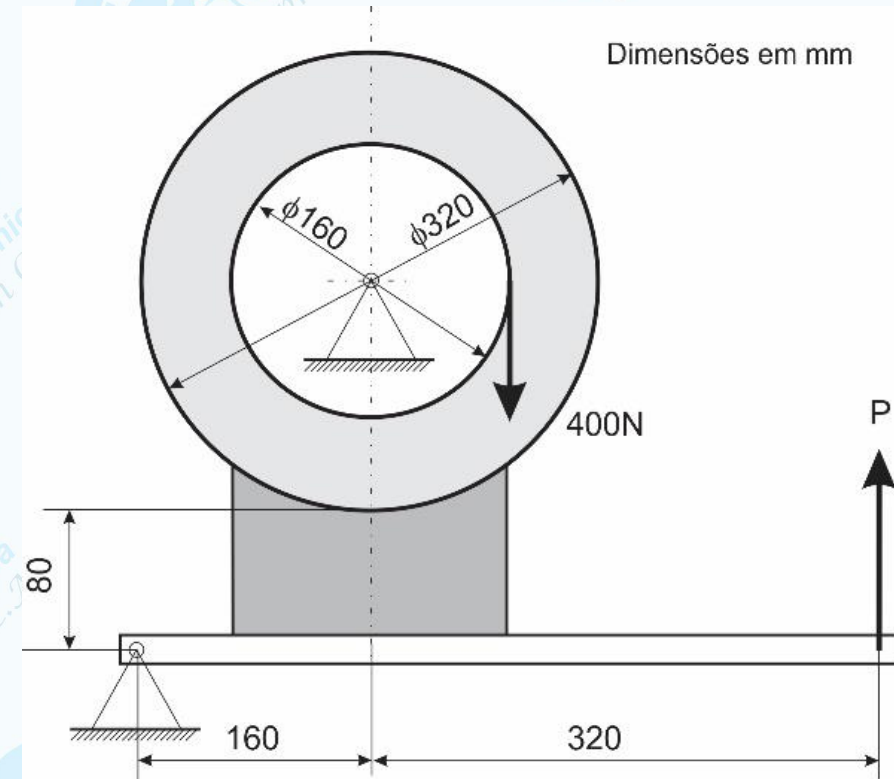


Questões

13.1. Em sua opinião uma superfície com extrema planicidade e fino acabamento superficial tem alta ou baixa área real de contato? Qual é sua influência no coeficiente de atrito?

13.2. Podem as asperidades servirem de depósito de material?

13.3. Uma força de 400 N é aplicada à polia mostrada na Figura abaixo. A polia é impedida de girar por uma força P aplicada ao final da alavanca do freio. Se o coeficiente de atrito na superfície do freio for 0,20, determine o valor de P .



Atrito

Atrito

- ✓ O que é o atrito?
- ✓ Como a força de atrito é gerada?
- ✓ O que é coeficiente de atrito?
- ✓ Como diminuir o atrito?
- ✓ Qual é o papel do lubrificante?

ATRITO

“Define-se” ATRITO como a **Força Resistente** tangencial à fronteira comum entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo move ou tende a se mover relativamente à superfície do outro.

Atrito é o resultado da dissipação de energia na interface em deslizamento.

O termo **ATRITO** é muitas vezes usado incorretamente para denotar **COEFICIENTE DE ATRITO**

Acredita-se que Leonardo da Vinci (1452-1519) tenha sido o primeiro a desenvolver os conceitos básicos de atrito, seguido por Amontons e posteriormente por Coulomb.

Leis clássicas sobre o atrito:

- 1ª A força de atrito é proporcional à carga;
- 2ª O coeficiente de atrito é independente da área de contato aparente;
- 3ª O coeficiente de atrito independe da velocidade de escorregamento;
- d) O coeficiente de atrito estático é maior que o cinético.

Curiosidades:

Leonardo da Vinci (1480): coeficiente de atrito igual para todos os materiais:

$$\mu=0,25;$$

Amontons (1699): postulou a 1ª e 2ª leis do atrito – constatando os achados de Leonardo. Igualmente a Leonardo porém $\mu=0,33$;

(- intertravamento das asperidades) – “Redescoberta”;

Coulomb (~1785): confirmou a 1ª e 2ª leis de atrito e postulou a 3ª lei do atrito;

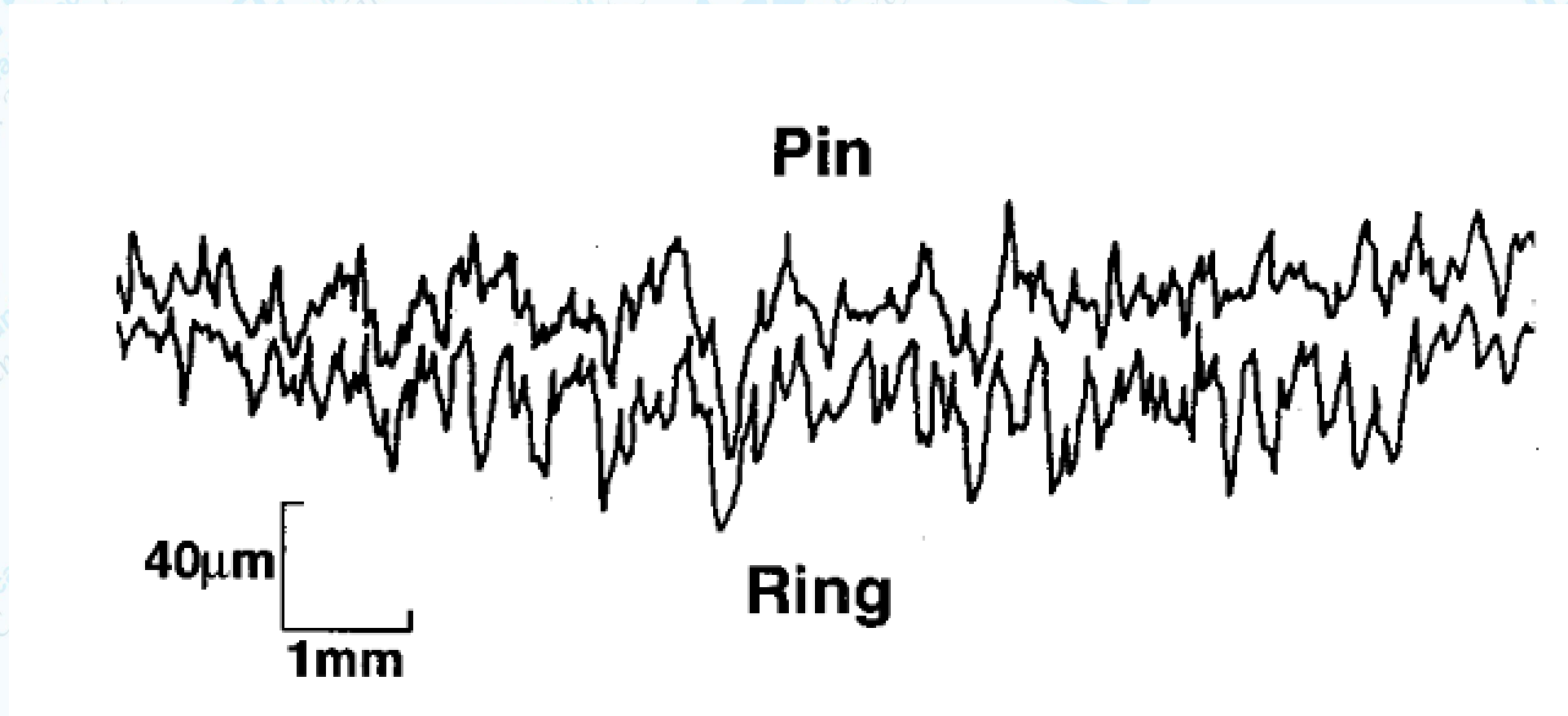
Euler (1750): concordou com Amontons $\mu=0,33$;

adesão

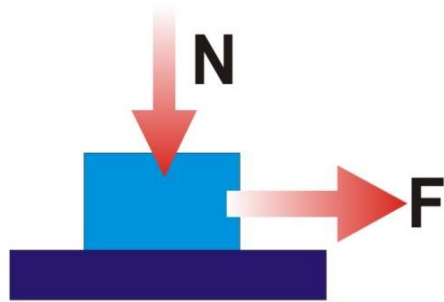
identação

Bowden e Tabor (1930 a 1970) – Teorias base da tribologia atual.

Intertravamento



COEFICIENTE DE ATRITO

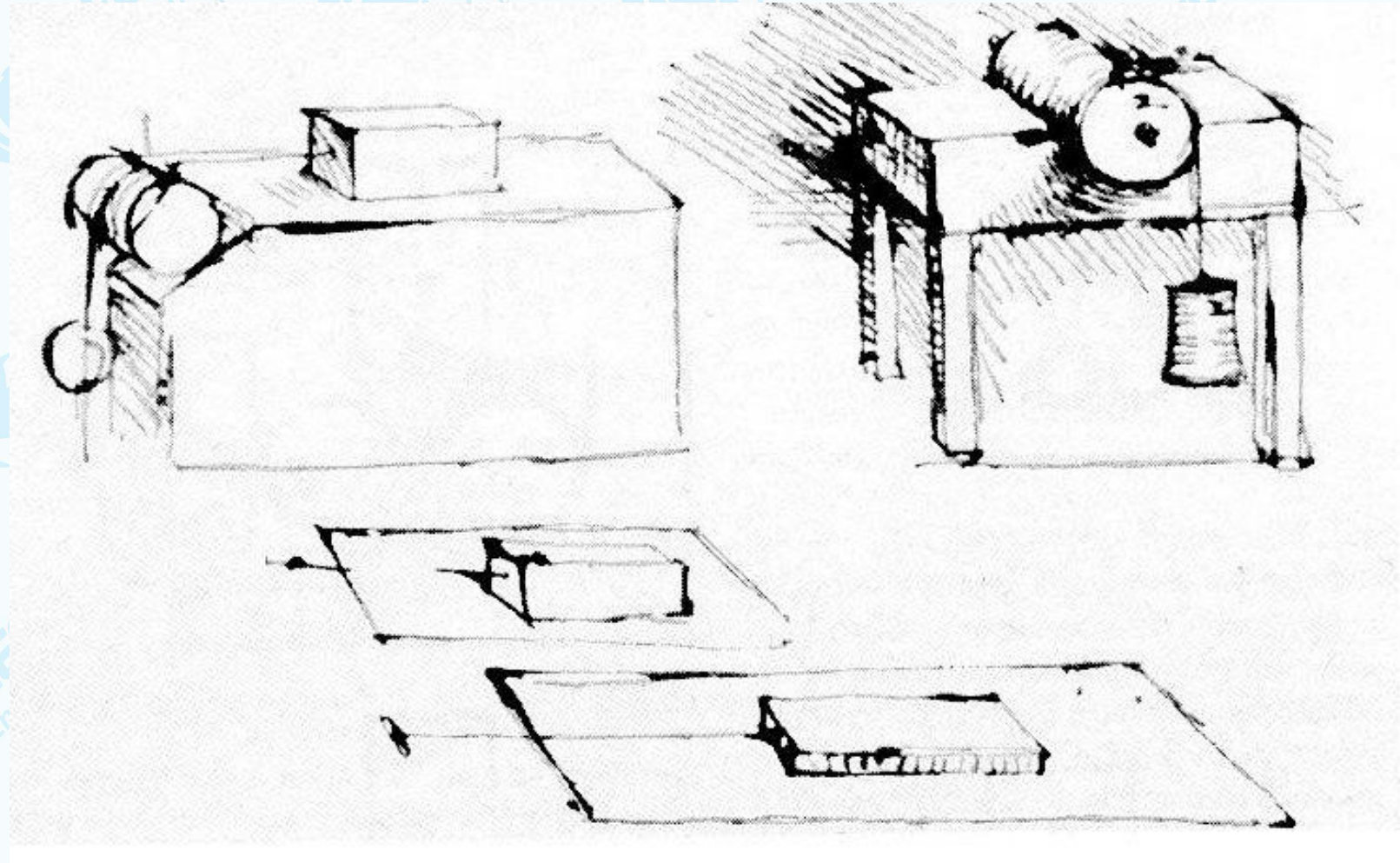


$$\text{Coeficiente de Atrito} = \frac{\text{Força Tangencial}}{\text{Força Normal}} = \frac{F}{N} = \mu$$

$F \propto N$ (Frequentemente) no caso de superfícies secas ou lube limite.

- ~~$F \propto N$~~ 1) No caso de superfícies separadas por filme de fluido ou lubrificante sólido.
- 2) Superfícies metálicas denudadas.
 - 3) Contatos individuais entre corpos deformados elasticamente.

Tribômetros de Leonardo Da Vinci



Qual é a origem do atrito?

- Deformação da superfície: energia da deformação?;
- Adesão de dois corpos: histerese da deformação não linear?;
 - modelo de adesão atômica?;
 - Van der Waals ?;
 - Forças capilares ?;
- Interação dos elétrons ?;

Na engenharia o **atrito** é afetado por:

1. Presença de partículas de desgaste e/ou externamente introduzidas na interface deslizante;
2. Dureza relativa dos materiais em contato;
4. As condições ambientais, tais como temperatura e lubrificantes;
5. Topografia da superfície;
6. Microestrutura ou morfologia dos materiais;
7. Área de contato aparente;
8. Cinemática das superfícies em contacto (isto é, direção e magnitude do movimento relativo entre as superfícies).

Materials and Material Combinations		Static Frictional Coefficient - μ_s	
		Clean and Dry Surfaces	Lubricated and Greasy Surfaces
Aluminum	Aluminum	1.05 - 1.35	0.3
Aluminum-bronze	Steel	0.45	
Aluminum	Mild Steel	0.61	
Brake material	Cast iron	0.4	
Brake material	Cast iron (wet)	0.2	
Brass	Steel	0.35	0.19
Brass	Cast Iron	0.3 ¹⁾	
Brick	Wood	0.6	
Bronze	Steel		0.16
Bronze	Cast Iron	0.22 ¹⁾	
Bronze - sintered	Steel		0.13
Cadmium	Cadmium	0.5	0.05
Cadmium	Chromium	0.41	0.34
Cadmium	Mild Steel	0.46 ¹⁾	
Cast Iron	Cast Iron	1.1, 0.15 ¹⁾	0.07 ¹⁾
Cast Iron	Oak	0.49 ¹⁾	0.075 ¹⁾
Cast iron	Mild Steel	0.4, 0.23 ¹⁾	0.21, 0.133 ¹⁾
Carbon (hard)	Carbon	0.16	0.12 - 0.14
Carbon	Steel	0.14	0.11 - 0.14
Chromium	Chromium	0.41	0.34
Copper-Lead alloy	Steel	0.22	
Copper	Copper	1	0.08
Copper	Cast Iron	1.05, 0.29 ¹⁾	
Copper	Mild Steel	0.53, 0.36 ¹⁾	0.18 ¹⁾
Diamond	Diamond	0.1	0.05 - 0.1
Diamond	Metal	0.1 - 0.15	0.1
Glass	Glass	0.9 - 1.0, 0.4 ¹⁾	0.1 - 0.6, 0.09-0.12 ¹⁾
Glass	Metal	0.5 - 0.7	0.2 - 0.3
Glass	Nickel	0.78	0.56
Graphite	Steel	0.1	0.1
Graphite	Graphite (in vacuum)	0.5 - 0.8	
Graphite	Graphite	0.1	0.1
Hemp rope	Timber	0.5	
Ice	Wood	0.05	
Iron	Iron	1.0	0.15 - 0.20
Lead	Cast Iron	0.43 ¹⁾	
Leather	Oak	0.61, 0.52 ¹⁾	
Leather	Metal	0.4	0.2
Leather	Wood	0.3 - 0.4	
Leather	Clean Metal	0.6	
Leather fiber	Cast iron	0.31	
Leather fiber	Aluminum	0.30	
Magnesium	Magnesium	0.6	0.08

Nickel	Nickel	0.7 - 1.1, 0.53 ¹⁾	0.28, 0.12 ¹⁾
Nickel	Mild Steel	0.64 ¹⁾	0.178 ¹⁾
Nylon	Nylon	0.15 - 0.25	
Oak	Oak (parallel grain)	0.62, 0.48 ¹⁾	
Oak	Oak (cross grain)	0.54, 0.32 ¹⁾	0.072 ¹⁾
Paper	Cast Iron	0.20	
Phosphor-bronze	Steel	0.35	
Platinum	Platinum	1.2	0.25
Plexiglas	Plexiglas	0.8	0.8
Plexiglas	Steel	0.4-0.5	0.4 - 0.5
Polystyrene	Polystyrene	0.5	0.5
Polystyrene	Steel	0.3-0.35	0.3 - 0.35
Polythene	Steel	0.2	0.2
Polystyrene	Polystyrene	0.5	0.5
Rubber	Cardboard	0.5 - 0.8	
Rubber	Dry Asphalt	0.9 (0.5 - 0.8) ¹⁾	
Rubber	Wet Asphalt	0.25 - 0.75 ¹⁾	
Rubber	Dry Concrete	0.6 - 0.85 ¹⁾	
Rubber	Wet Concrete	0.45 - 0.75 ¹⁾	
Silver	Silver	1.4	0.55
Sapphire	Sapphire	0.2	0.2
Silver	Silver	1.4	0.55
Steel	Steel	0.8	0.16
Straw Fiber	Cast Iron	0.26	
Straw Fiber	Aluminum	0.27	
Tarred fiber	Cast Iron	0.15	
Tarred fiber	Aluminum	0.18	
Teflon	Teflon	0.04	0.04, 0.04 ¹⁾
Teflon	Steel	0.05 - 0.2	
Tungsten Carbide	Steel	0.4-0.6	0.1 - 0.2
Tungsten Carbide	Tungsten Carbide	0.2 - 0.25	0.12
Tungsten Carbide	Copper	0.35	
Tungsten Carbide	Iron	0.8	
Tin	Cast Iron	0.32 ¹⁾	
Tire, dry	Road, dry	1	
Tire, wet	Road, wet	0.2	
Wood	Clean Wood	0.25 - 0.5	
Wood	Wet Wood	0.2	
Wood	Clean Metal	0.2 - 0.6	
Wood	Wet Metals	0.2	
Wood	Concrete	0.62	
Wood	Brick	0.6	
	Wet snow	0.14, 0.1 ¹⁾	
Wood - waxed	Dry snow	0.04 ¹⁾	
Zinc	Cast Iron	0.85, 0.21 ¹⁾	
Zinc	Zinc	0.6	0.04

Coefficient of Friction Values for Clean Surfaces by Ron Kurtus(2005)

Coefficient of Sliding Friction (clean surfaces)

Material 1	Material 2	Static	Kinetic
Aluminum	Mild Steel	0.61	0.47
Brake Material	Cast Iron	0.4	-
Brake Material	Cast Iron (wet)	0.2	-
Brass	Cast Iron	-	0.3
Brick	Wood	0.6	-
Bronze	Cast Iron	-	0.22
Bronze	Steel	-	-
Cadmium	Cadmium	0.5	-
Cadmium	Mild Steel	-	0.46
Cast Iron	Cast Iron	1.1	0.15
Cast Iron	Oak	-	0.49
Chromium	Chromium	0.41	-
Copper	Cast Iron	1.05	0.29
Copper	Copper	1.0	-
Copper	Mild Steel	0.53	0.36
Copper-Lead Alloy	Steel	0.22	-
Diamond	Diamond	0.1	-
Diamond	Metal	0.1 - 0.15	-
Glass	Glass	0.9 - 1.0	0.4
Glass	Metal	0.5 - 0.7	-
Glass	Nickel	0.78	0.56
Graphite	Graphite	0.1	-
Graphite	Steel	0.1	-
Graphite (in vacuum)	Graphite (in vacuum)	0.5 - 0.8	-
Hard Carbon	Hard Carbon	0.16	-
Hard Carbon	Steel	0.14	-
Iron	Iron	1.0	-
Lead	Cast Iron	-	0.43
Leather	Wood	0.3 - 0.4	-
Leather	Metal (clean)	0.6	-
Leather	Metal (wet)	0.4	-
Leather	Oak (parallel grain)	0.61	0.52
Zinc	Zinc	0.6	-
Zinc	Cast Iron	0.85	0.21
Magnesium	Magnesium	0.6	-
Nickel	Nickel	0.7 - 1.1	0.53
Nickel	Mild Steel	-	0.64
Nylon	Nylon	0.15 - 0.25	-
Oak	Oak (parallel grain)	0.62	0.48
Oak	Oak (cross grain)	0.54	0.32
Platinum	Platinum	1.2	-
Plexiglas	Plexiglas	0.8	-
Plexiglas	Steel	0.4 - 0.5	-
Polystyrene	Polystyrene	0.5	-

Polystyrene	Steel	0.3 - 0.35	-
Polythene	Steel	0.2	-
Rubber	Asphalt (dry)	-	0.5 - 0.8
Rubber	Asphalt (wet)	-	0.25 - 0.75
Rubber	Concrete (dry)	-	0.6 - 0.85
Rubber	Concrete (wet)	-	0.45 - 0.75
Sapphire	Sapphire	0.2	-
Silver	Silver	1.4	-
Sintered Bronze	Steel	-	-
Solids	Rubber	1.0 - 4.0	-
Steel	Aluminum Bros	0.45	-
Steel	Brass	0.35	-
Steel (mild)	Brass	0.51	0.44
Steel (mild)	Cast Iron	-	0.23
Steel	Cast Iron	0.4	-
Steel	Copper Lead Alloy	0.22	-
Steel (hard)	Graphite	0.21	-
Steel	Graphite	0.1	-
Steel (mild)	Lead	0.95	0.95
Steel (mild)	Phos. Bros	-	0.34
Steel	Phos Bros	0.35	-
Steel (hard)	Polythene	0.2	-
Steel (hard)	Polystyrene	0.3 - 0.35	-
Steel (Mild)	Steel (mild)	0.74	0.57
Steel (hard)	Steel (hard)	0.78	0.42
Steel	Zinc (plated on steel)	0.5	0.45
Teflon	Steel	0.04	-
Teflon	Teflon	0.04	-
Tin	Cast Iron	-	.32
Tungsten Carbide	Tungsten Carbide	0.2 - 0.25	-
Tungsten Carbide	Steel	0.4 - 0.6	-
Tungsten Carbide	Copper	0.35	-
Tungsten Carbide	Iron	0.8	-
Wood	Wood (clean)	0.25 - 0.5	-
Wood	Wood (wet)	0.2	-
Wood	Metals (clean)	0.2 - 0.6	-
Wood	Metals (wet)	0.2	-
Wood	Brick	0.6	-
Wood	Concrete	0.62	-
Zinc	Zinc	0.6	-
Zinc	Cast Iron	0.85	0.21

Questionamentos:

- 13.2.1. Duas superfícies em contato relativo, de um mesmo material, idealmente plana e lisa tem baixo ou alto coeficiente de atrito?
- 13.2.2. Em pista seca, qual automóvel tem melhor frenagem: com pneus carecas ou riscados?
- 13.2.3. Porque nos livros de Elemaq os coeficiente de atrito (estático) entre aço-aço está entre 0,15 a 0,25 e com filme de óleo esta entre ~ 0,11 -0,17? compare com a tabela anterior.
- 13.2.4. Em que base científica tribológica é baseado a freio ABS?
- 13.2.5. E ao controle de tração?
- 13.2.6. O que é feito para que as locomotivas não escorreguem em aclave em dias de chuva.

Desgaste

DESGASTE

Perda progressiva de material da superfície operacional de um corpo, como resultado do movimento relativo da(s) superfície(s).



**A vida útil dos componentes mecânicos é limitada pela quebra,
pela obsolescência
e pelo **DESGASTE**.**

Desgaste

É um dos três problemas industriais mais frequentesfadiga ... e
corrosão

- ✓ raramente catastrófico;
 - ✓ reduz a eficiência de operação (perda de potência);
 - ✓ consumo de lubrificantes;
 - ✓ substituição de componentes.
-
- ✓ Como os materiais se desgastam?
 - ✓ Qual é o efeito da carga aplicado no atrito e no desgaste?
 - ✓ Como diminuir a taxa de desgaste?

DESGASTE

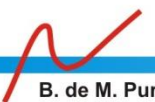
Praticamente, tudo que é feito pelo homem, se desgasta.

Acrescente-se a necessidade de compreender e controlar o processo de desgaste.



CONFIABILIDADE

DESGASTE ÚTIL
?



DESGASTE ÚTIL

?

Amaciamento (*Running in*),

Corte de Metais (Retificação, Lapidção, Polimento...),

Escrita...

...

Tipos de desgaste:

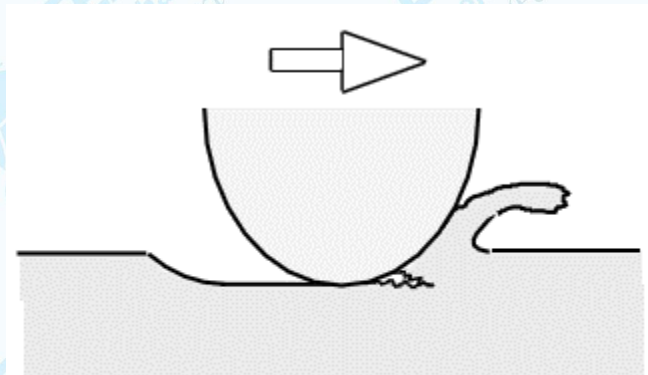
Abrasivo;

Adesivo;

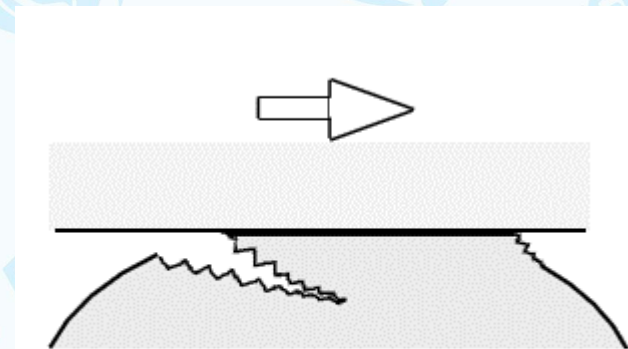
Devido à fadiga;

Corrosivo (oxidação,

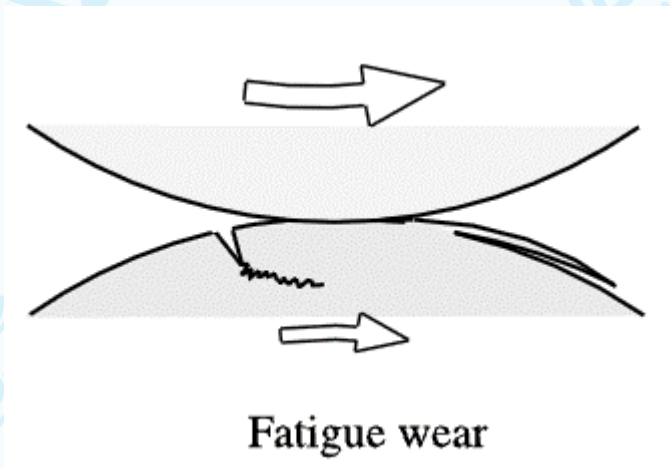
....ou tribo-químicos)



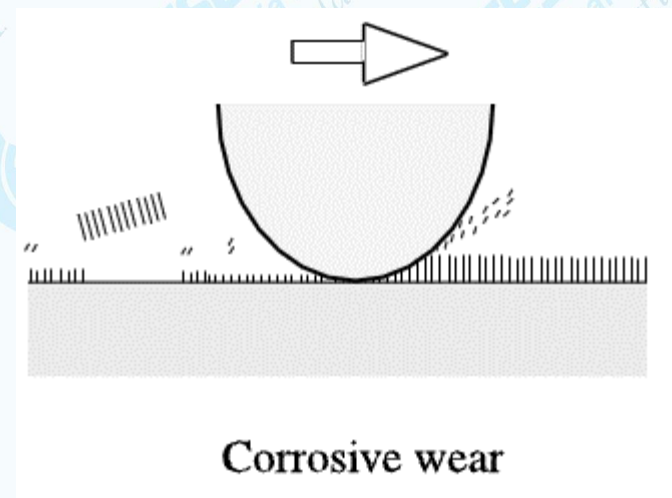
Abrasive wear



Adhesive wear

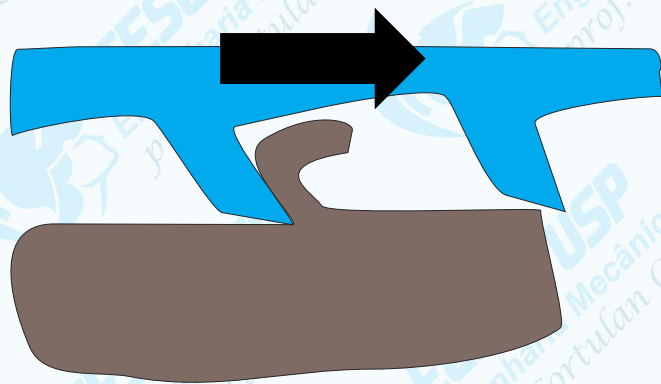


Fatigue wear

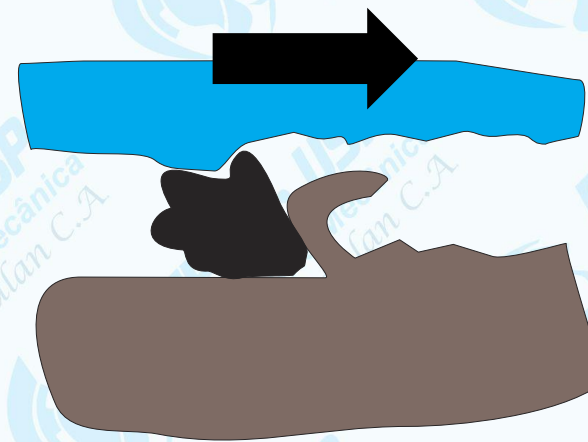


Corrosive wear

Desgaste Abrasivo

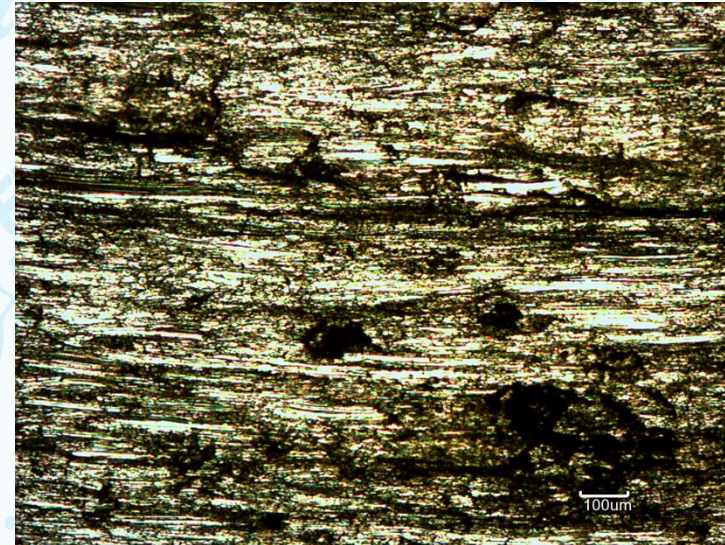
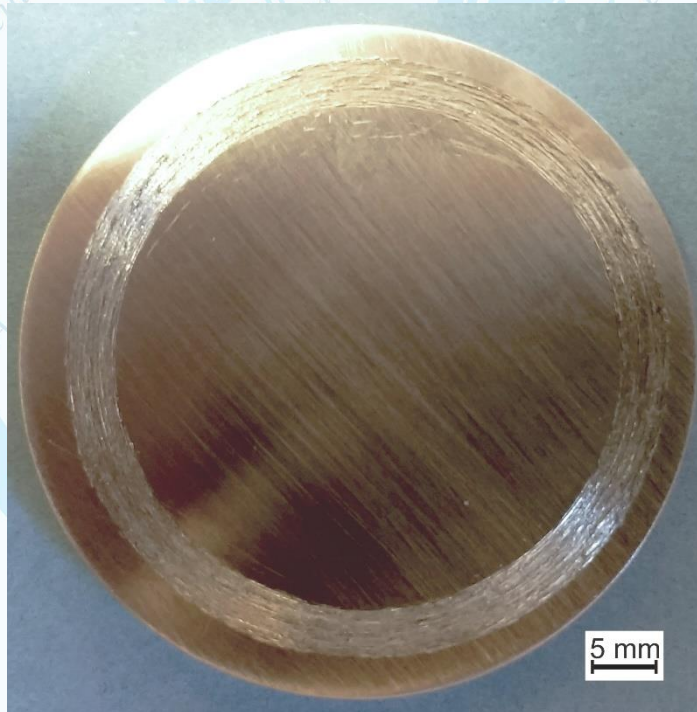


À dois corpos

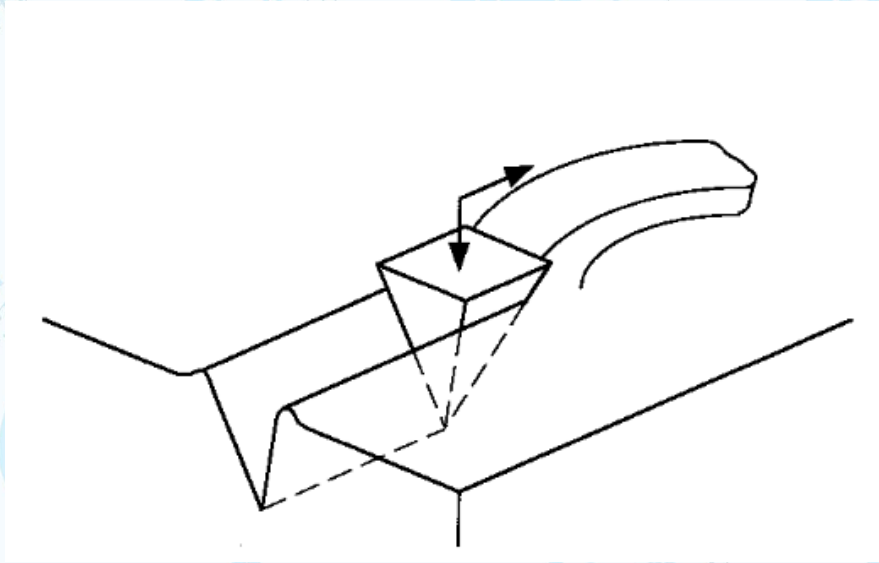


À três corpos

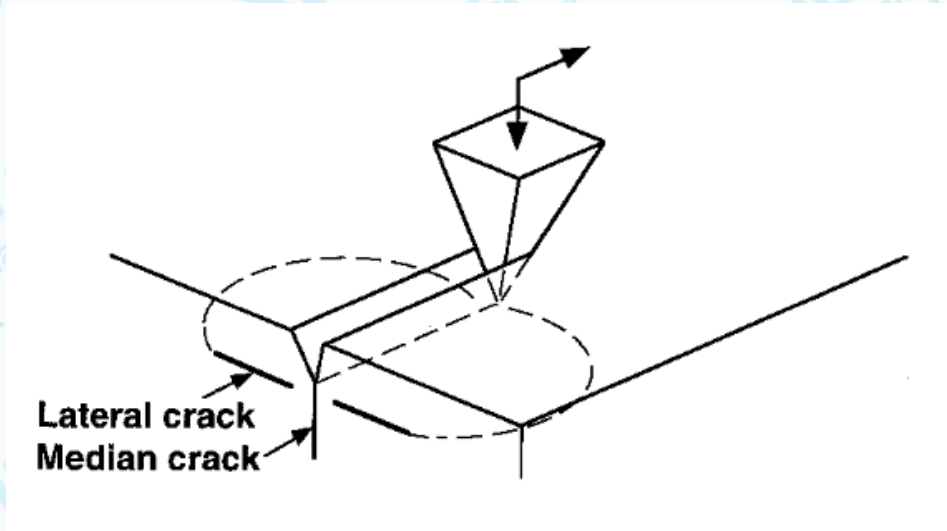
Pin-on-disk: AISI316/AISI316/areia



Desgaste Abrasivo



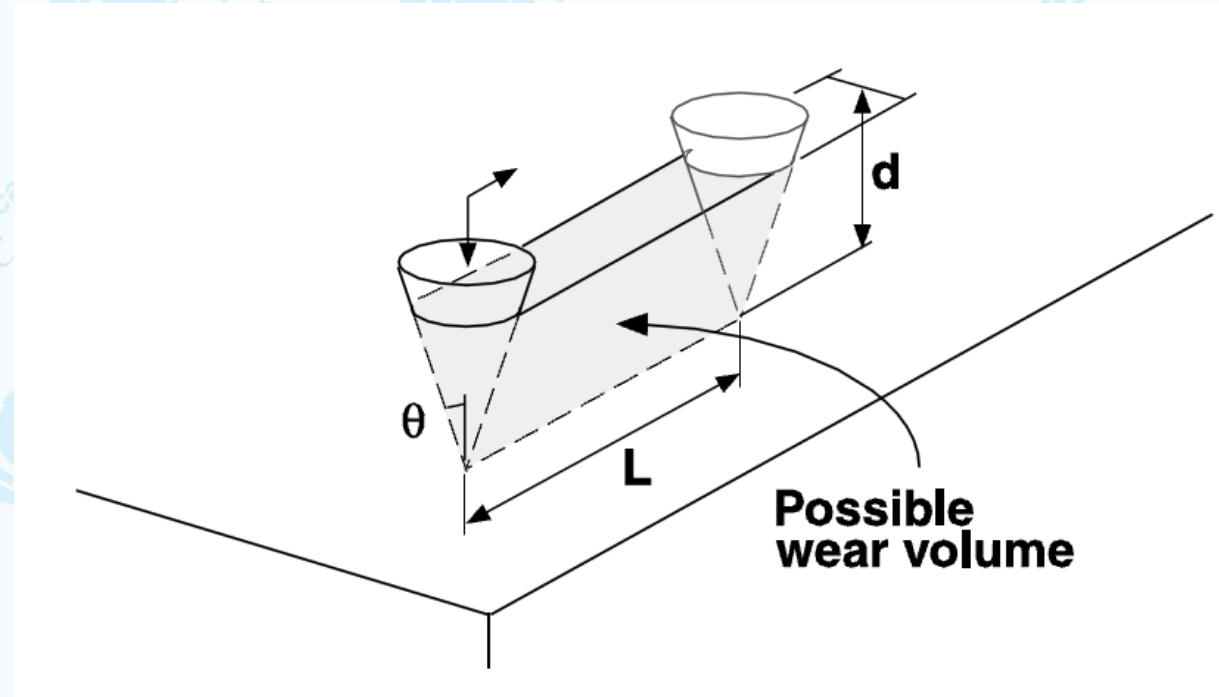
Regime dúctil



Regime frágil

Kato K, Adachi K, Wear Mechanisms. cap7. In: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. V1 Principles of Tribology. CRC. 2001

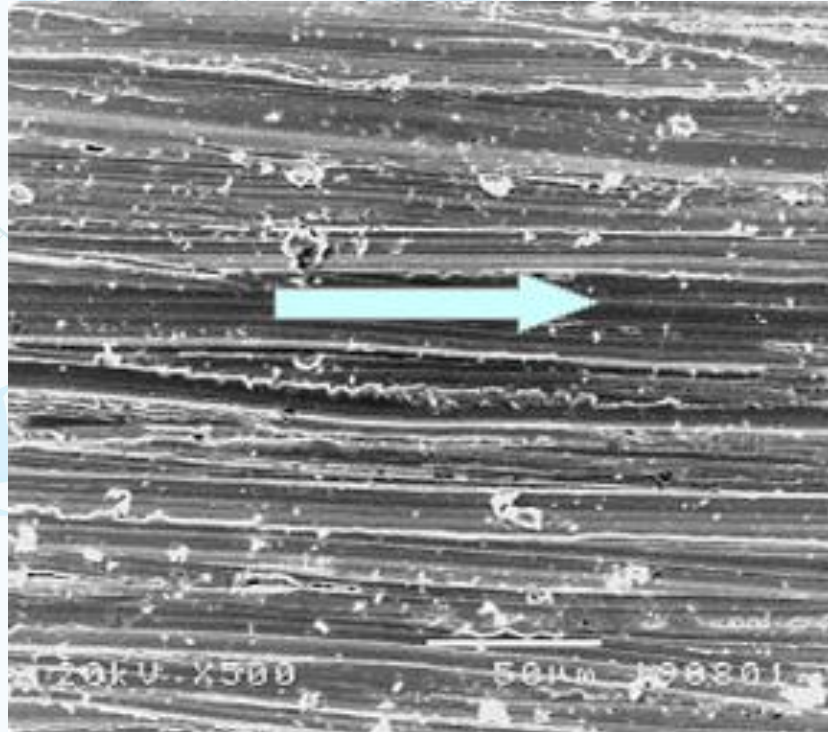
Modelo típico de desgaste abrasivo no regime dúctil



$$V = d^2 \cdot \tan \theta \cdot L$$

$$V = K_{ab} \cdot \frac{WL}{H}$$

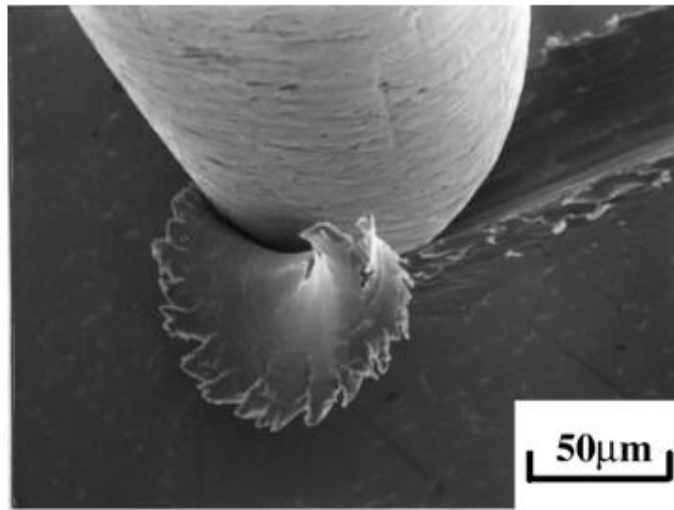
Desgaste abrasivo - Superfície



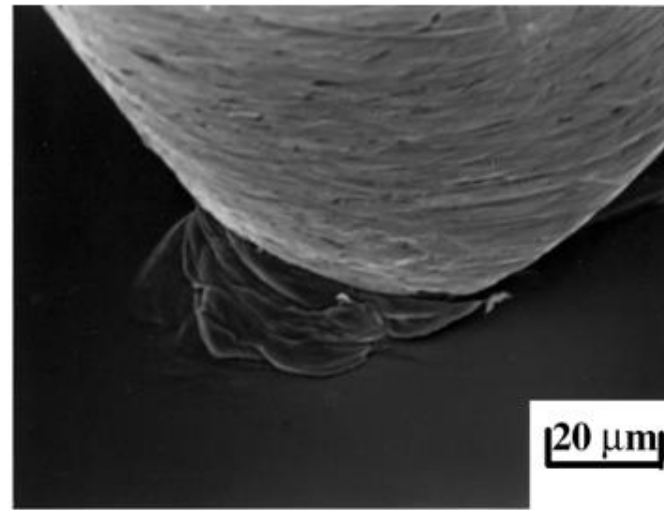
Superfície de aço desgastada por abrasão

C. X. Li, Wear and Wear Mechanism. Surface Engineering

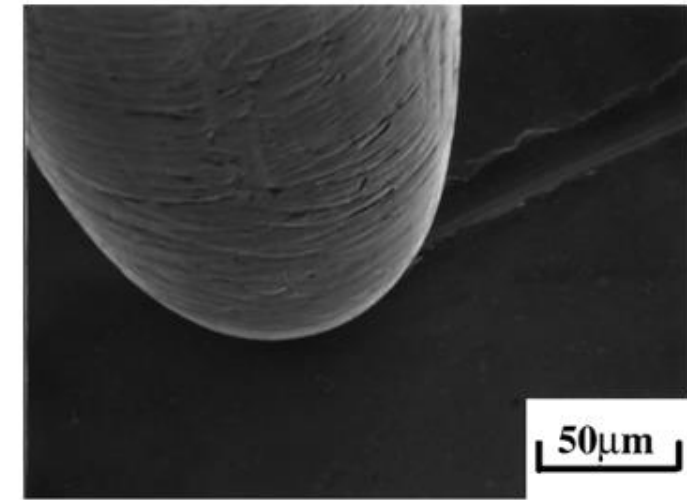
http://emrtk.uni-iskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_and_wear_mechanism.htm



a



b



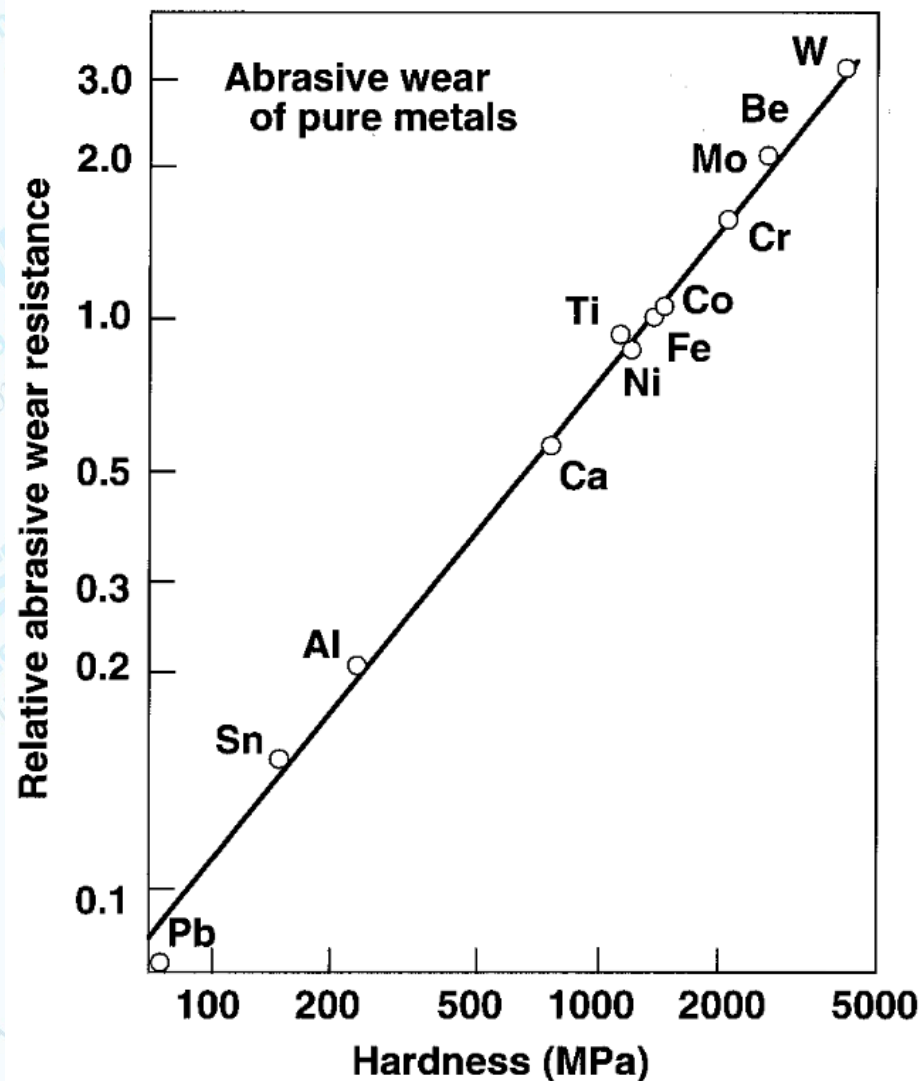
c

a) Pino sobre placa de bronze (corte);

b) Pino sobre placa de aço inoxidável (edge-forming) cunha devido ao cisalhamento;

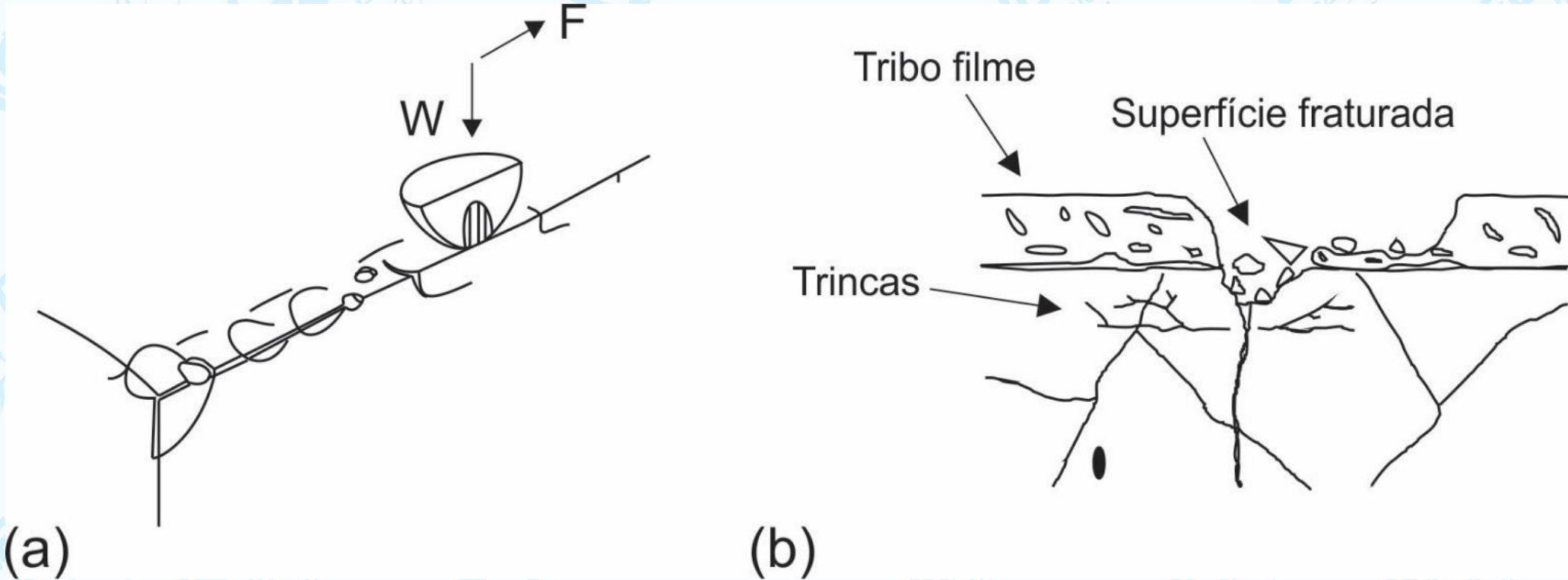
c) Pino sobre de placa de bronze (ploughing) (sulcamento – deslocamento de material).

Resistência ao desgaste abrasivo de metais puros



Kato K, Adachi K, Wear Mechanisms. cap7. In: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. V1 Principles of Tribology. CRC. 2001

Desgaste abrasivo de cerâmicas



Modelagem

$$V = \alpha \frac{W^{9/8}}{K_c^{1/2} H^{5/8}} \left(\frac{E}{H}\right)^{4/5} l$$

KATO (2003)

$$V = \alpha \frac{1}{k_{IC}^{3/4} H^{1/2}}$$

Wayne et. al (1994)

V , volume desgastado;

W carga normal;

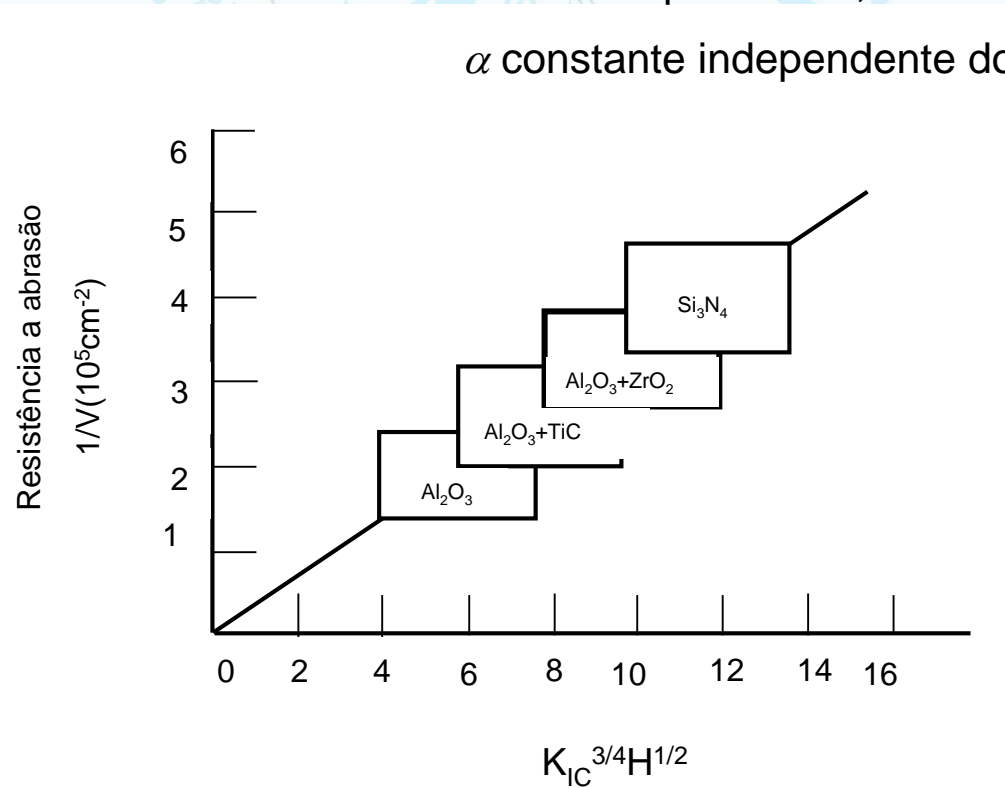
H é a dureza;

K_c tenacidade;

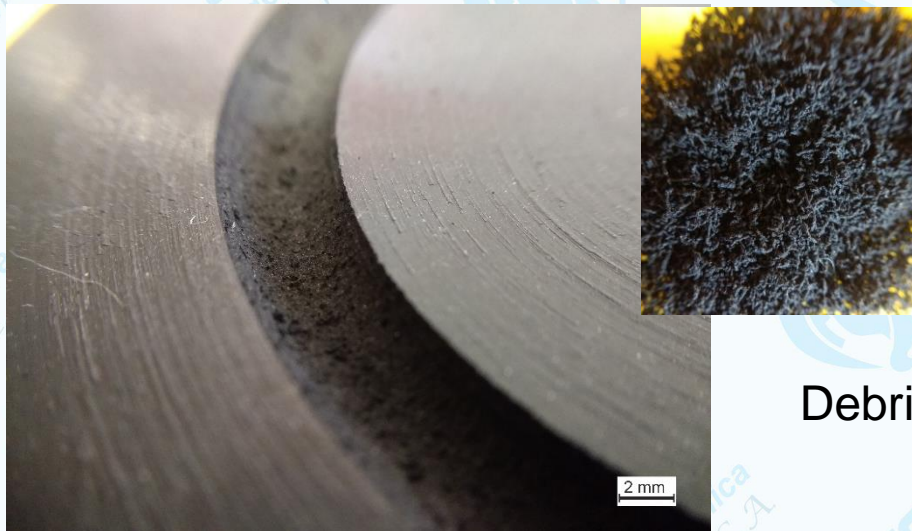
E módulo elástico;

l distância percorrida; e

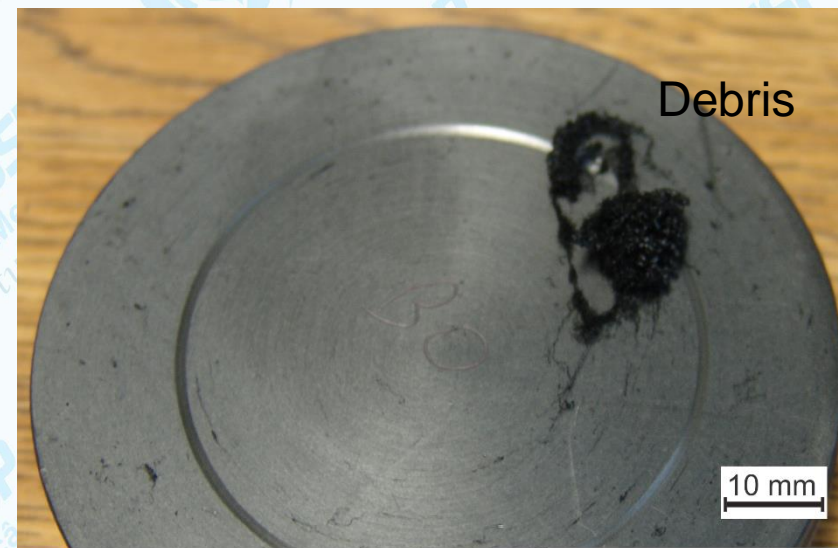
α constante independente do material



Desgaste abrasivo em polímeros



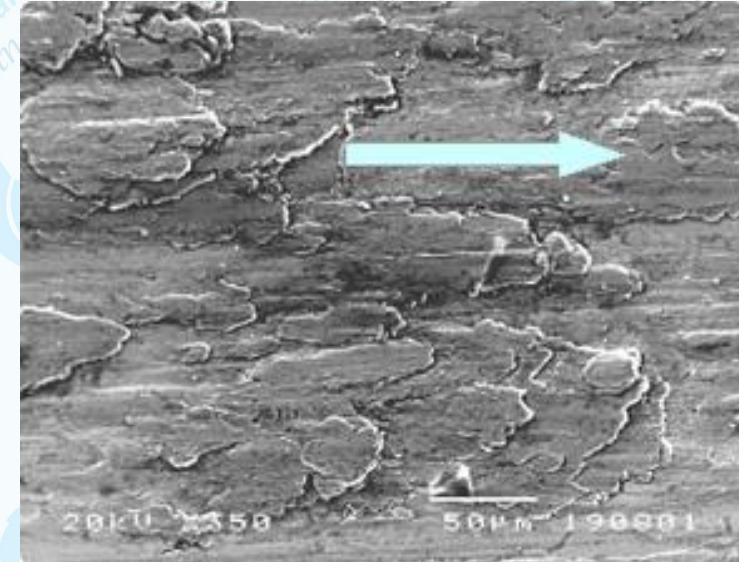
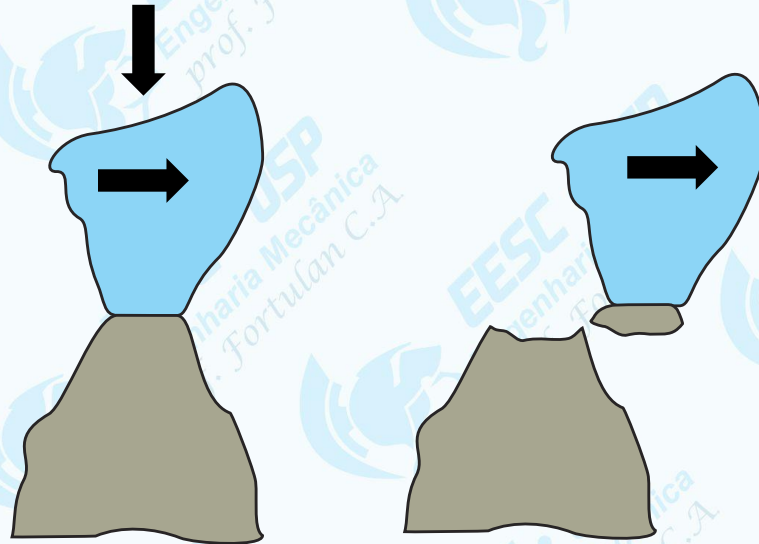
Borracha Nitrílica



TecaPeek

Pin on disk - 1000m à 10N

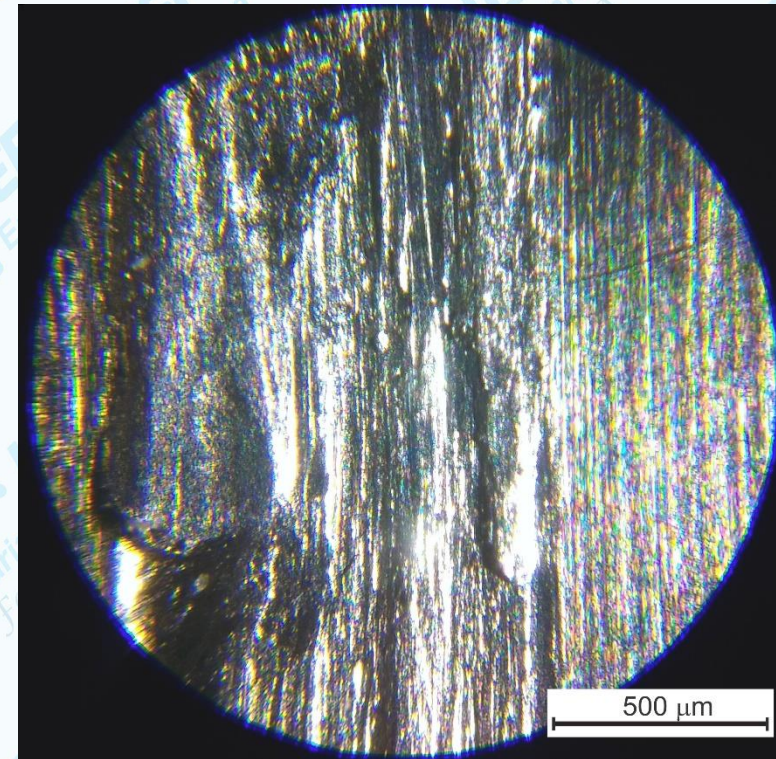
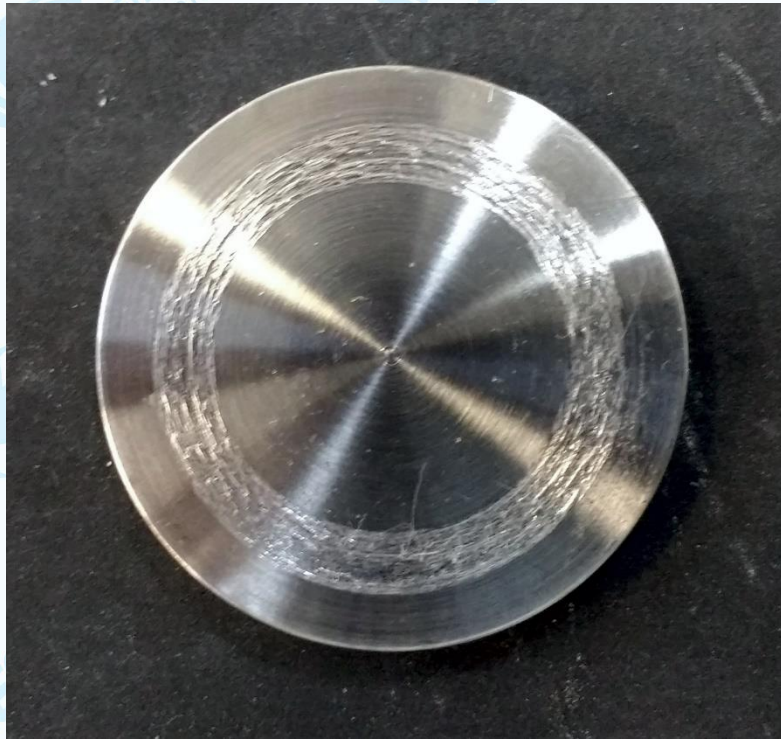
Desgaste Adesivo



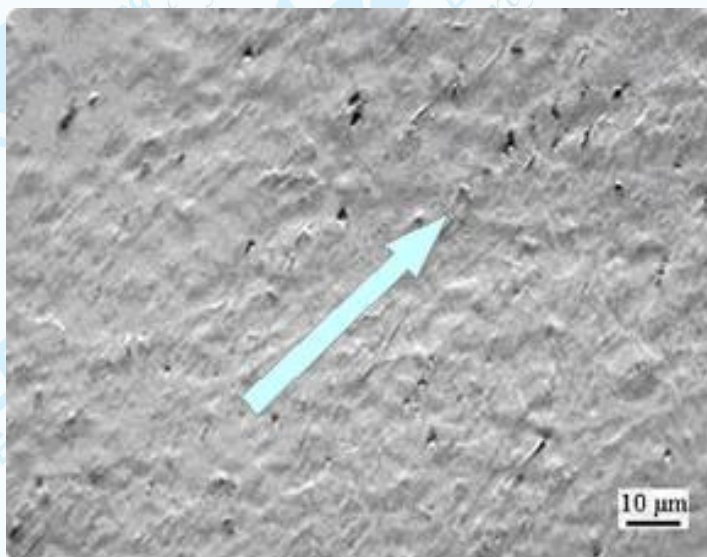
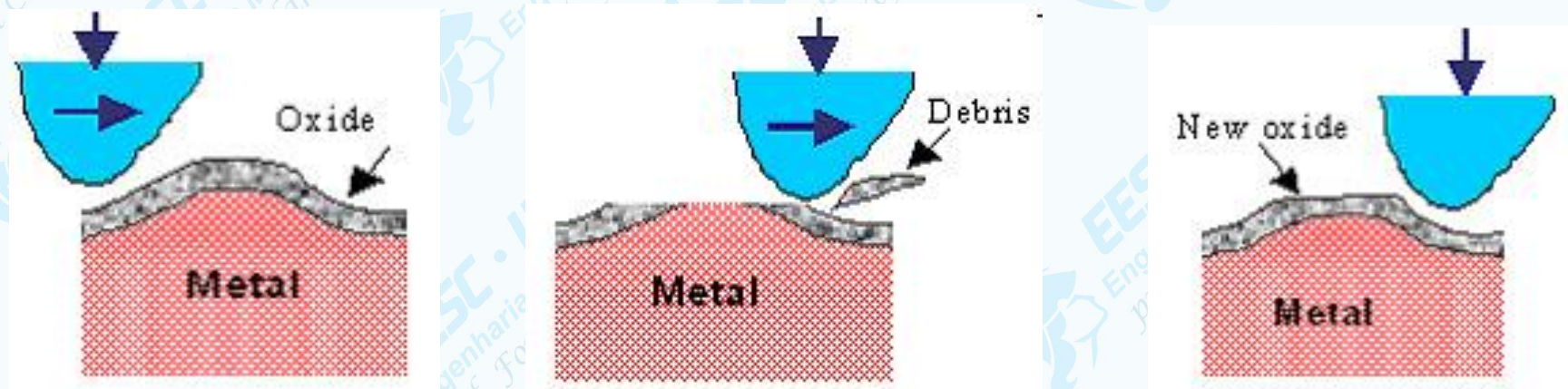
Camadas de titânio sobre superfície de aço

C. X. Li, Wear and Wear Mechanism. Surface Engineering
http://emrtk.uni-iskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_and_wear_mechanism.htm

Pin-on-disc: AISI316/ AISI316



Desgaste Corrosivo (oxidação ou tribo-químicos)



Superfície de uma liga de cobalto desgastada por oxidação

Desgaste por fadiga

- ✓ Pista de rolamento;
- ✓ Dentes de engrenagem.



Questões:

13.3.1. Descreva e discuta os diferentes tipos de desgaste?

13.3.2. Descreva em poucas palavras?

- Desgaste Abrasivo;
- Desgaste por *fretting*;
- Efeito da dureza na taxa de desgaste abrasivo;
- Influência do tamanho da partícula abrasiva na taxa de desgaste abrasivo;

13.3.4. Comente a equação e como medir o desgaste adesivo.

13.3.3. Explique as teorias *Stick-slip* e atração molecular.

13.3.4. Pense quais são as propriedades e características superficiais mais importantes na determinação da resistência ao desgaste de um componente.

13.3.5. Diferentes métodos são utilizados na prática para aumentar a resistência ao desgaste, quais seus nomes? Na sua opinião qual é a mais efetiva?

Referências

- ✓ H. Peter Jost. Lubrication. Report.
- ✓ Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay), ANSI/ASME B46.1, ASME, New York;
- ✓ Halling, J. Introduction to Tribology. Wykeham Publications.1976.
- ✓ Bhushan B. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques cap2. *In: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. V1 Principles of Tribology. CRC. 2001*
- ✓ Kato K, Adachi K, Wear Mechanisms. cap7. *In: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. V1 Principles of Tribology. CRC. 2001.*
- ✓ C. X. Li, Wear and Wear Mechanism. Surface Engineering http://emrkt.uni-iskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/elemei/wear_and_wear_mechanism.htm