

PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2016

Aula 11 – Tribologia – Atrito / Desgaste

Professores: Benedito de Moraes Purquerio
Carlos Alberto Fortulan

Escopo:

Introdução

Superfície

Atrito

Desgaste

Lubrificação

Regimes
lubrificantes

Engenharia de Superfícies

Tribologia na Engenharia

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.

Tribologia

Desgaste

Atrito

Lubrificação

PROPÓSITO BÁSICO DA TRIBOLOGIA

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

HISTÓRICO

A TRIBOLOGIA, EMBORA ESTUDADA DE FORMA SISTEMÁTICA HÁ QUASE CINCO DÉCADAS,

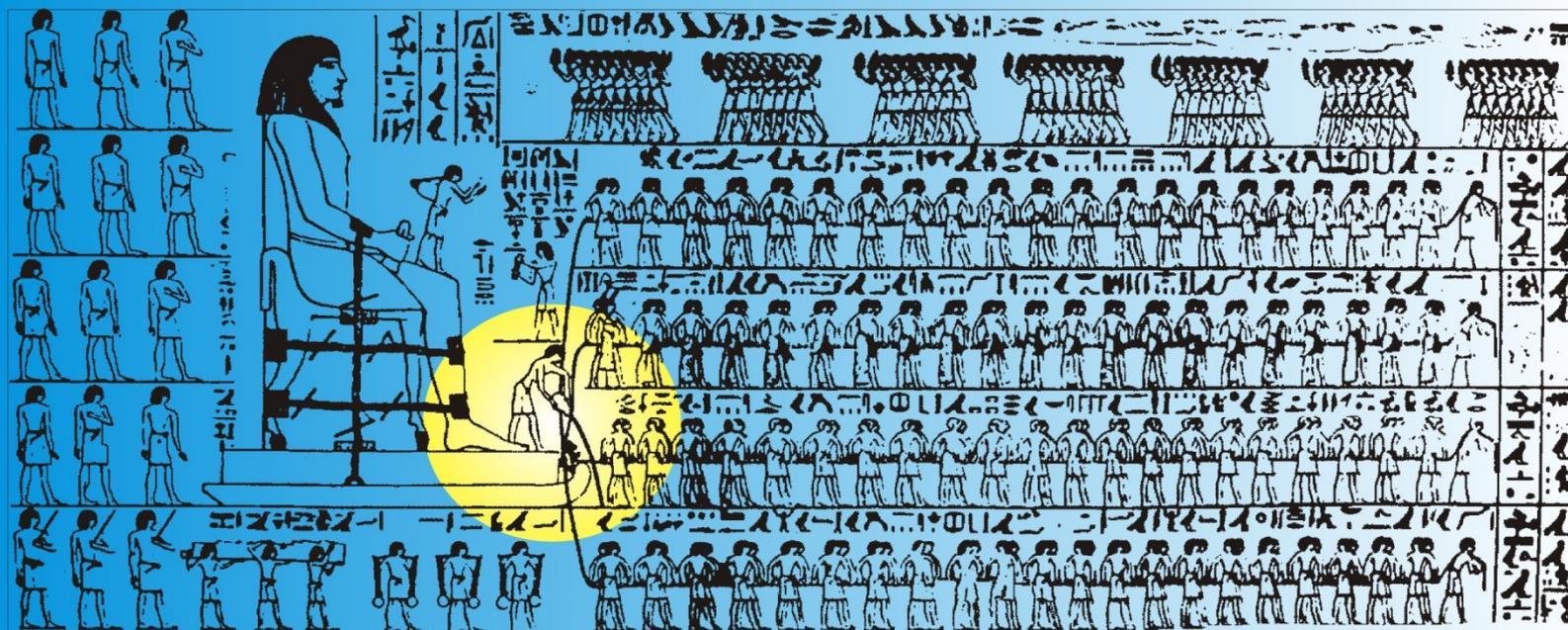
ELA TEM A IDADE DO HOMEM.

FURADEIRA DE ARCO EGÍPCIA

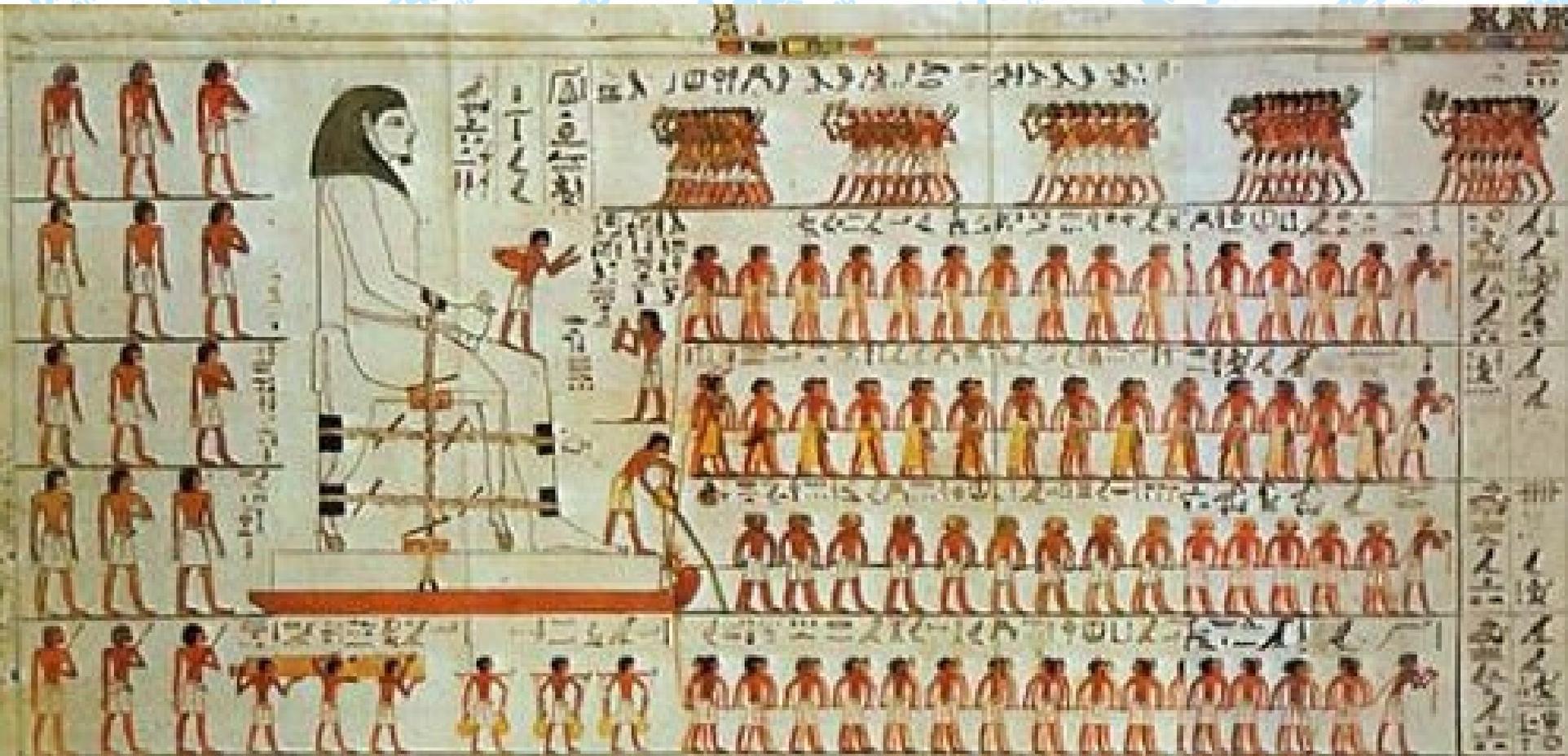


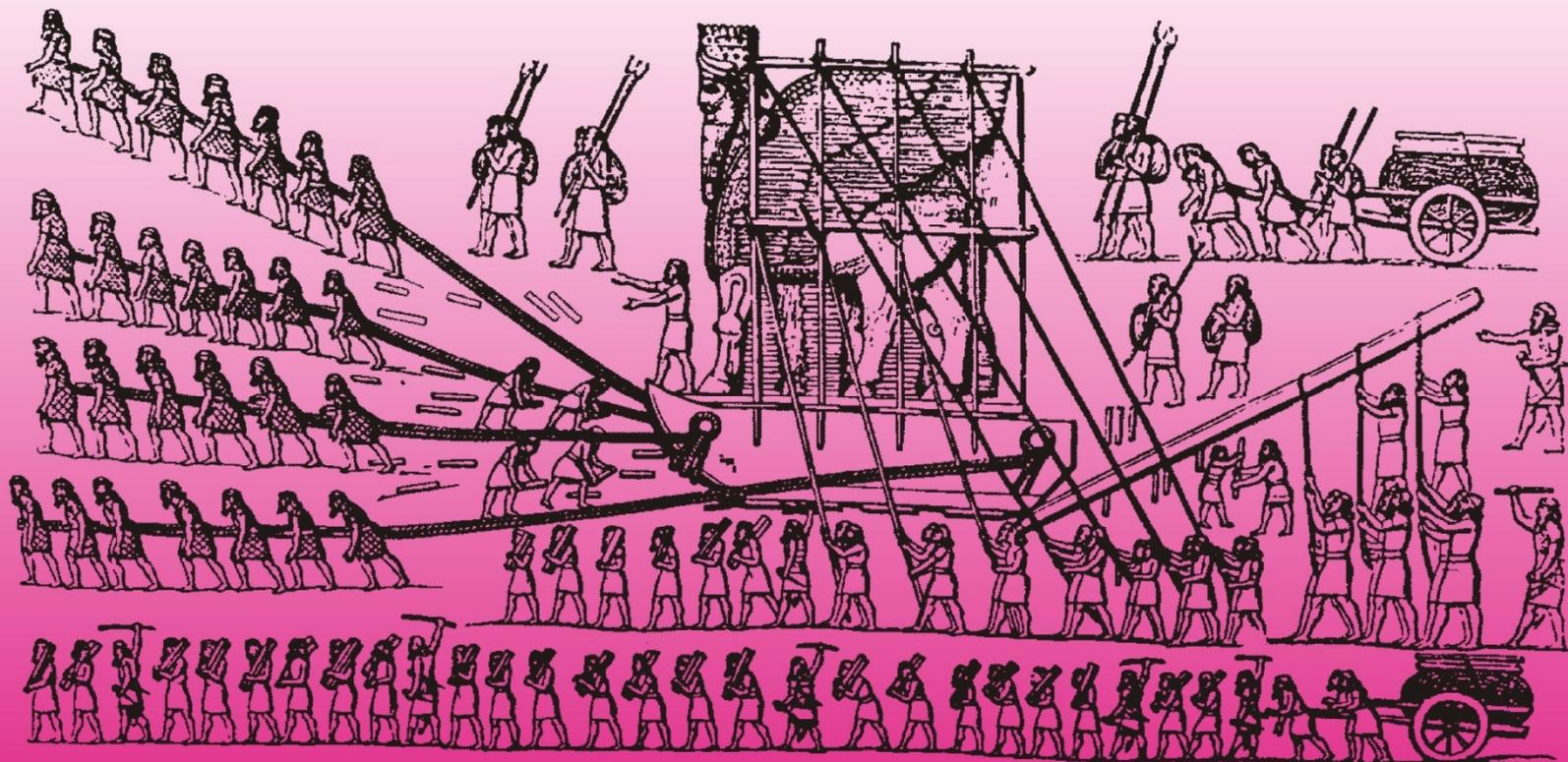
Um dos primeiros "TRIBOLOGISTAS", LUBRIFICANDO O TRENÓ DA ESTÁTUA DE TII. SACCARA - 2400 AC.





EGÍPCIOS UTILIZANDO "LUBRIFICANTE" PARA FACILITAR
O MOVIMENTO DE UM COLOSSO SOBRE TRENÓ
(EL BERSHET - 1880 AC)





UTILIZAÇÃO DE ROLETES SOB TRENÓS - ASSÍRIA 700 AC

Superfície

TEXTURA SUPERFICIAL

SUPERFÍCIES

LISAS

RUGOSAS

TATO
LUZ
PADRÃO
DESLISAMENTO

MÉTODOS SUBJETIVOS

PERGUNTA:

QUANTO

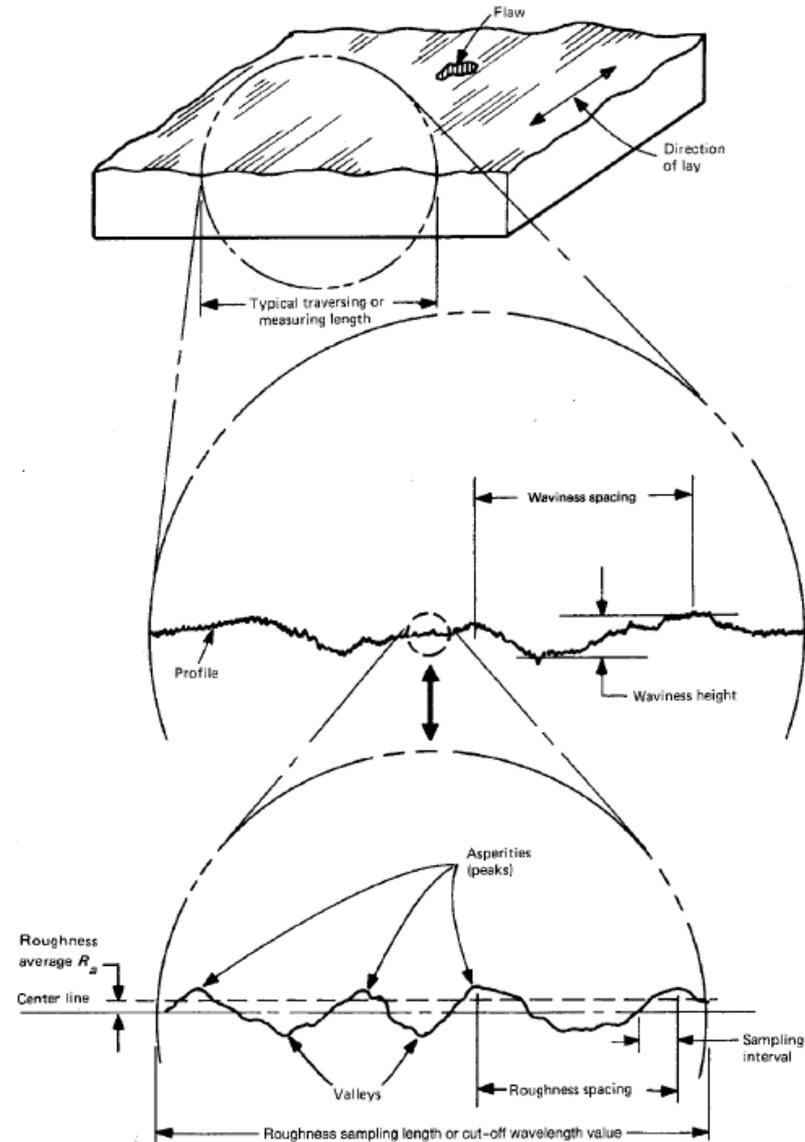
RUGOSA
LISA

É UMA SUPERFÍCIE ?

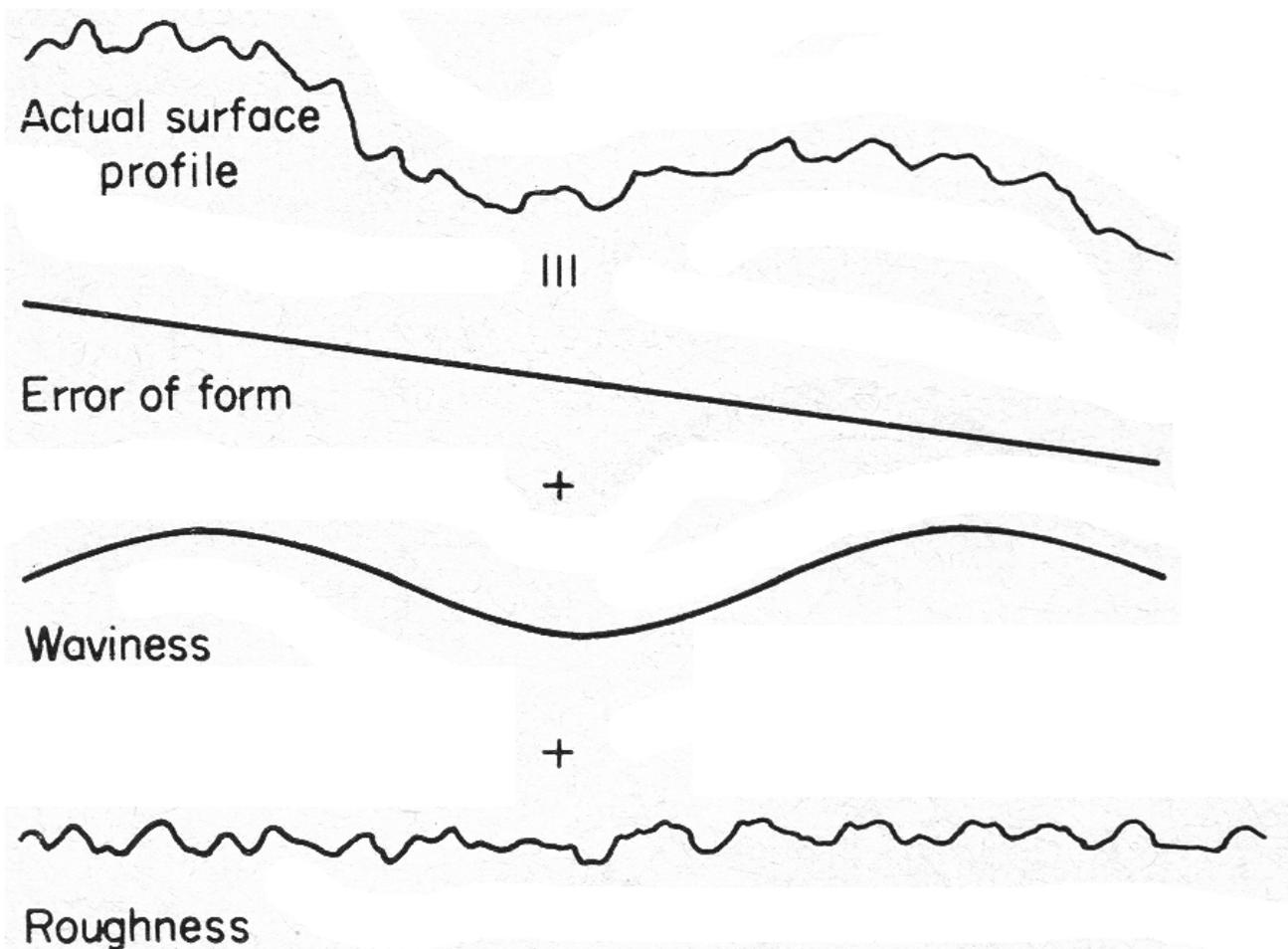
?

mm

Macro e Micro



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



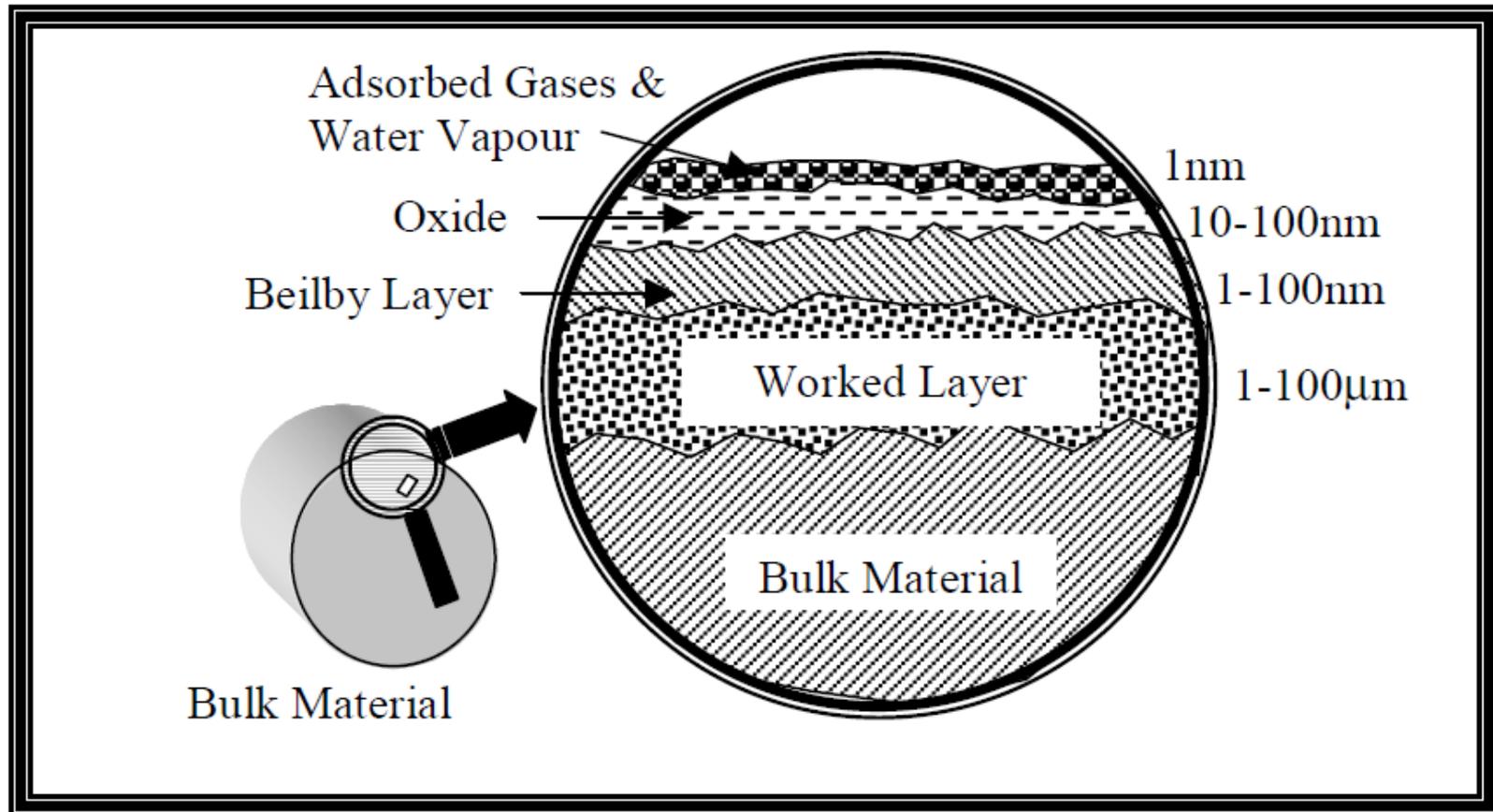


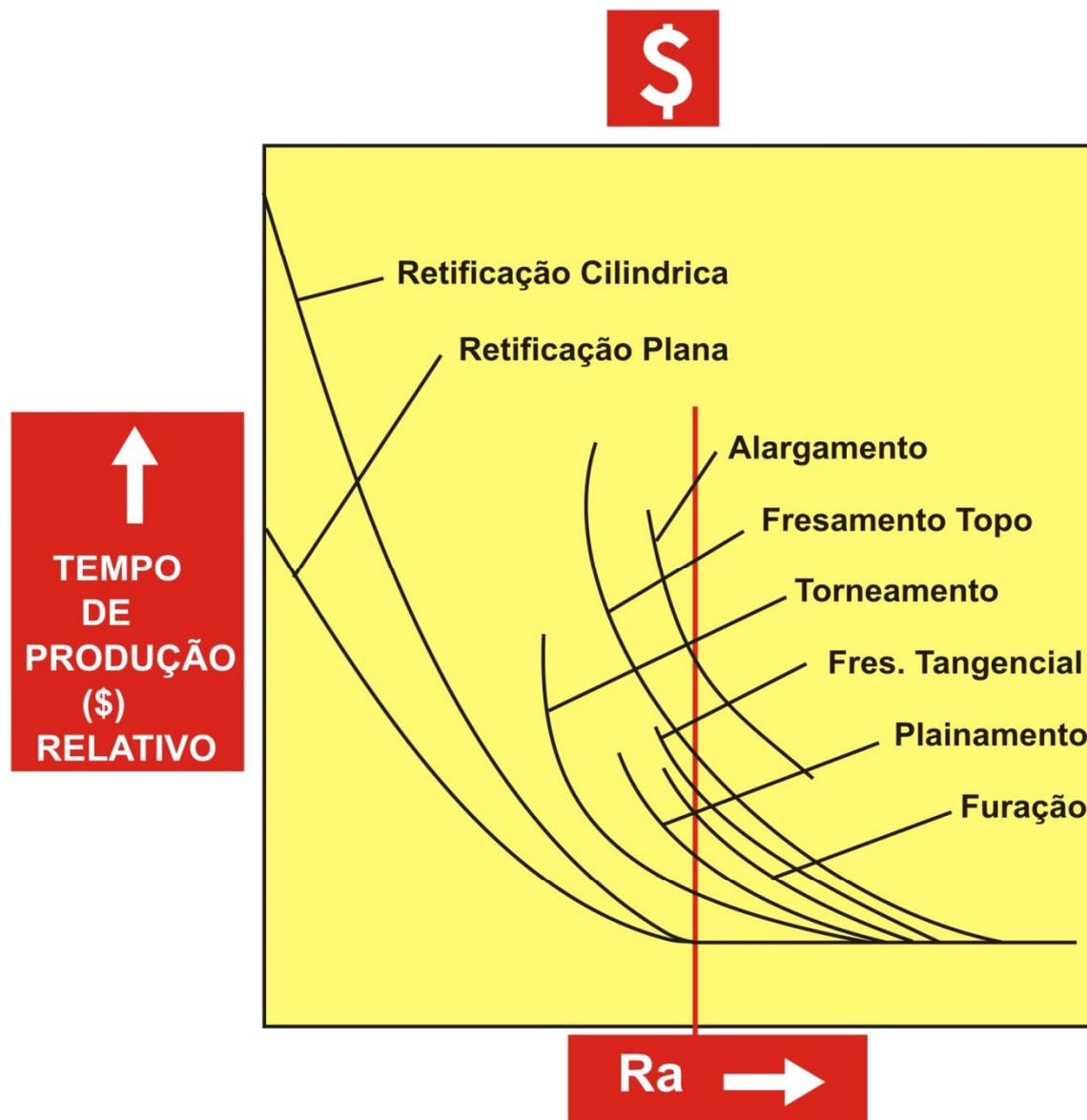
Figure 1.1, Schematic representation of a metal surface, adapted from **Bhushan and Gupta (1991)**

“ 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”.

“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*

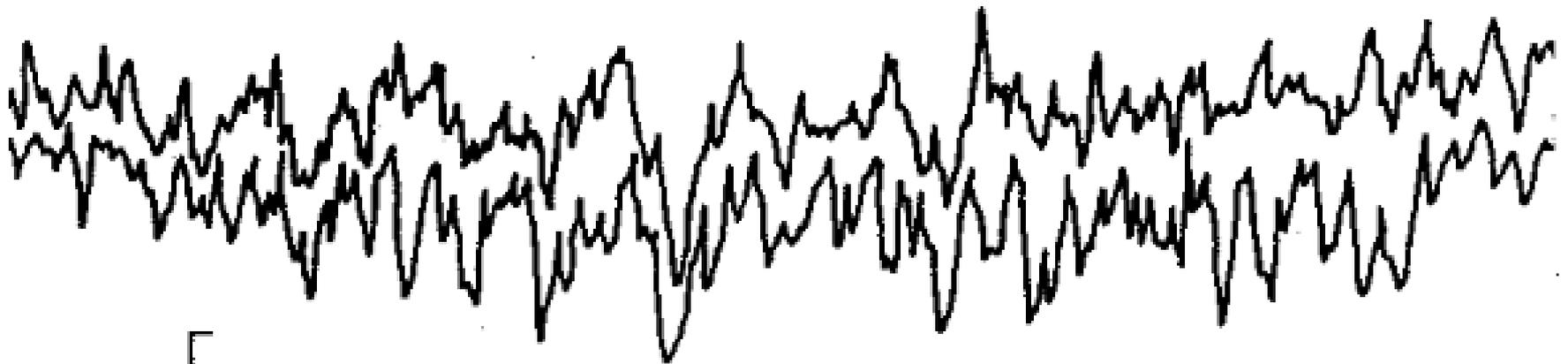


“Muitas das superfícies são quimicamente reativas. Com a exceção dos metais nobres, os metais e suas ligas formam camadas de superfície de óxido no ar, e em outros ambientes podem formar outras camadas (por exemplo, nitretos, sulfetos e cloretos).

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.

Contato

Pin



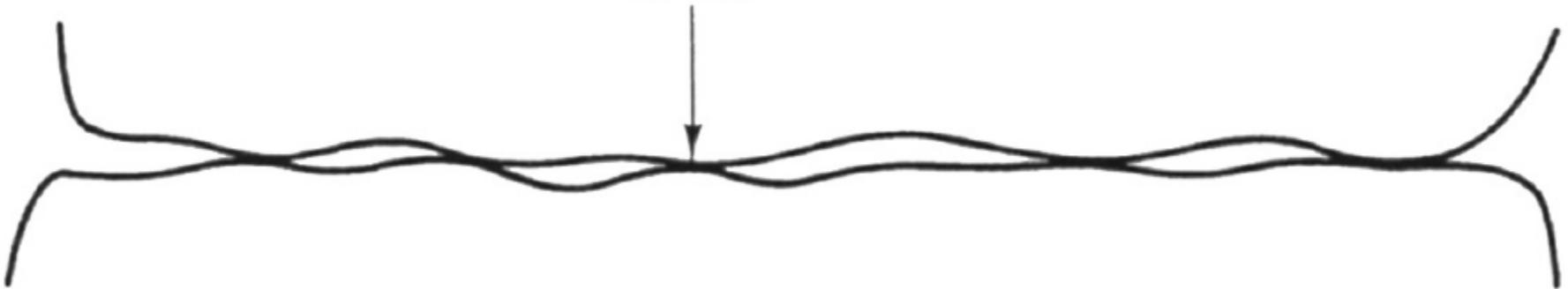
40 μ m

1mm

Ring

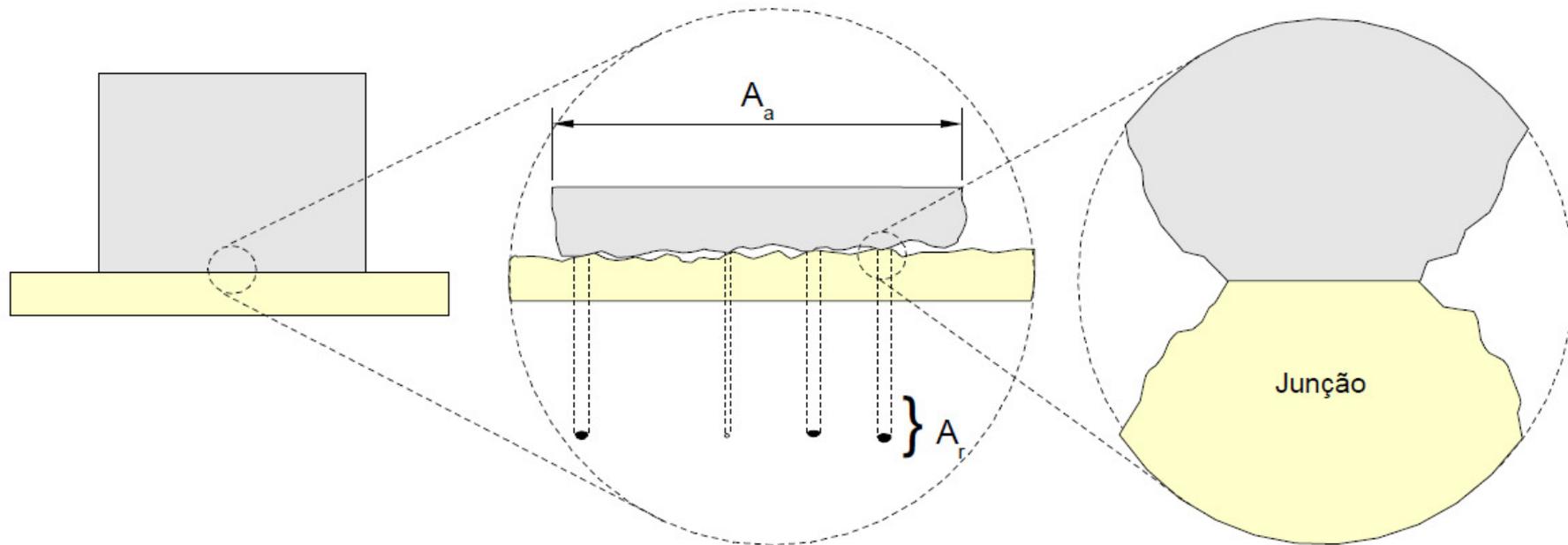
Contato em Macro-escala

Asperity
contact



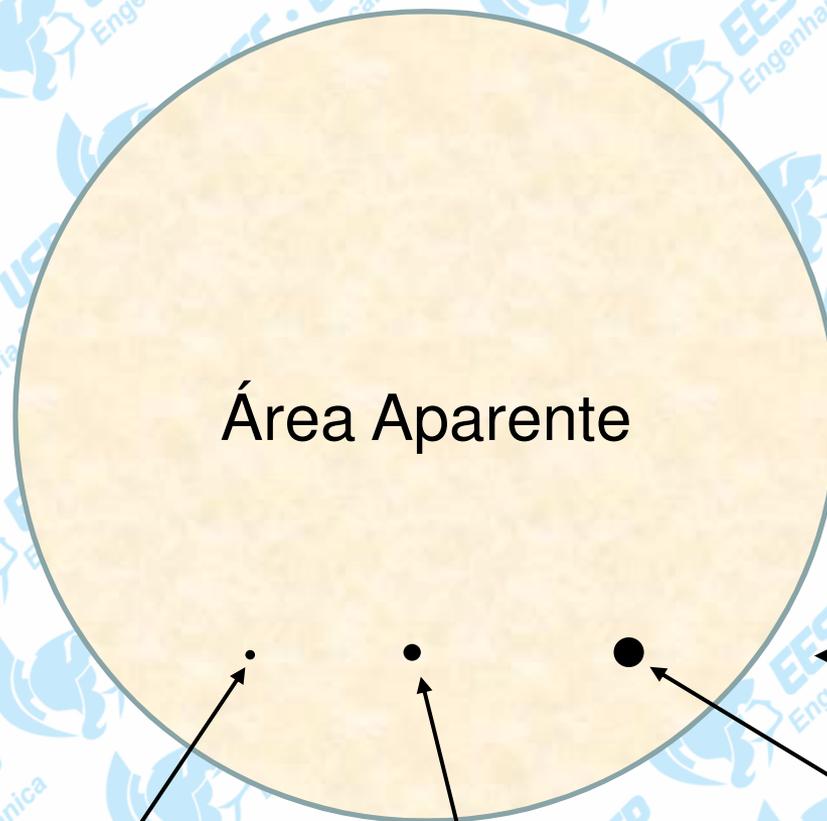
Sub (2986), fig. 1.4

Área de contato real



- Junção – Regiões em que há interação atômica devido à proximidade dos átomos de ambas superfícies
- Área de contato real = Soma de todas as junções tipicamente representa de 1% - 0.0001% da área aparente de contato

Área real de contato



Área Aparente

$\Sigma \cong$ Área Real de contato

5 kgf

100 kgf

500 kgf

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 Amonton e posteriormente por Coulomb.

Leis clássicas do 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 (1450): o coeficiente de atrito era o mesmo 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;

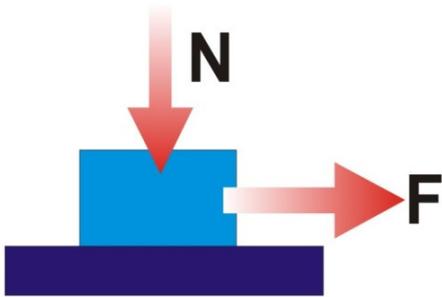
Euler (1750): concordou com Amontons $\mu=0,33$;

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

adesão

identificação

COEFICIENTE DE ATRITO

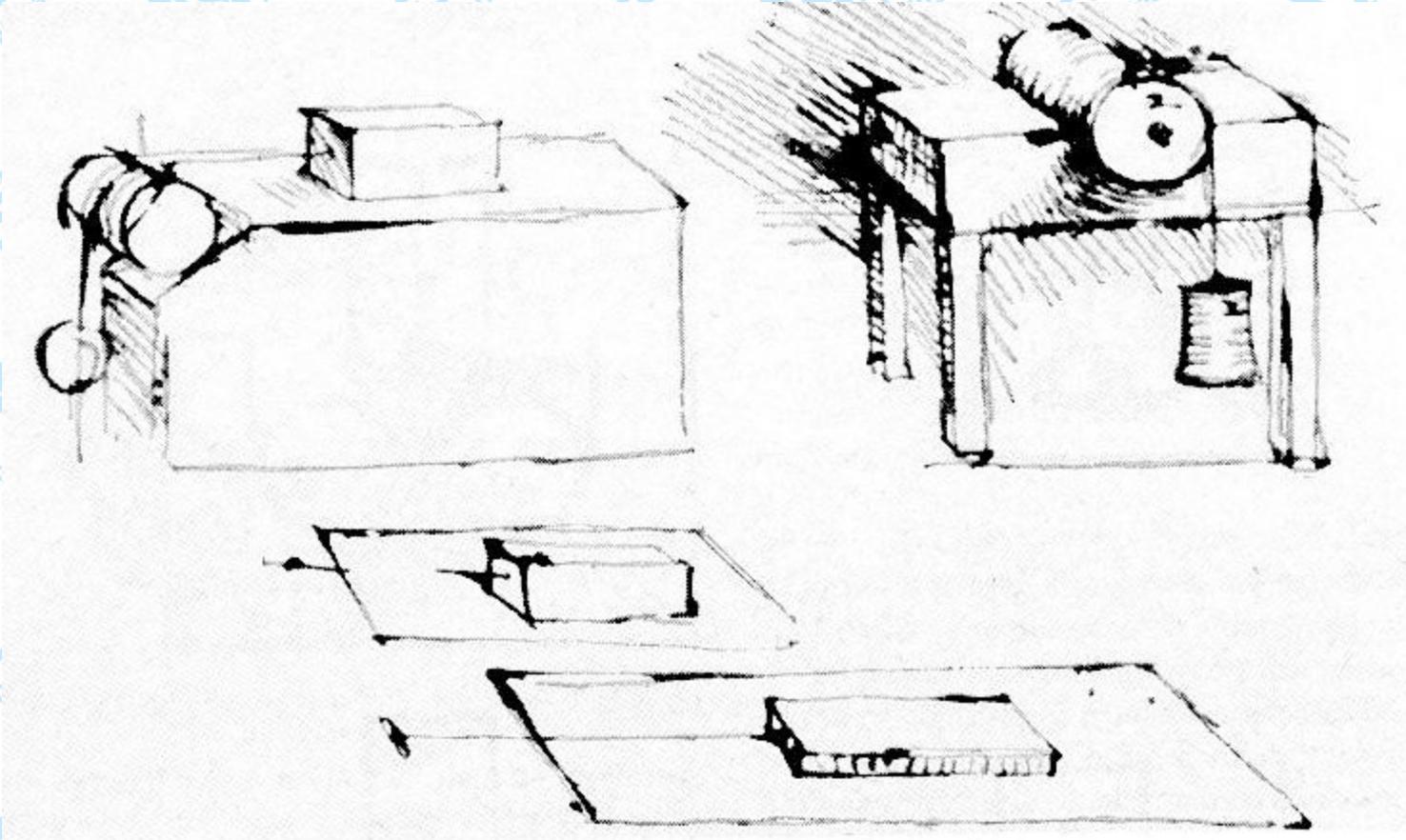


$$\text{Coeficiente de Atrito} = \frac{\text{Força Tangencial}}{\text{Força Normal}} = \frac{F}{N} = \mu$$

$F \propto N$ (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 ?;

O **atrito** é afetado por:

1. Presença de partículas de desgaste e/ou externamente introduzidas na interface deslizante;
2. Dureza relativa dos materiais em contacto;
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, a direção e a magnitude do movimento relativo entre as superfícies).

Frictional Coefficients for some Common Materials and Materials Combinations

São Carlos

TRIBOLOGIA – ATRITO / DESGASTE – Aula 11 – Notas de aula

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		0.04



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

Sao Carlos

Coefficient of Sliding Friction (clean surfaces)

Material 1	Material 2	Static	Kinetic	Material 1	Material 2	Static	Kinetic
Aluminum	Mild Steel	0.61	0.47	Polystyrene	Steel	0.3 - 0.35	-
Brake Material	Cast Iron	0.4	-	Polythene	Steel	0.2	-
Brake Material	Cast Iron (wet)	0.2	-	Rubber	Asphalt (dry)	-	0.5 - 0.8
Brass	Cast Iron	-	0.3	Rubber	Asphalt (wet)	-	0.25 - 0.75
Brick	Wood	0.6	-	Rubber	Concrete (dry)	-	0.6 - 0.85
Bronze	Cast Iron	-	0.22	Rubber	Concrete (wet)	-	0.45 - 0.75
Bronze	Steel	-	-	Sapphire	Sapphire	0.2	-
Cadmium	Cadmium	0.5	-	Silver	Silver	1.4	-
Cadmium	Mild Steel	-	0.46	Sintered Bronze	Steel	-	-
Cast Iron	Cast Iron	1.1	0.15	Solids	Rubber	1.0 - 4.0	-
Cast Iron	Oak	-	0.49	Steel	Aluminum Bros	0.45	-
Chromium	Chromium	0.41	-	Steel	Brass	0.35	-
Copper	Cast Iron	1.05	0.29	Steel (mild)	Brass	0.51	0.44
Copper	Copper	1.0	-	Steel (mild)	Cast Iron	-	0.23
Copper	Mild Steel	0.53	0.36	Steel	Cast Iron	0.4	-
Copper-Lead Alloy	Steel	0.22	-	Steel	Copper Lead Alloy	0.22	-
Diamond	Diamond	0.1	-	Steel (hard)	Graphite	0.21	-
Diamond	Metal	0.1 - 0.15	-	Steel	Graphite	0.1	-
Glass	Glass	0.9 - 1.0	0.4	Steel (mild)	Lead	0.95	0.95
Glass	Metal	0.5 - 0.7	-	Steel (mild)	Phos. Bros	-	0.34
Glass	Nickel	0.78	0.56	Steel	Phos Bros	0.35	-
Graphite	Graphite	0.1	-	Steel (hard)	Polythene	0.2	-
Graphite	Steel	0.1	-	Steel (hard)	Polystyrene	0.3 - 0.35	-
Graphite (in vacuum)	Graphite (in vacuum)	0.5 - 0.8	-	Steel (hard)	Steel (mild)	0.74	0.57
Hard Carbon	Hard Carbon	0.16	-	Steel (Mild)	Steel (hard)	0.78	0.42
Hard Carbon	Steel	0.14	-	Steel (hard)	Steel (hard)	0.78	0.42
Iron	Iron	1.0	-	Steel	Zinc (plated on steel)	0.5	0.45
Lead	Cast Iron	-	0.43	Teflon	Steel	0.04	-
Leather	Wood	0.3 - 0.4	-	Teflon	Teflon	0.04	-
Leather	Metal (clean)	0.6	-	Tin	Cast Iron	-	.32
Leather	Metal (wet)	0.4	-	Tungsten Carbide	Tungsten Carbide	0.2 - 0.25	-
Leather	Oak (parallel grain)	0.61	0.52	Tungsten Carbide	Steel	0.4 - 0.6	-
Zinc	Zinc	0.6	-	Tungsten Carbide	Copper	0.35	-
Zinc	Cast Iron	0.85	0.21	Tungsten Carbide	Iron	0.8	-
Magnesium	Magnesium	0.6	-	Wood	Wood (clean)	0.25 - 0.5	-
Nickel	Nickel	0.7 - 1.1	0.53	Wood	Wood (wet)	0.2	-
Nickel	Mild Steel	-	0.64	Wood	Metals (clean)	0.2 - 0.6	-
Nylon	Nylon	0.15 - 0.25	-	Wood	Metals (wet)	0.2	-
Oak	Oak (parallel grain)	0.62	0.48	Wood	Brick	0.6	-
Oak	Oak (cross grain)	0.54	0.32	Wood	Concrete	0.62	-
Platinum	Platinum	1.2	-	Zinc	Zinc	0.6	-
Plexiglas	Plexiglas	0.8	-	Zinc	Cast Iron	0.85	0.21
Plexiglas	Steel	0.4 - 0.5	-				
Polystyrene	Polystyrene	0.5	-				

Questionamentos:

- 01-a) Em pista seca, qual automóvel tem melhor frenagem: com pneu careca ou riscado?
- 02) Porque nos livros de Elemaq os coeficiente de atrito (estático) entre aço-aço esta entre 0,15 a 0,25 e com filme de óleo é $\sim 0,11 - 0,17$? compare com a tabela anterior.
- 03) Em que base científica tribológica é baseado a freio ABS?
- 04) E ao controle de tração?
- 05) O que é feito para que as locomotivas não escorreguem em aclave em dias de chuva.

Desgaste

DESGASTE

...um anel se desgasta no dedo devido ao contínuo esfregamento.
A água gotejante fura a pedra; a pá do arado, endurecido o ferro que seja,
mingua imperceptivelmente no sulco.

Vemos as pedras redondas dos pavimentos desgastadas pelos pés dos
incontáveis viajantes.

As estátuas de bronze nos portões das cidades mostram a sua mão direita
afinada pelo desgaste causado pelo toque de todos os viajantes que as
saudaram durante suas passagens.

Vemos que tudo isso está sendo diminuído pois está sendo desgastado.

Mas, para perceber que partícula é desgastada em qualquer tempo
particularmente, é um poder negado a nós pelo desgeneroso senso da visão.

DESGASTE

...um anel se desgasta no dedo devido ao contínuo esfregamento.
A água gotejante fura a pedra; a pá do arado, endurecido o ferro que seja,
mingua imperceptivelmente no sulco.

Vemos as pedras redondas dos pavimentos desgastadas pelos pés dos
incontáveis viajantes.

As estátuas de bronze nos portões das cidades mostram a sua mão direita
afinada pelo desgaste causado pelo toque de todos os viajantes que as
saudaram durante suas passagens.

Vemos que tudo isso está sendo diminuído pois está sendo desgastado.

Mas, para perceber que partícula é desgastada em qualquer tempo
particularmente, é um poder negado a nós pelo desgeneroso senso da visão.

Lucretius (95-55 B. C.)
De rerum natura I

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

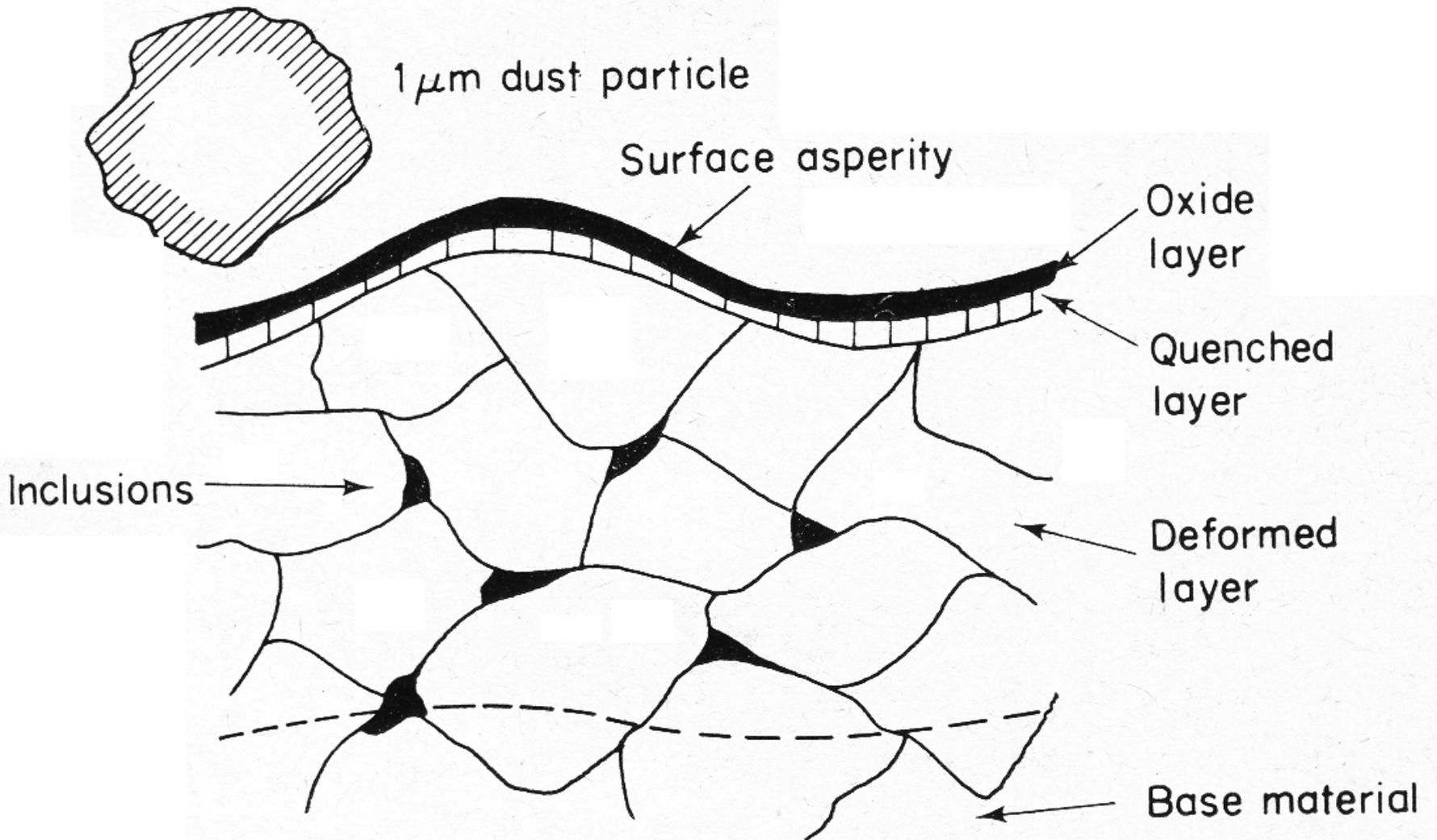
?

DESGASTE ÚTIL

?

Amaciamento (*Running in*),**Corte de Metais (Retificação, Lapidção, Polimento...),****Escrita...**

...



Tipos de desgaste:

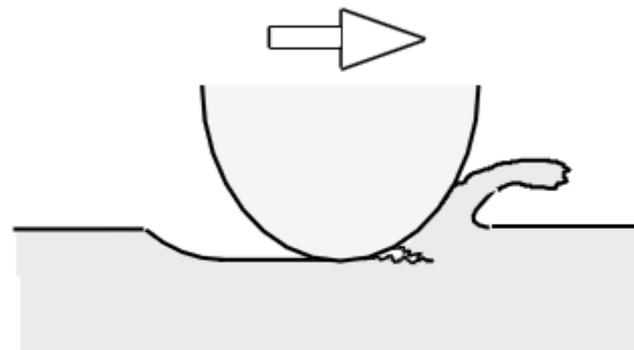
Abrasivo;

Adesivo;

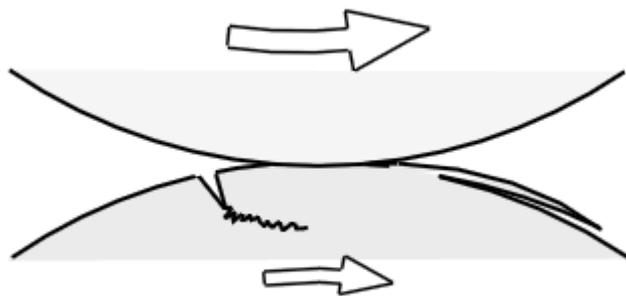
Corrosivo;

Devido à fadiga;

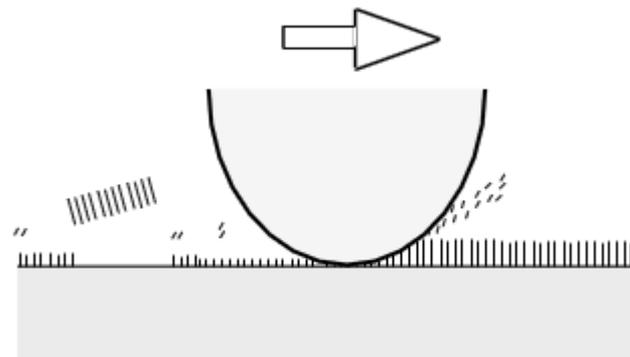
.....



(b) Abrasive wear



(c) Fatigue wear



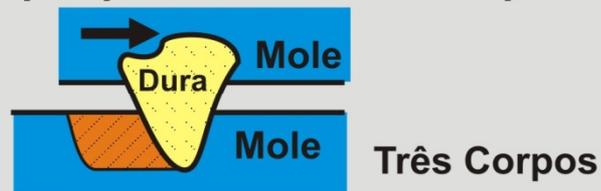
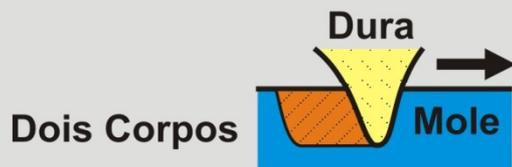
(d) Corrosive wear

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

TIPOS DE DESGASTE

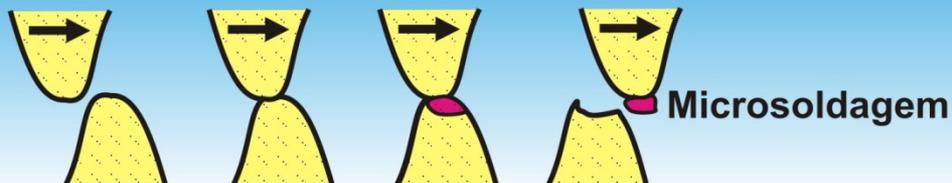
1- DESGASTE ABRASIVO - **ABRASÃO**

Deslocamento do material causado por partículas duras ou protuberâncias.

2- DESGASTE ADESIVO - **ADESÃO**

Transferência de material de uma para outra superfície devido ao processo de microsoldagem.

Contato de uma asperidade

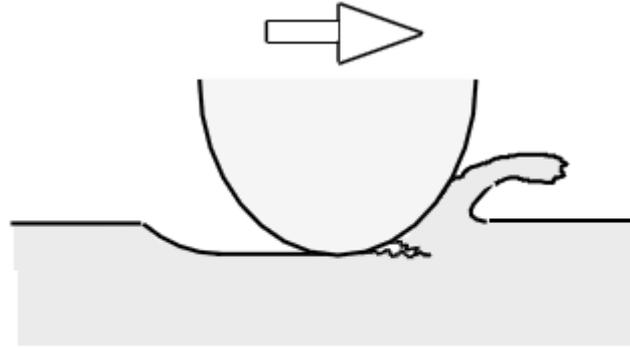
3- DESGASTE EROSIVO - **EROSÃO**

Perda de material de uma superfície sólida devido ao movimento relativo de contato com um fluido contendo partículas sólidas.

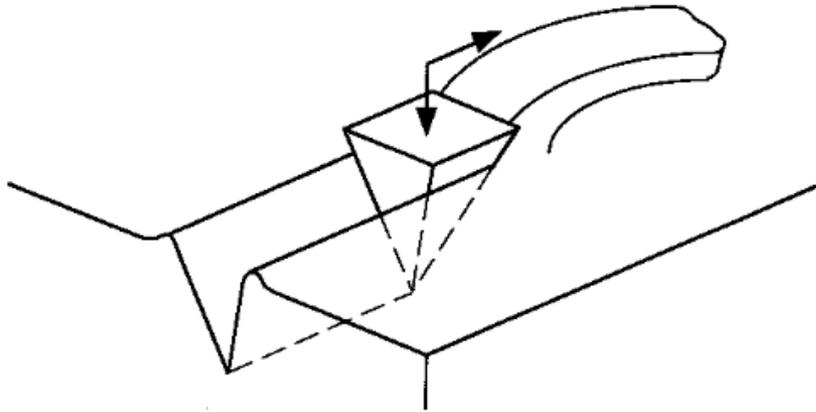
EROSÃO ABRASIVA - Escoamento quase paralelo à superfície.

EROSÃO "EM PINGENTE" - Escoamento normal à superfície (Gotas nas asas).

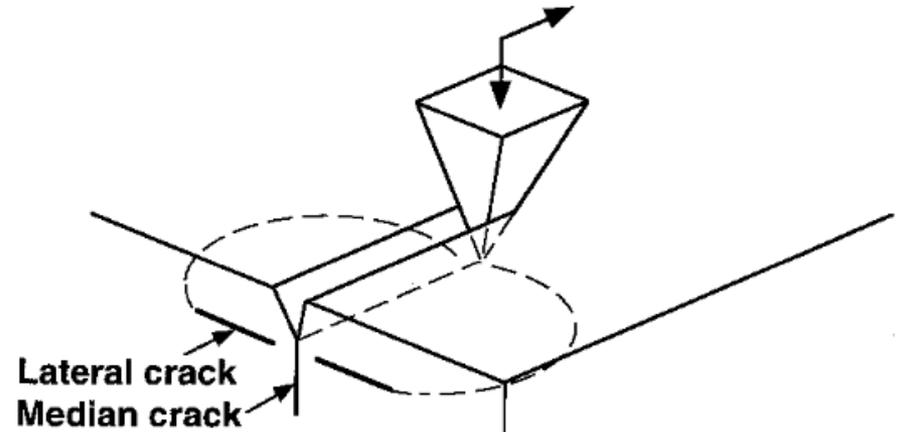
Desgaste Abrasivo



(b) Abrasive wear



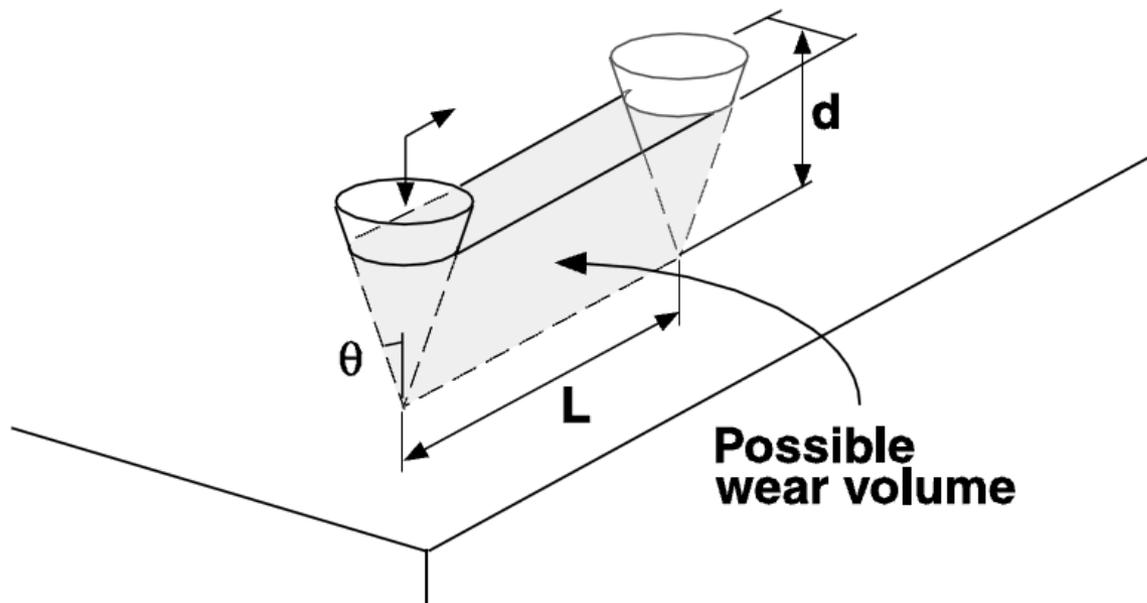
Regime dúctil



Regime frágil

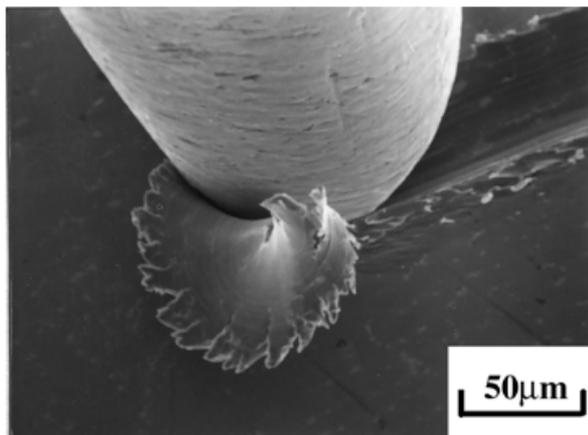
Kato K, Adachi K, Wear Mechanisms. cap7. In: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. V1 Principles of Tribology. CRC. 2001

Modelo típico de desgaste abrasivo no regime dúctil

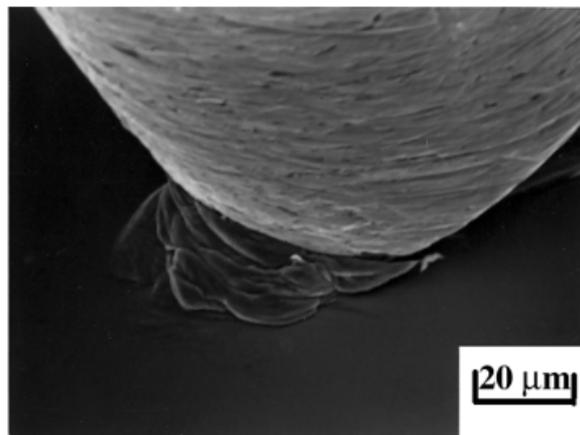


$$V = d^2 \cdot \tan \theta \cdot L$$

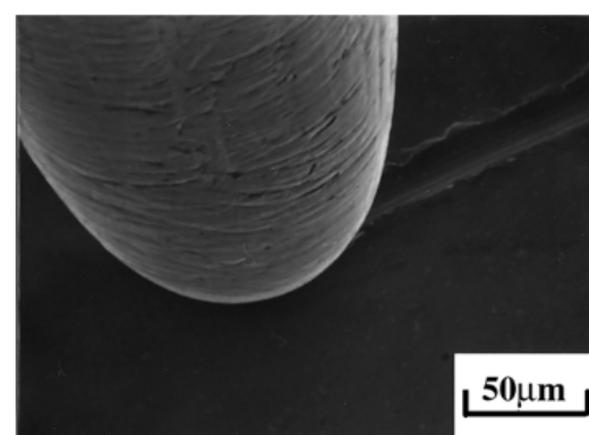
$$V = K_{ab} \cdot \frac{WL}{H}$$



a



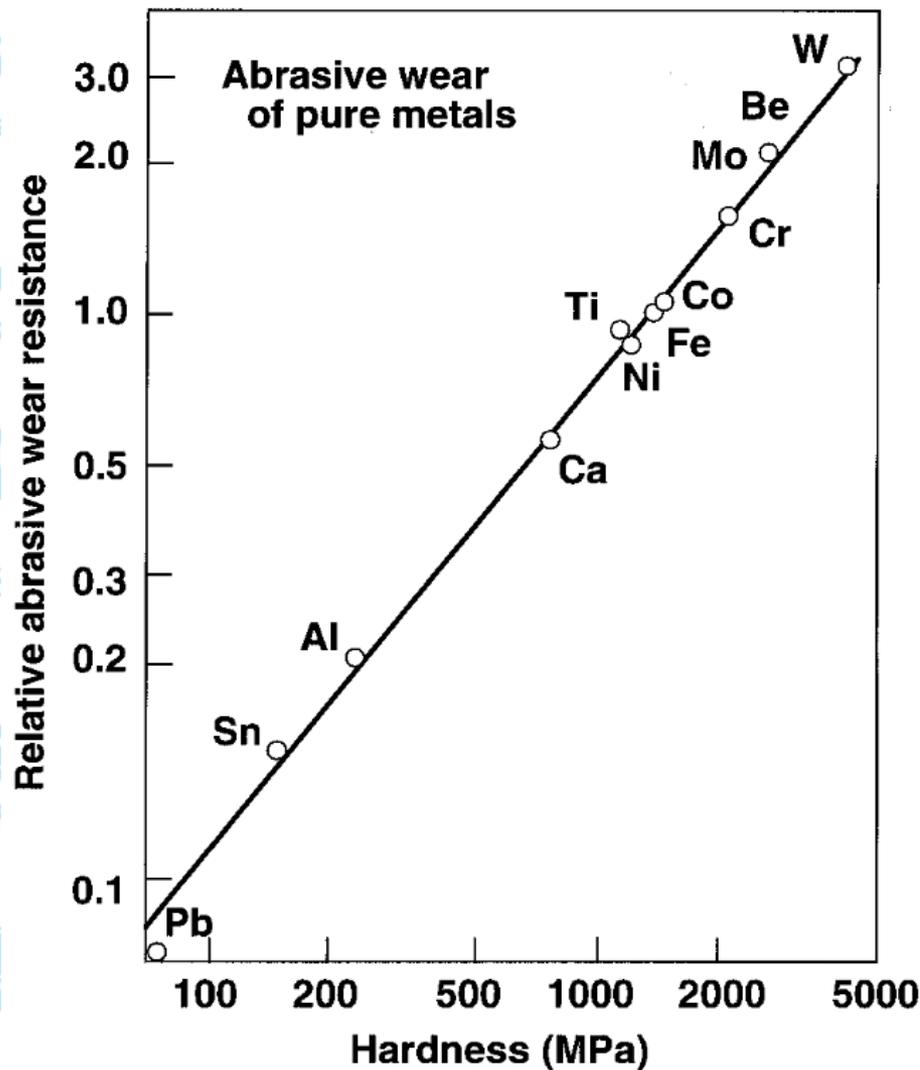
b



c

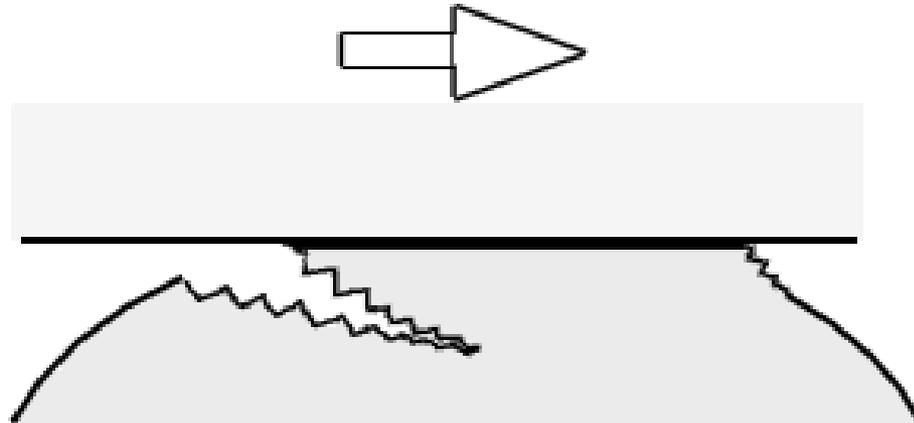
- a) Pino sobre placa de bronze (corte);
- b) Pino sobre placa de aço inoxidável (edge-forming) cunha devido ao cisalhamento;
- c) Pino sobre placa de bronze (ploughing) (sulcamento – deslocamento de material).

Resistência ao desgaste abrasivo de metais puros



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

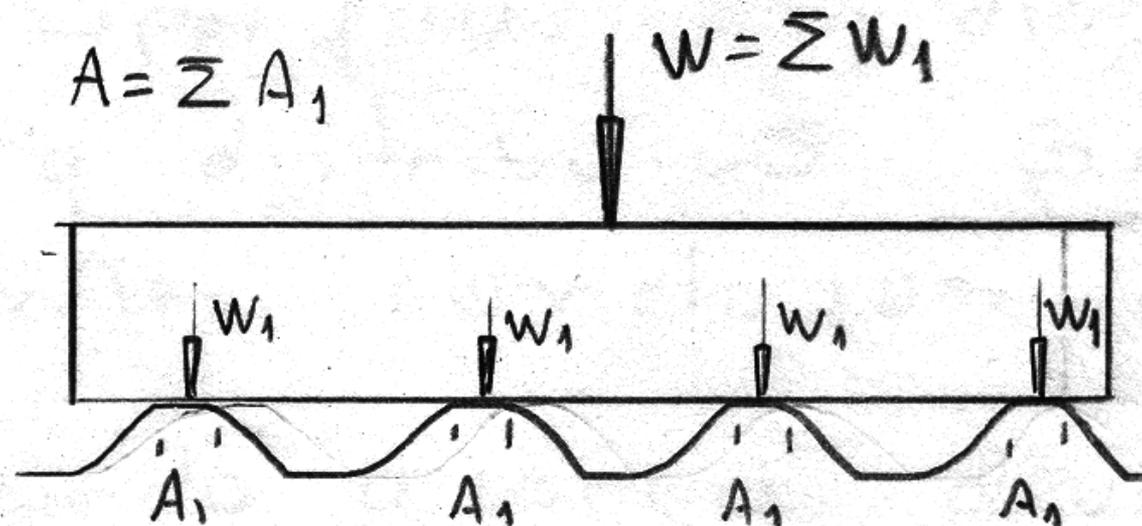
Desgaste Adesivo



(a) Adhesive wear

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

Todas as superfícies apresentam irregularidades como asperezas, e quando em contato sob elevada pressão ocorre o contato adesivo.



1. Descreva e discuta os diferentes tipos de desgaste?
2. Descreva em poucas palavras?
 - Desgaste Abrasivo;
 - Desgaste por fretting;
 - Efeito da dureza da taxa de desgaste abrasivo;
 - Influência do tamanho da partícula abrasiva na taxa de desgaste abrasivo;
3. Explique quantitativamente as leis de desgaste abrasivo. Comente a equação e como medir o desgaste adesivo.
4. Quais são as fontes de desgaste? Explique as teorias Stick-slip e atração molecular.

Aula Prática 07

Aula 09 – Desenho em CAD do projetos