

Materiais resistentes ao desgaste.

PMT-2200 - Ciência dos Materiais
Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin
2006

Atrito e Desgaste

Há um ditado que diz que Deus criou os materiais;
E o Diabo criou as superfícies.

Quando duas superfícies se tocam e deslizam uma sobre a outra há atrito.

Onde há atrito há desgaste.

TRIBOLOGIA é a ciência que estuda o atrito, a lubrificação e o desgaste.

Para vencer o atrito são despendidas quantidades enormes de energia.

Grande parte da deterioração dos materiais de engenharia ocorre por desgaste.

Os custos referentes ao desgaste de componentes de máquinas, equipamentos e veículos chegam a 3% do PIB.

Atrito.

EFEITOS NEGATIVOS

Se o atrito não existisse, a eficiência de motores, transmissões, etc. aumentaria.

O tempo de vida de componentes e equipamentos aumentaria.

Não haveria desgaste, desajustes, vibrações e ruídos.

EFEITOS POSITIVOS

Sem o atrito não seria possível escrever com um lápis.

Também não seria possível breicar um carro.

Qualquer objeto colocado sobre um plano levemente inclinado não pararia no lugar.

Atrito.

Leonardo da Vinci (1452-1519) mediu as forças de atrito sobre corpos escorregando em planos horizontais e planos inclinados.

Observou que a força de atrito depende da força normal e independe da área de contato aparente.

O coeficiente de atrito medido por Da Vinci foi de 0,25 para diversos pares de materiais ensaiados.

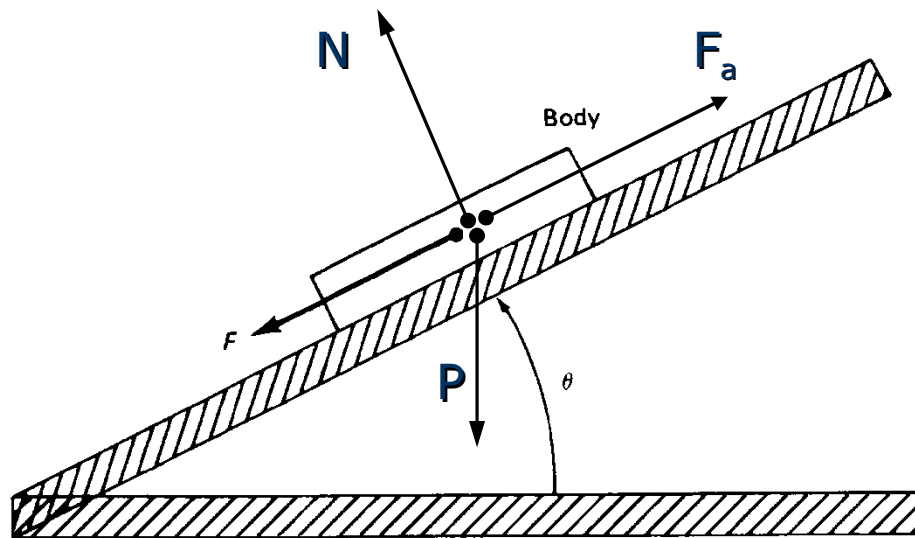
Amontons (1663-1705) chegou à conclusões semelhantes e o coeficiente de atrito medido por ele para diferentes tipos de materiais foi de 0,3333.

A razão pela qual Da Vinci a Amontons obtiveram valores de coeficiente de atrito constantes e independentes dos pares de materiais ensaiados foi a utilização de lubrificantes (gordura de porco).

Atrito.

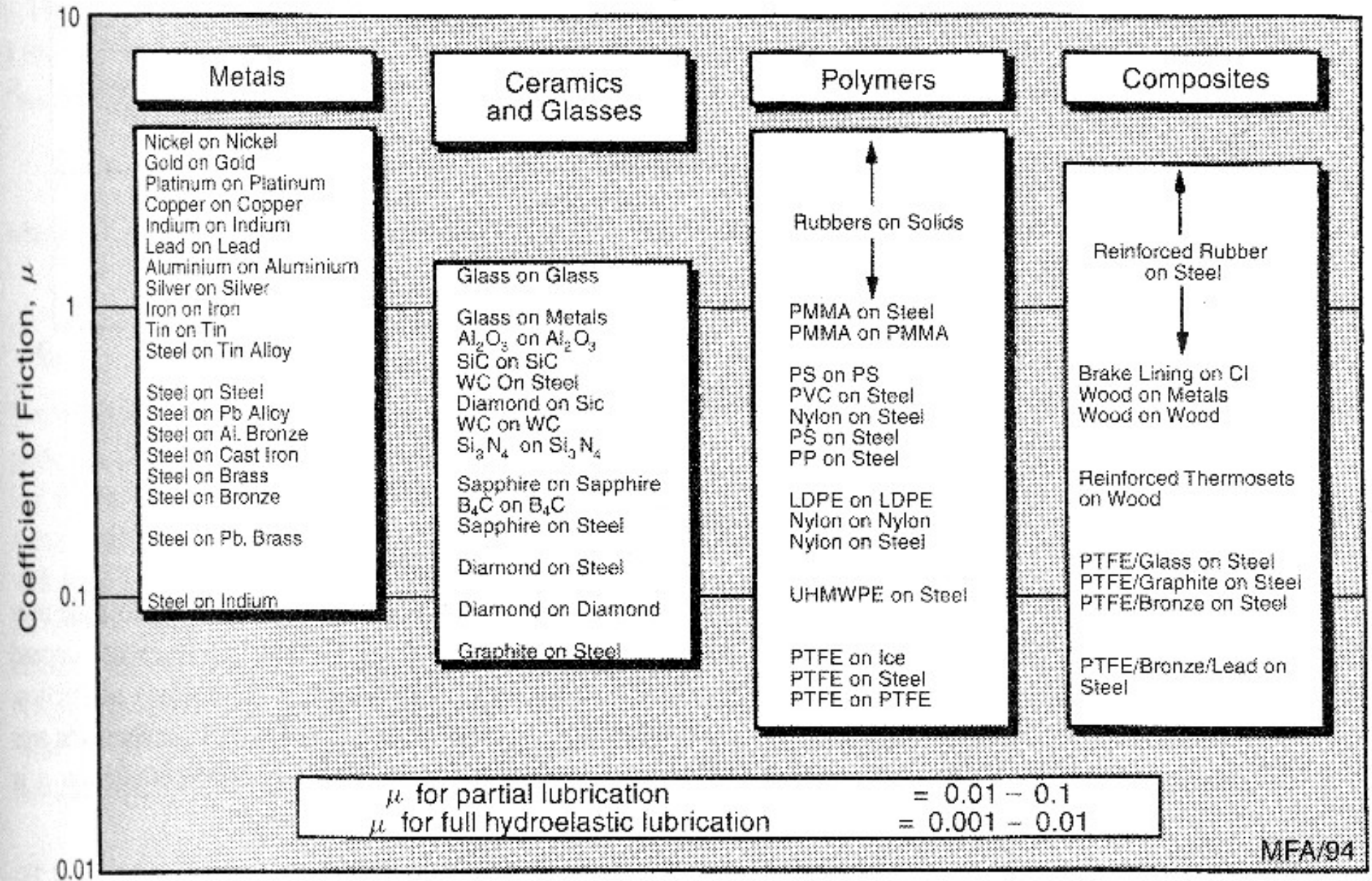
Coeficiente de atrito

$$\mu = \left(\frac{F_a}{N} \right) = \tan \theta$$



(a)

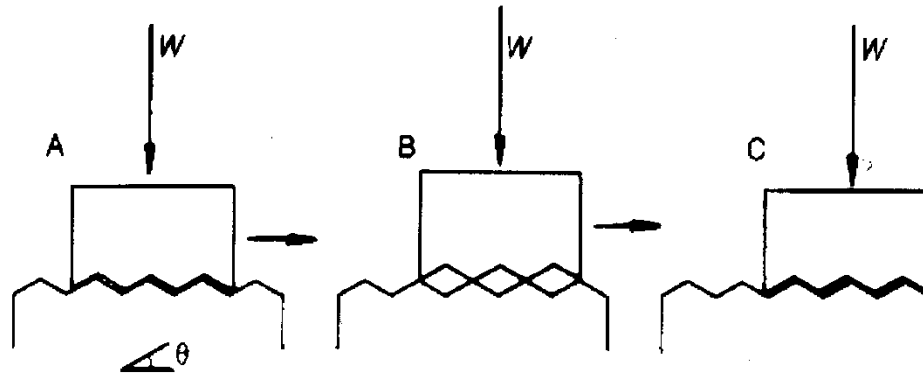
Coeficientes de atrito.



Modelo de Coulomb.

O atrito é uma resistência ao movimento e surge das interações entre os sólidos em uma área de contato real.

O fenômeno de atrito depende da interação entre asperezas.



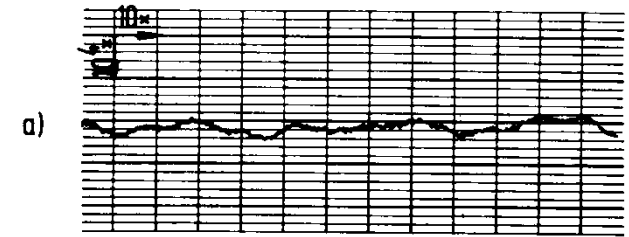
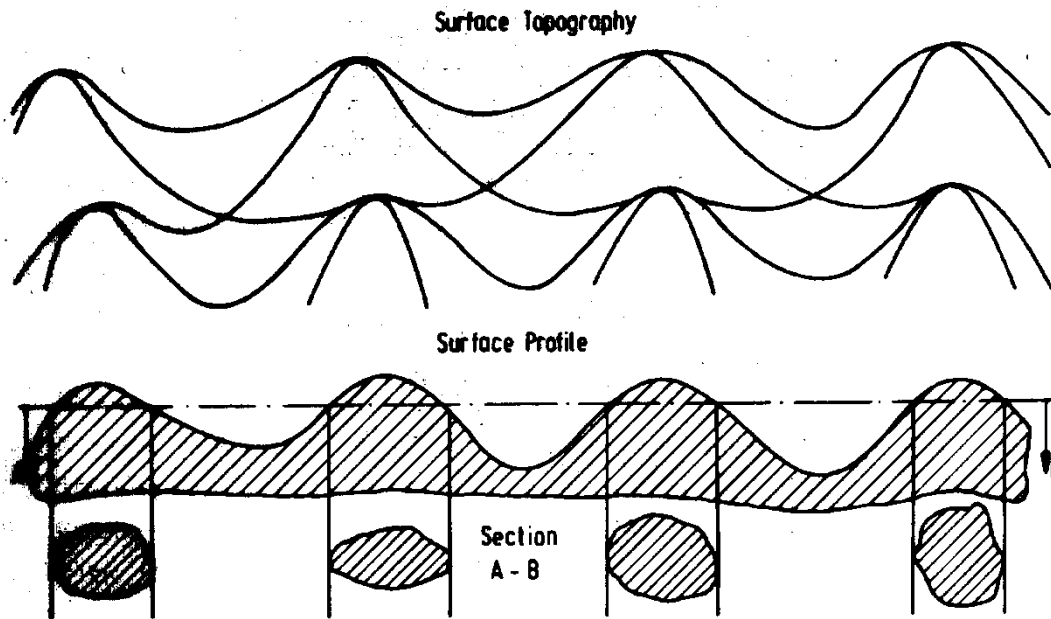
Esquema ilustrando o modelo de Coulomb. De A para B é realizado trabalho contra a carga normal. Então, de B para C a carga realiza igual quantidade de trabalho.

A dissipação de energia é essencial para qualquer modelo que represente o atrito.

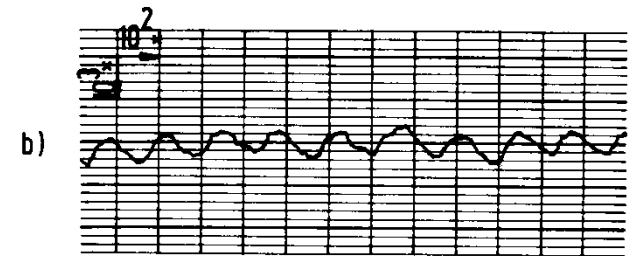
O trabalho realizado para elevar o centro de gravidade do corpo é todo recuperado em seguida.

Superfícies em contato

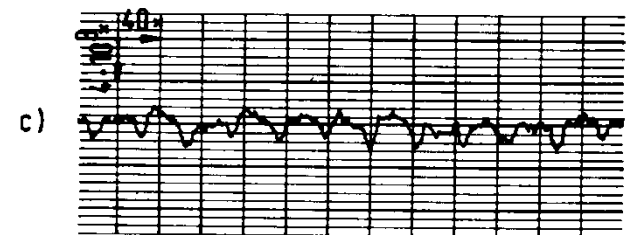
A área de contato real é diferente da área aparente.



$R_a = 0.11 \mu\text{m}$, $R_t = 0.58 \mu\text{m}$



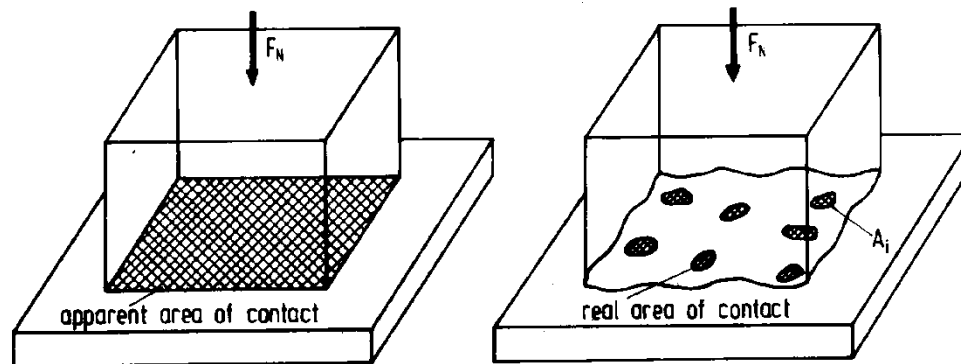
$R_a = 0.72 \mu\text{m}$, $R_t = 3.7 \mu\text{m}$



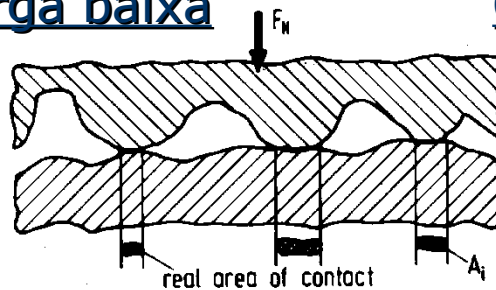
$R_a = 0.42 \mu\text{m}$, $R_t = 3.21 \mu\text{m}$

- a) polimento eletrolítico
- b) superfície torneada
- c) superfície laminada

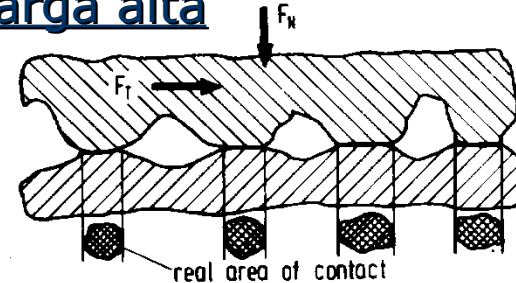
Superfícies em contato



Carga baixa



Carga alta



Efeito do aumento da carga no aumento da área de contato real.
A força de atrito depende da área de contato real.
O aumento da carga promove aumento da área de contato.

Atrito.

O atrito é gerado por mecanismos de interferência mecânica, interações químicas e triboquímicas e em decorrência o coeficiente de atrito pode ser > 1 .

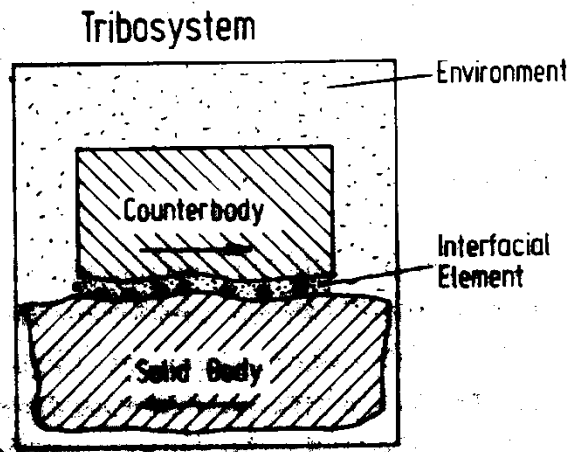
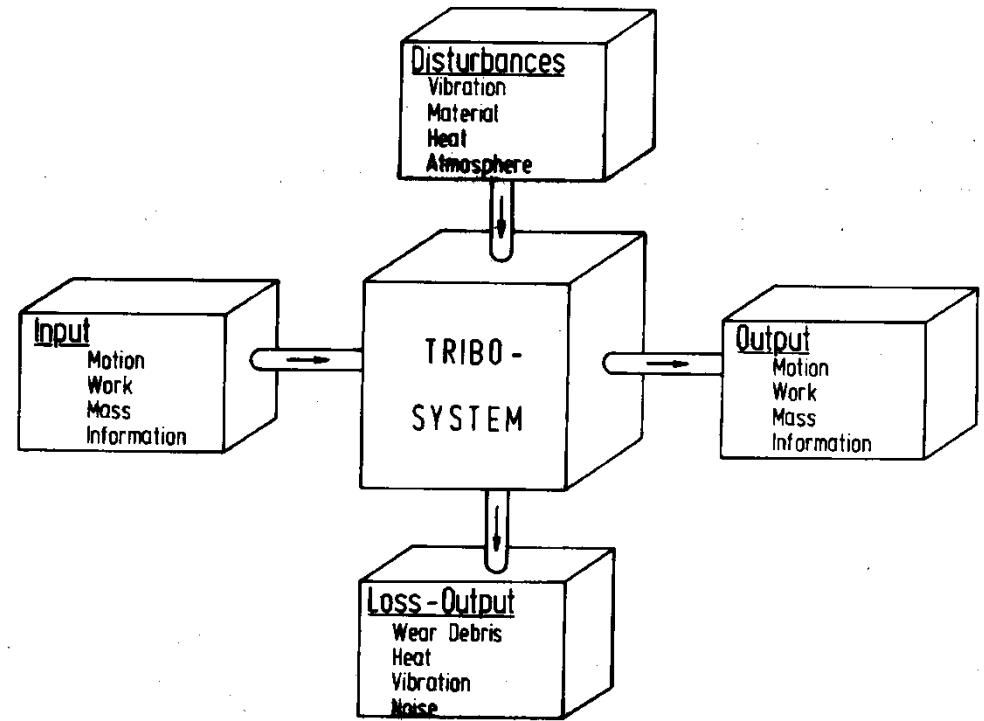
Exemplos:

Pneus automotivos: a força de atrito é dada pela soma das contribuições de interação entre as asperezas do asfalto e a borracha do pneu que se amolda às asperezas.

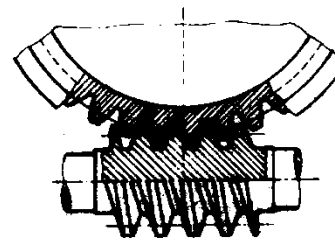
Um bloco de ouro colocado em contato com uma parede de ouro vertical não cai!

Tribo-sistema.

Pode ser definido como um corpo em contato com um contracorpo, submetido a uma carga aplicada, em movimento relativo. Entre o corpo e o contracorpo se estabelece um microambiente (interfacial element). O conjunto todo está imerso em um ambiente.

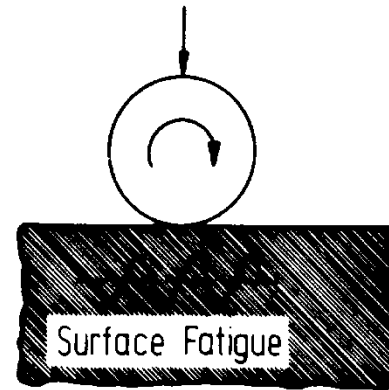
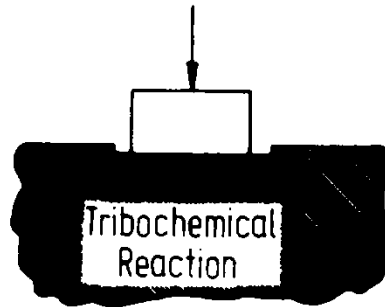
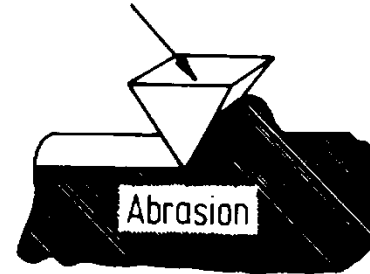
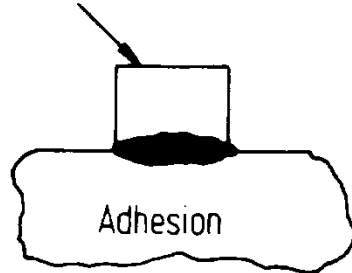


Worm Gear (engrenagem helicoidal)



- solid body : worm
- counterbody : worm wheel
- interfacial element : oil
- environment : air

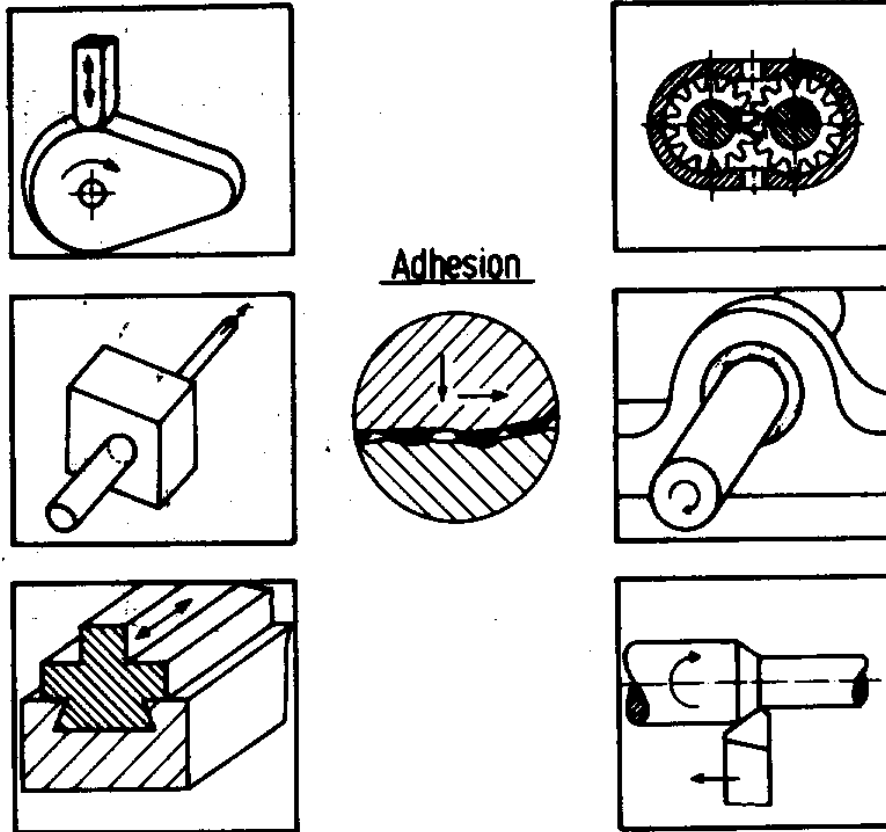
Mecanismos de desgaste



De acordo com a norma DIN 50320 há quatro mecanismos de desgaste básicos:

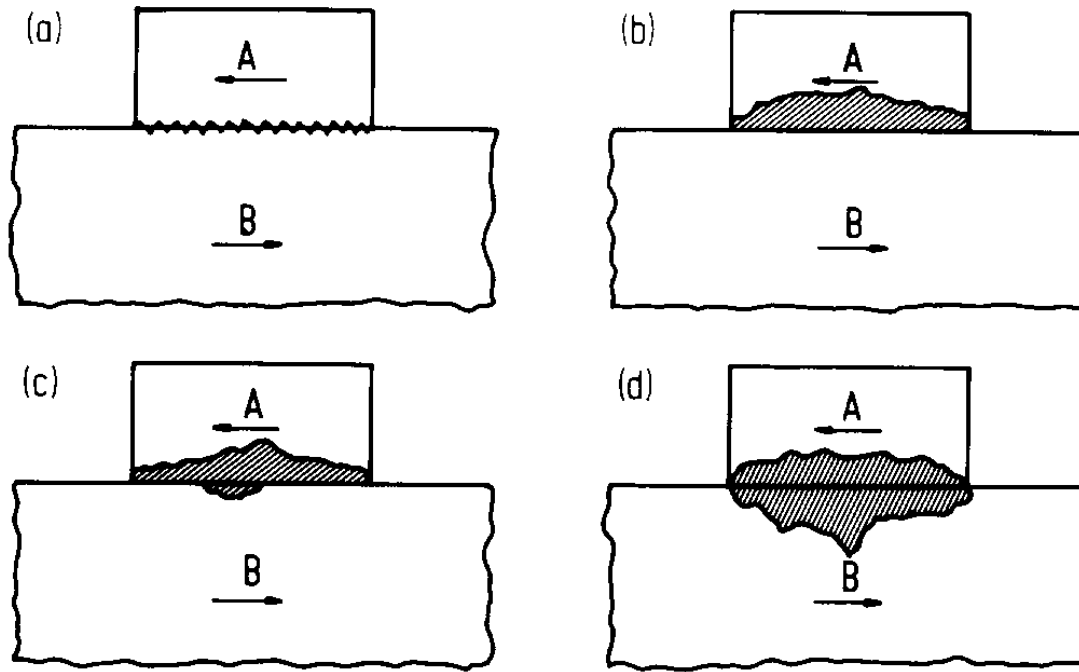
- Adesão.
- Abrasão.
- Reação tribo-química.
- Fadiga superficial.

Desgaste adesivo.



O desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies escorregam uma em relação à outra. Pressões locais muito altas são exercidas pelas asperezas em contato, gerando deformação plástica e,consequentemente, a adesão entre asperezas (formação de junções).

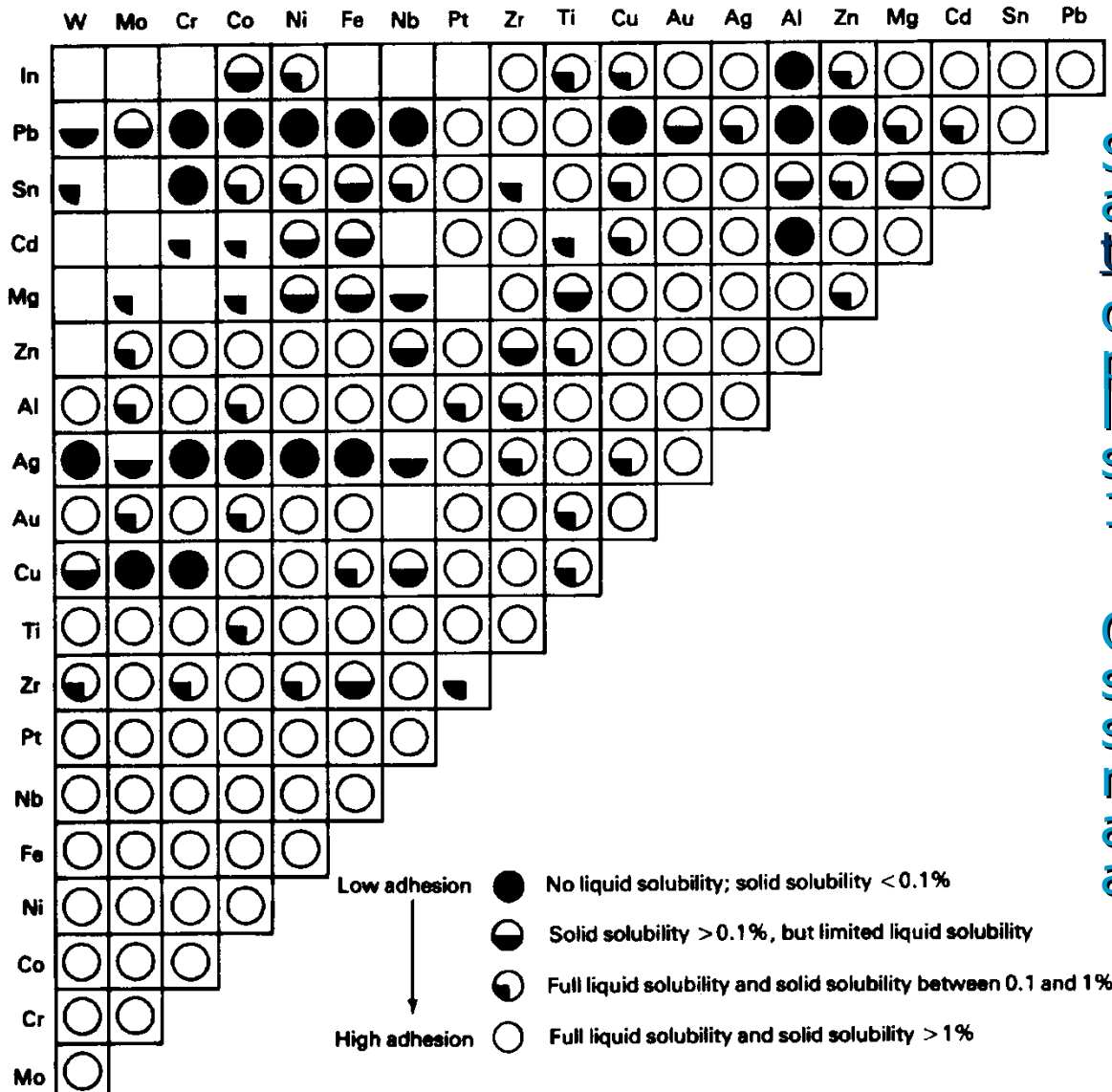
Desgaste adesivo.



Ruptura de junções:

- a) na própria interface.
- b) no material mais mole (A).
- c) predominantemente no material mais mole (A), mas também em B (mais duro).
- d) em ambos.

Adesão.



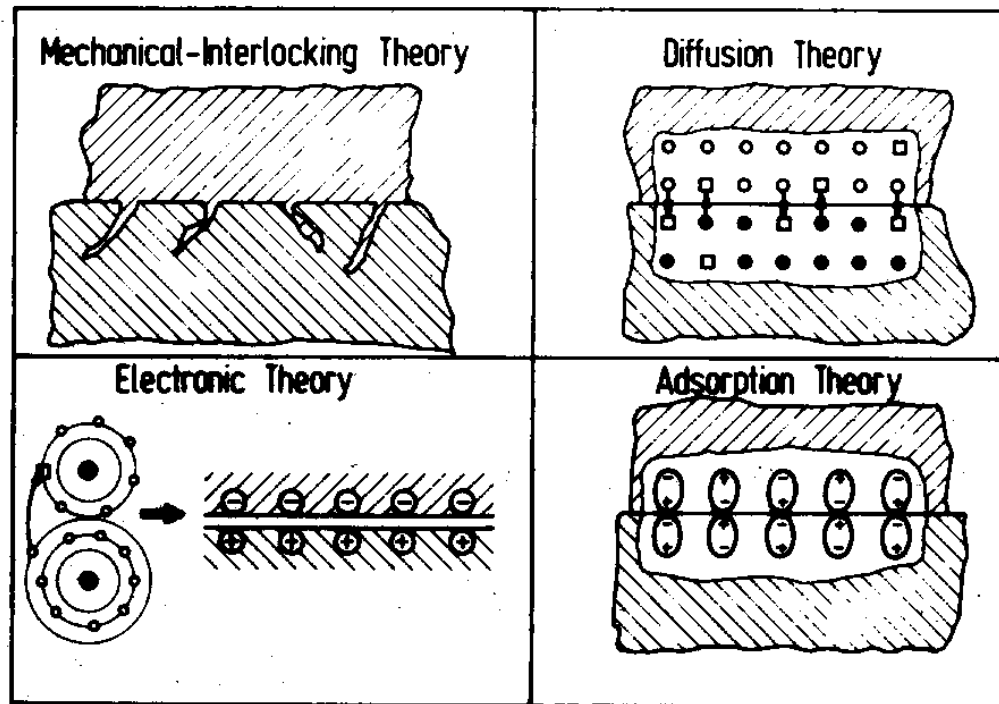
Low adhesion ● No liquid solubility; solid solubility < 0.1%
 ◐ Solid solubility > 0.1%, but limited liquid solubility
 ◑ Full liquid solubility and solid solubility between 0.1 and 1%
 High adhesion ○ Full liquid solubility and solid solubility > 1%

Segundo Rabinovic apresentam maior tendência para adesão

os pares de metais que possuem solubilidade líquida irrestrita e solubilidade sólida > 1%.

Quando a solubilidade sólida é < 1% e a solubilidade líquida é nula os metais tendem apresentar baixa adesão.

Mecanismos de adesão.



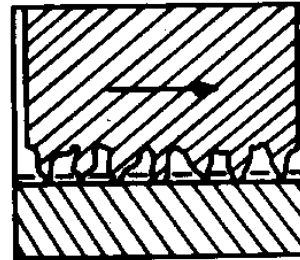
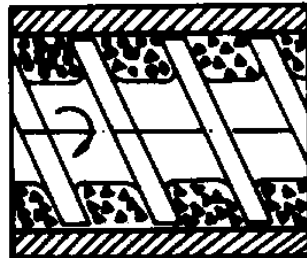
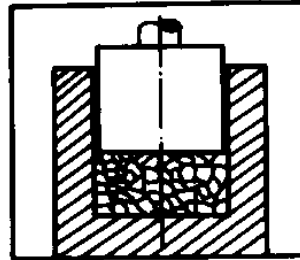
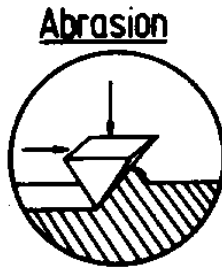
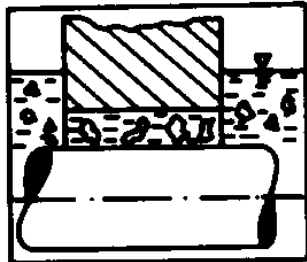
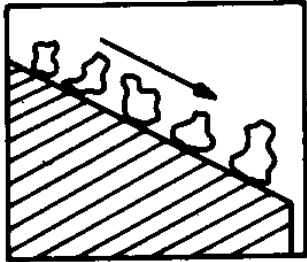
Interferência mecânica (interpenetração de irregularidades superficiais).

Difusão (átomos e moléculas se difundem através da interface).

Transferência eletrônica entre corpos em contato com diferentes bandas eletrônicas.

Adsorção química com formação de ligações fortes e/ou ligações de Van der Waals.

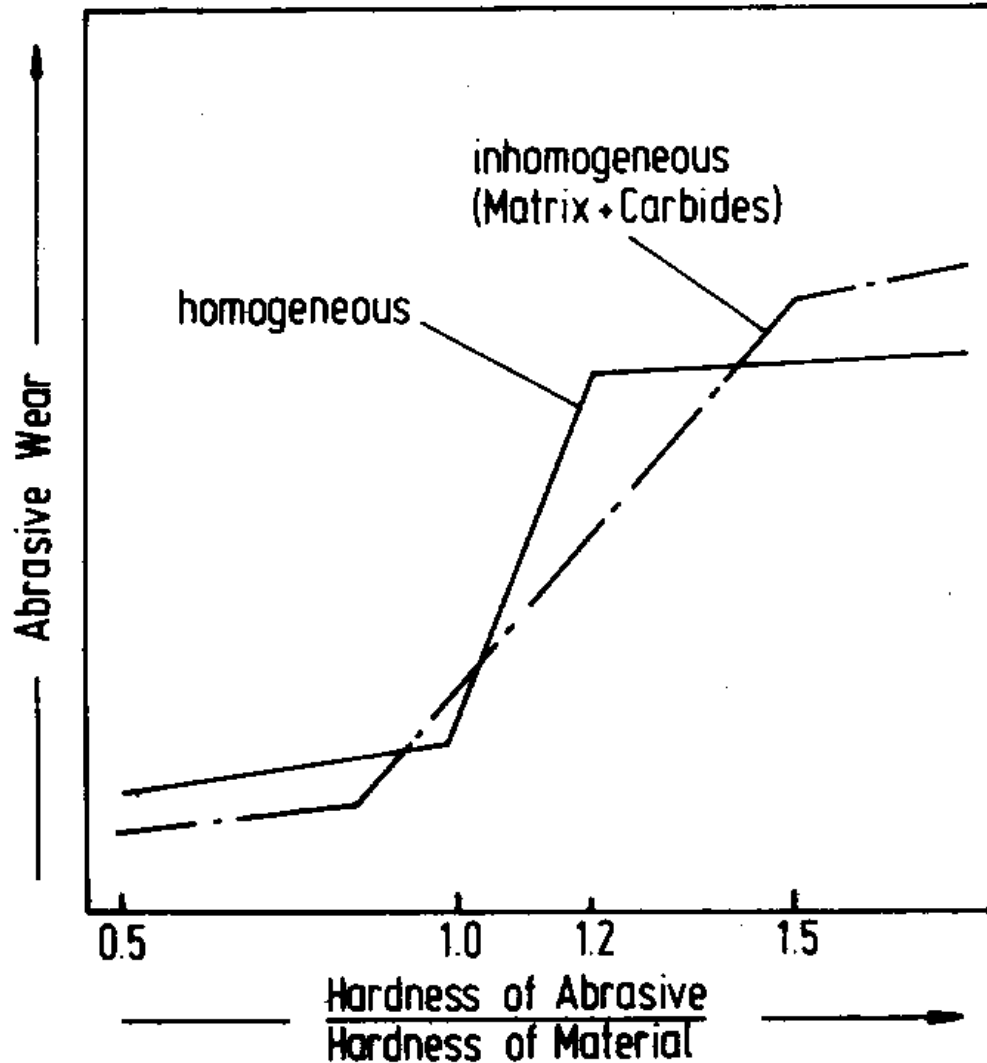
Abrasão



Desgaste abrasivo ocorre quando há deslocamento de material provocado por partículas de alta dureza existentes entre as duas superfícies em movimento ou embebidas em uma ou nas duas superfícies em movimento.

As partículas de alta dureza podem ter como origem o produto do processamento de minérios (sílica, alumina, etc.), fragmentos metálicos altamente encruados removidos da superfícies em contato, asperezas de usinagem de uma das superfícies em contato.

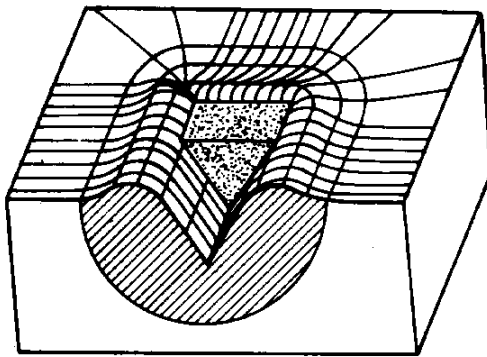
Transição entre regime de desgaste moderado-desgaste severo.



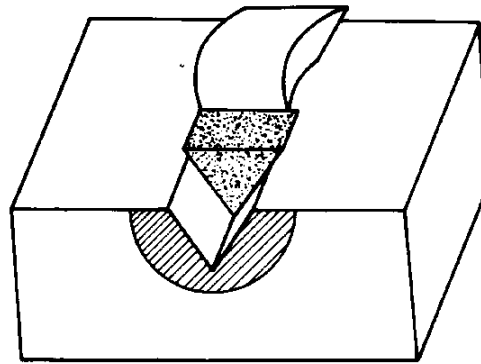
Sistemas hidráulicos sujos, extrusoras de plástico contendo carga, moinhos e britadores, matrizes utilizadas em metalurgia do pó e a própria operação de usinagem.

Observa-se uma transição entre regime de desgaste moderado para desgaste severo quando a relação entre as durezas da partícula abrasiva e do material se tornam maiores que 1.

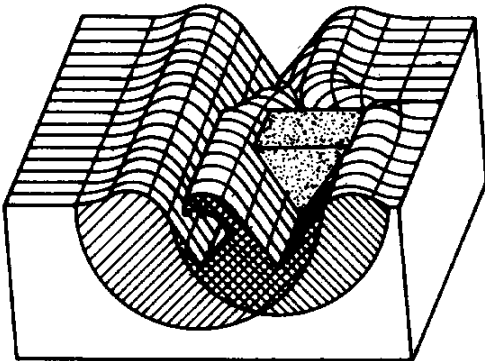
Abrasão: micromecanismos.



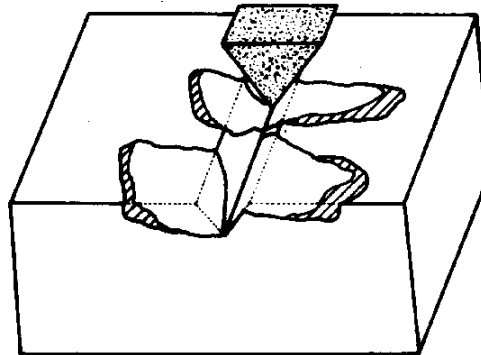
Microploughing



Microcutting



Microfatigue

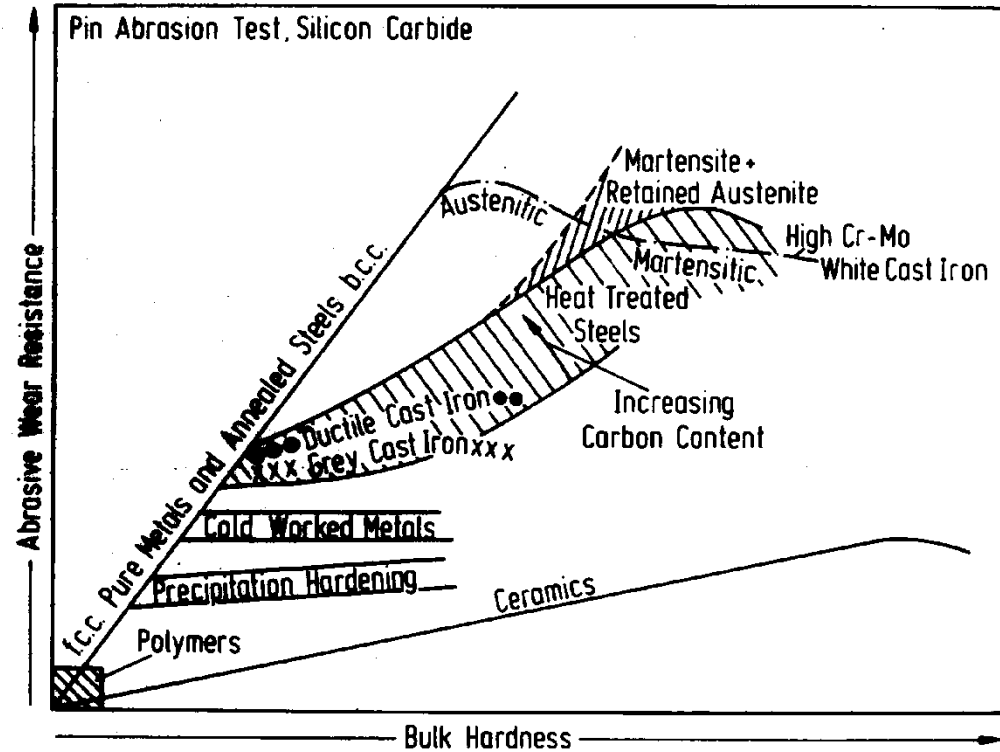
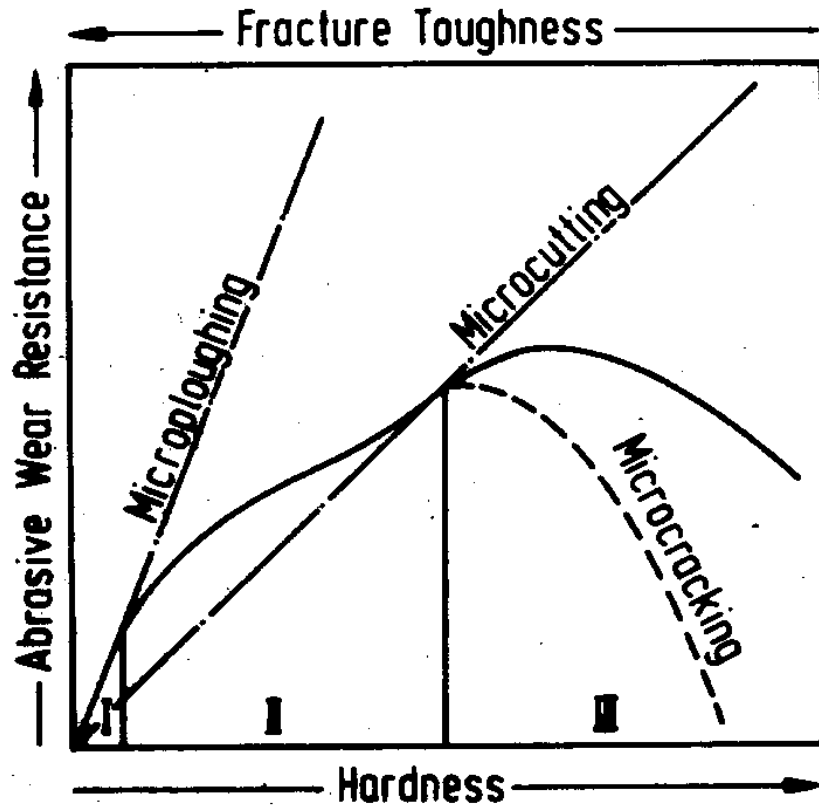


Microcracking

Quatro micromecanismos são responsáveis pelo desgaste abrasivo:

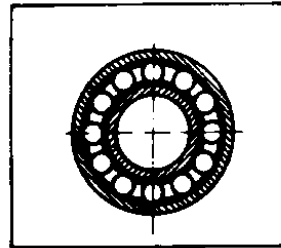
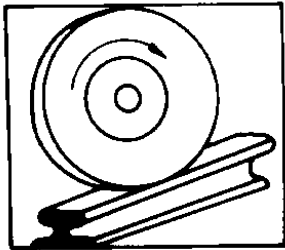
- a) microssulcamento.
- b) microcorte.
- c) microfadiga.
- d) microtrincamento.

Abrasão: efeito da dureza e da tenacidade.

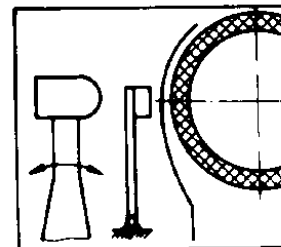
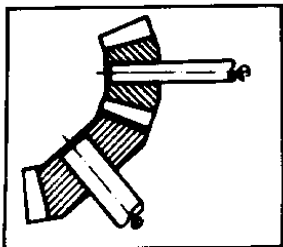
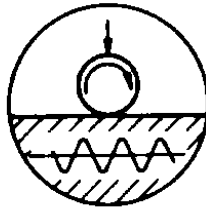
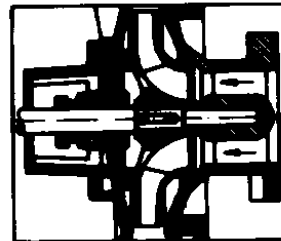
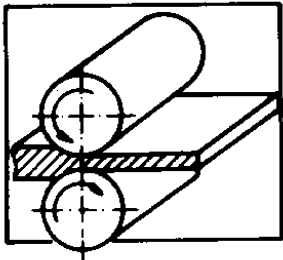


Efeito da dureza e da tenacidade sobre a resistência ao desgaste abrasivo de materiais.

Desgaste por Fadiga de Contato.



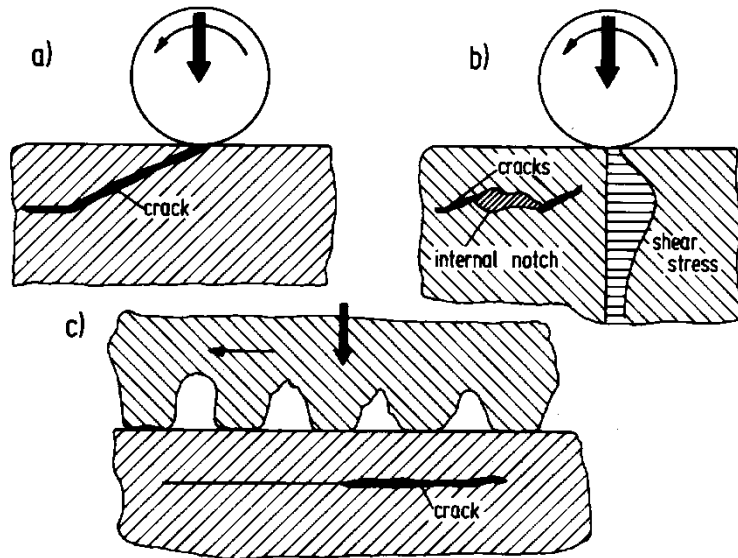
Surface Fatigue



Desgaste por fadiga de contato ocorre pela formação de trincas superficiais ou sub-superficiais devido a aplicação de cargas alternadas repetidas e lascamento do material

A fadiga ocorre na seqüência: deformação elástica, seguida de deformação plástica, encruamento, nucleação de trinca e propagação da trinca.

Desgaste por fadiga de contato.



As trincas podem ser nucleadas na superfície ou sub-superficialmente apesar de as tensões máximas serem sub-superficiais.

Pode ocorrer nucleação de trincas em irregularidades superficiais e por interação mecânica e química entre as superfícies.

Tensões de Hertz

O raio da área de contato de uma esfera com um plano é dado por:

$$a = 1,11 \left(\frac{F_N \cdot R}{E} \right)^{1/3}$$

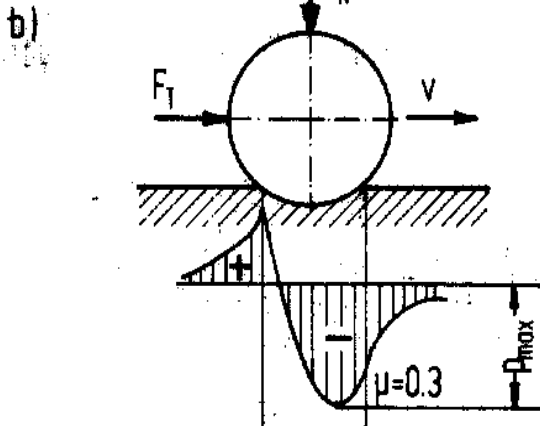
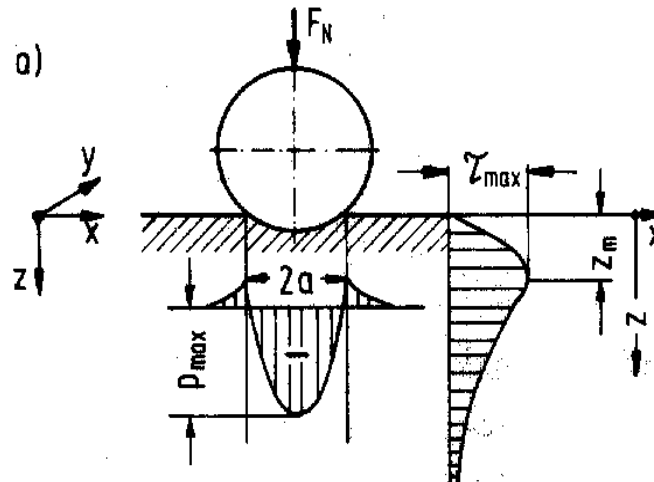
e a pressão máxima de contato:

$$p_{\max} = -0,388 \left(\frac{F_N \cdot E^2}{R^2} \right)^{1/3}$$

a máxima tensão de cisalhamento ocorre a uma profundidade Z_m

$$\tau_{\max} = 0,31 p_{\max}$$

$$Z_m = 0,47 a$$



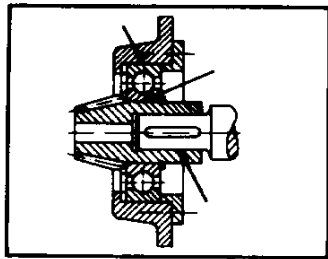
a = raio do círculo em contato

R = raio da esfera

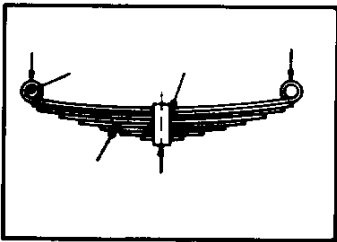
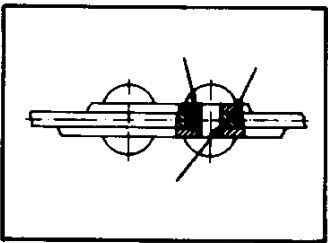
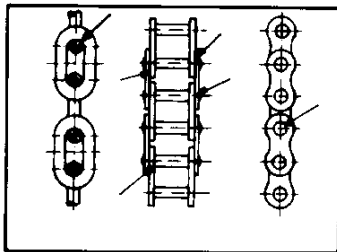
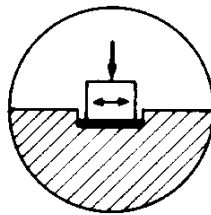
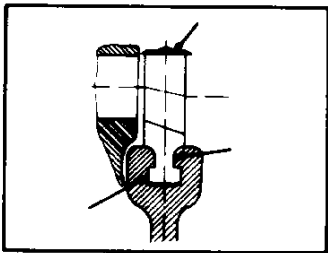
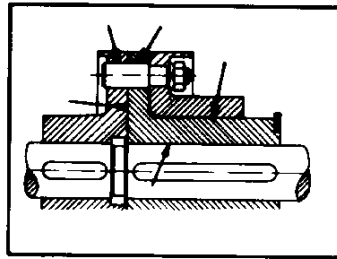
E = módulo elástico

F_N = Força normal

Desgaste por reação tribo-química.



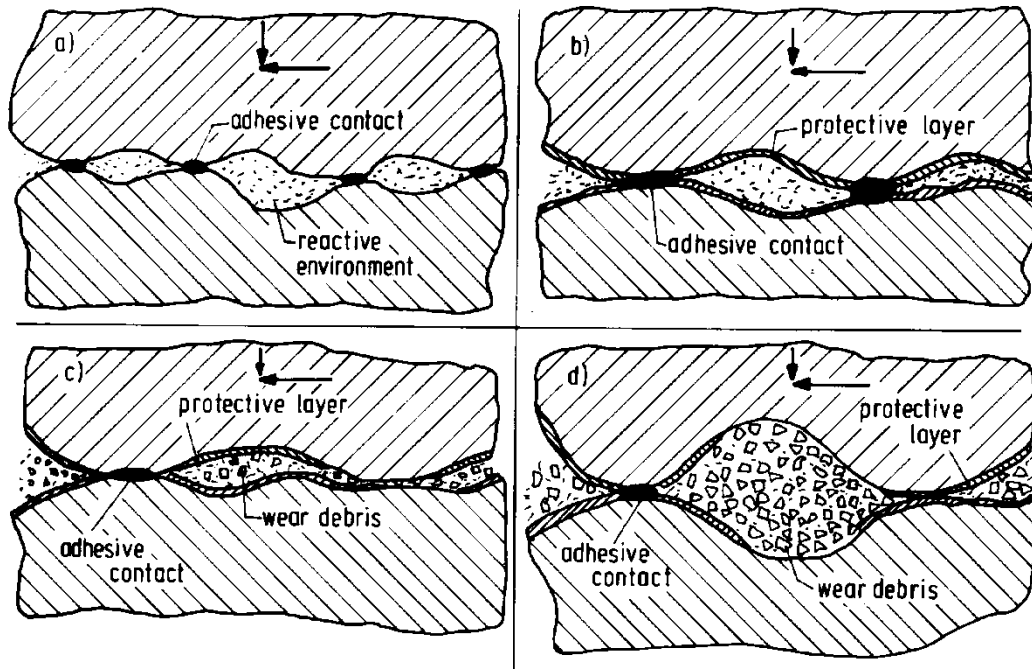
Tribochemical Wear



O desgaste por reação tribo-química pode ser caracterizado como sendo decorrente do contato de duas superfícies que se atritam e que reagem com o ambiente

O desgaste se processa pela contínua remoção e nova formação de camadas de produtos de reação sobre a superfícies em contato.

Desgaste por reação tribo-química.



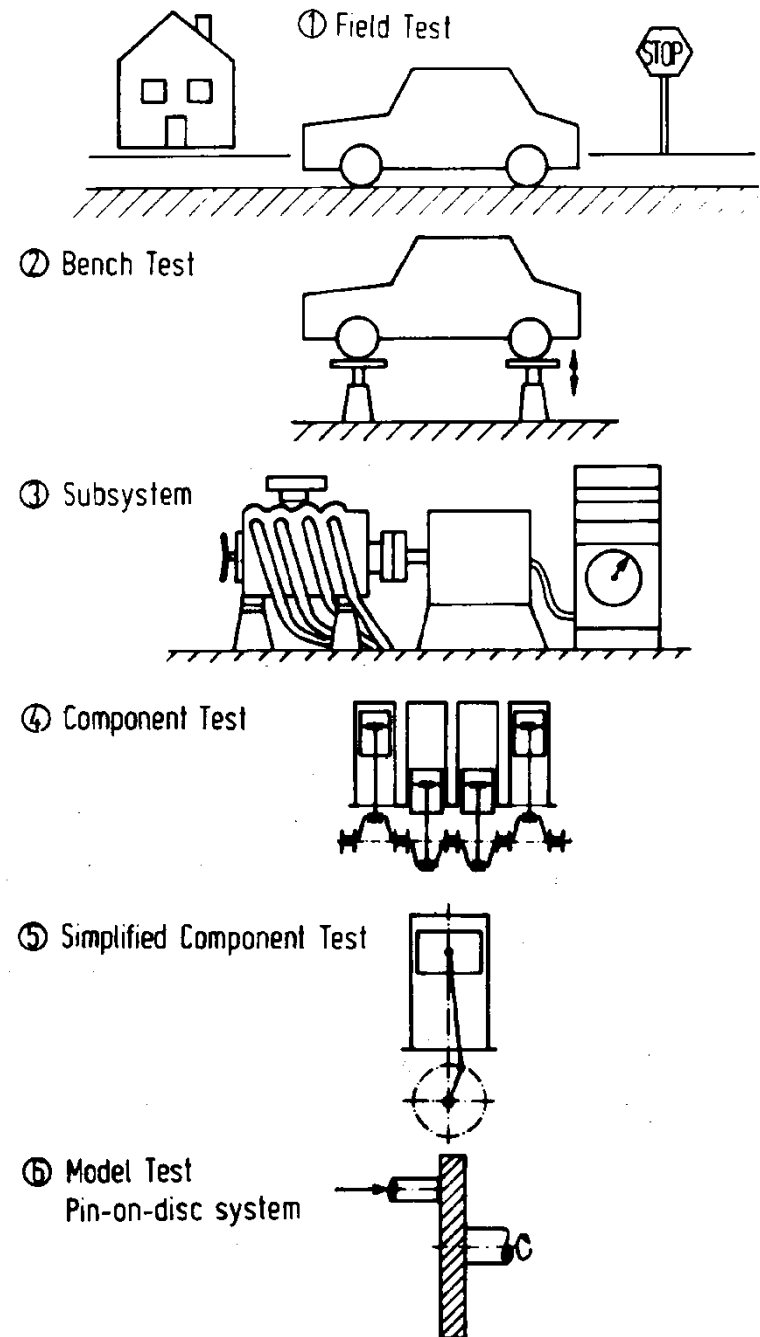
O desgaste se processa pela contínua remoção e nova formação de camadas de produtos de reação sobre a superfícies em contato.

- a) Adesão de asperezas e remoção de material com formação de fragmentos metálicos que se oxidam.
- b) reação do metal com o ambiente leva à formação de camadas protetoras que reduzem o contato metálico
- c) trincamento e fragmentação da camada protetora.
- d) fragmentos metálicos e não metálicos atuam com partículas abrasivas.

Ensaio de desgaste.

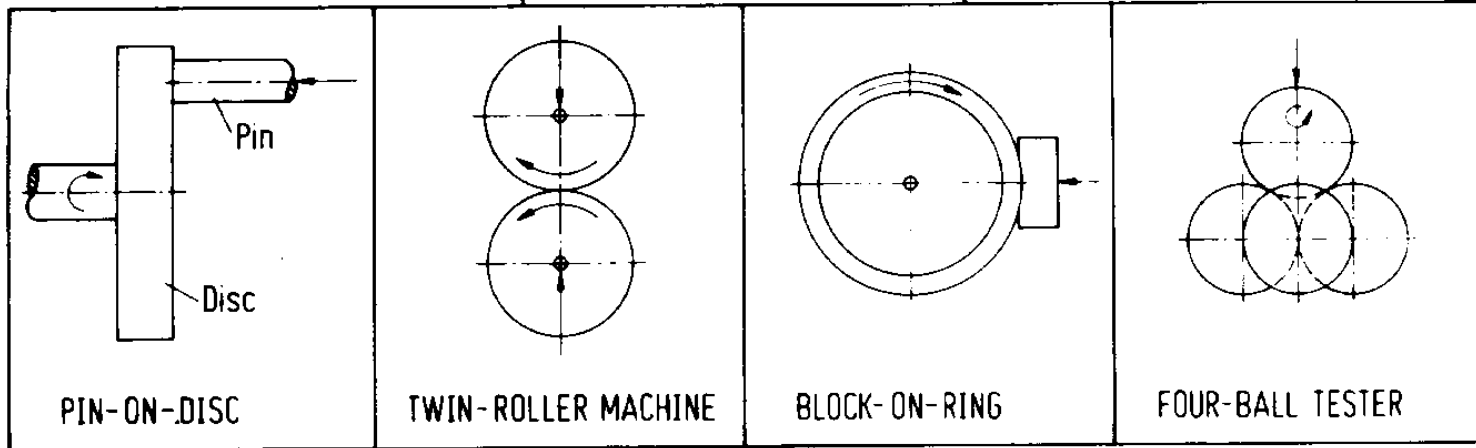
A resistência ao desgaste é uma propriedade que depende fortemente do sistema tribológico. Não é uma característica intrínseca do material.

Os ensaio de desgaste fornecem resultados, muitas vezes, específicos para a situação tribológica encontrada no ensaio.

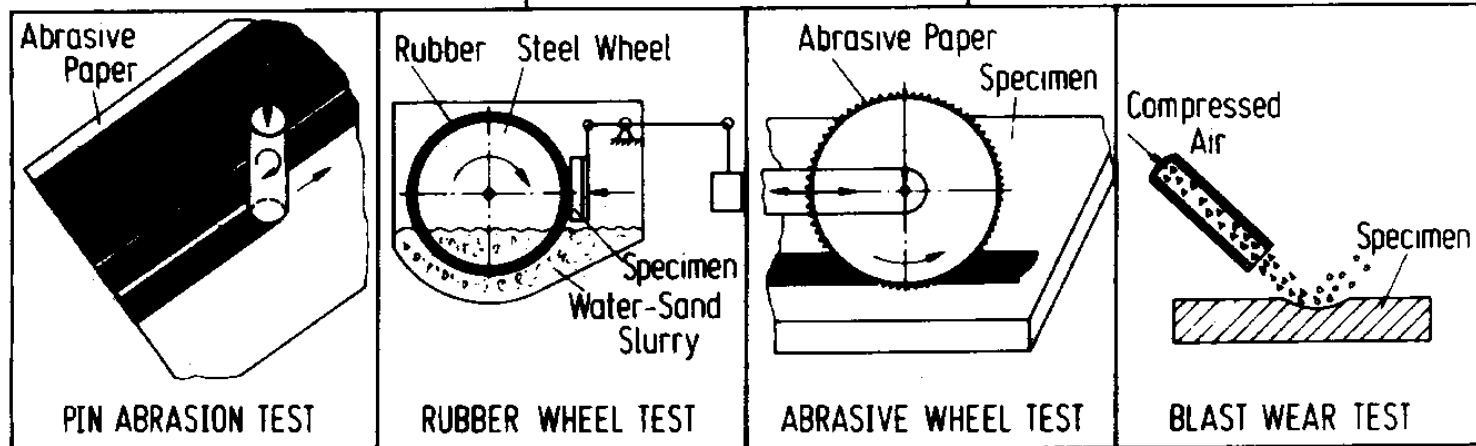


Ensaio de desgaste: tipos.

CLOSED TRIBOSYSTEMS



OPEN TRIBOSYSTEMS



Ensaio de desgaste

Lei de desgaste de Archard:

$$\frac{W_v}{s} = k \frac{F_N}{H}$$

W_v = desgaste volumétrico.

s = distância percorrida.

k = constante de desgaste.

F_N = força normal.

H = dureza.

Nos ensaios de desgaste mede-se:

perda de massa W (g/mm²)

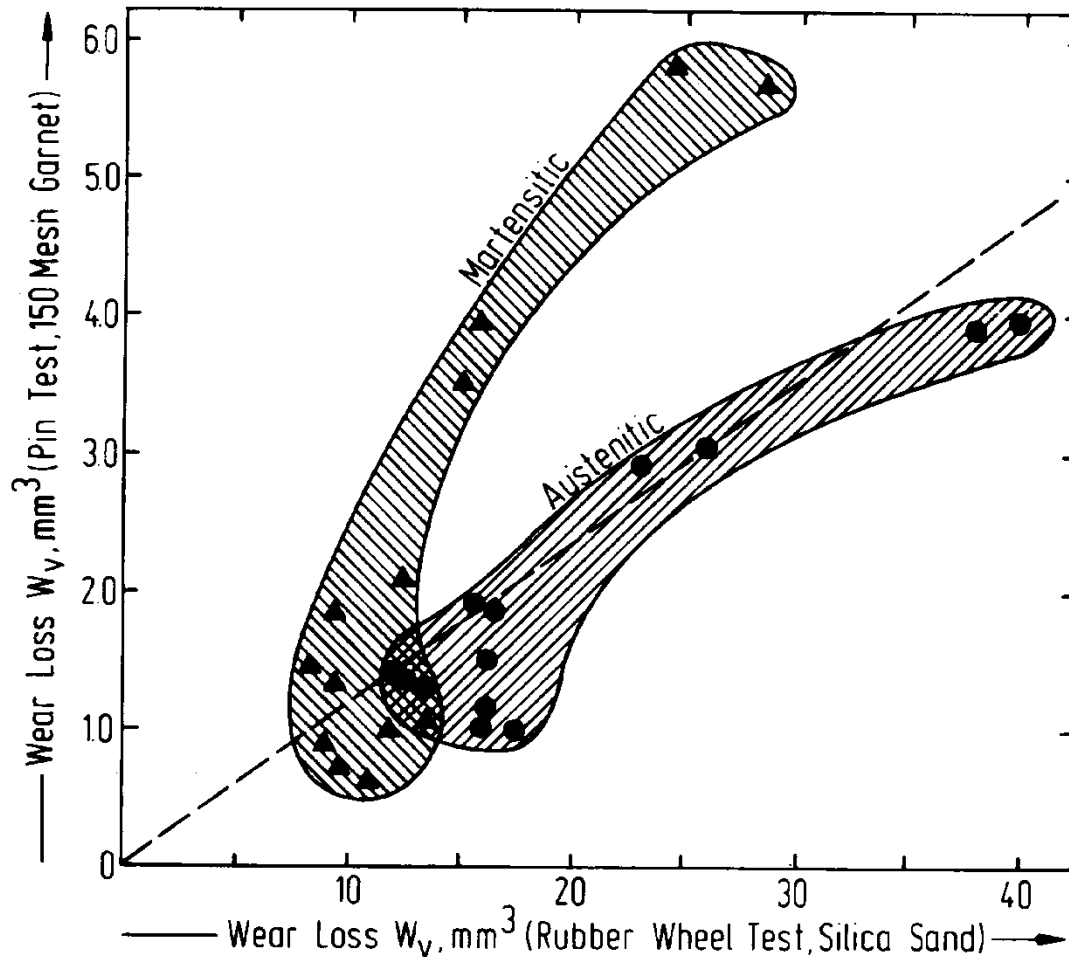
desgaste volumétrico W_v (mm³)

taxa de desgaste $W_{v/s}$ (mm²)

desgaste linear $W_{l/s}$

resistência ao desgaste $1/W_{v/s}$ (mm⁻²)

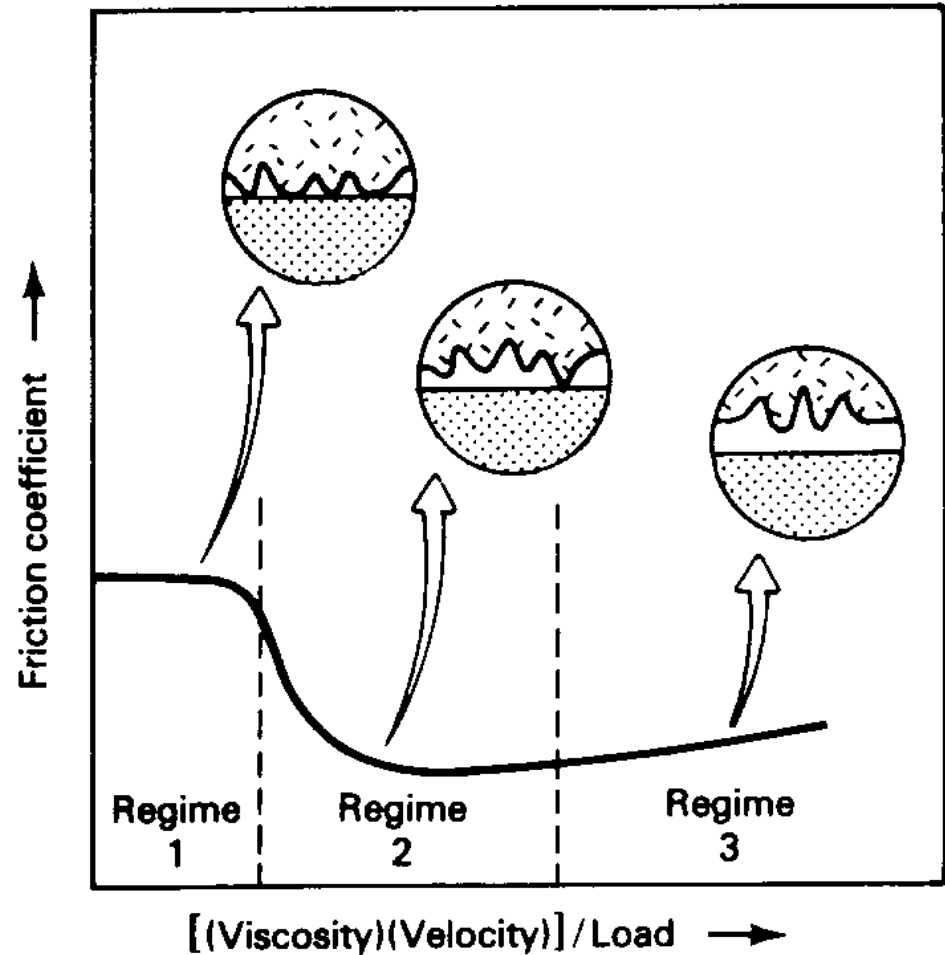
Ensaio de desgaste: comparação entre dois tipos de ensaios.



Um mesmo material pode fornecer resultados de perda de massa diferentes quando submetido a ensaios de desgaste diferentes, pois a situação tribológica é diferente.

Perda de massa de ferros fundidos austeníticos e martensíticos.

Lubrificação.



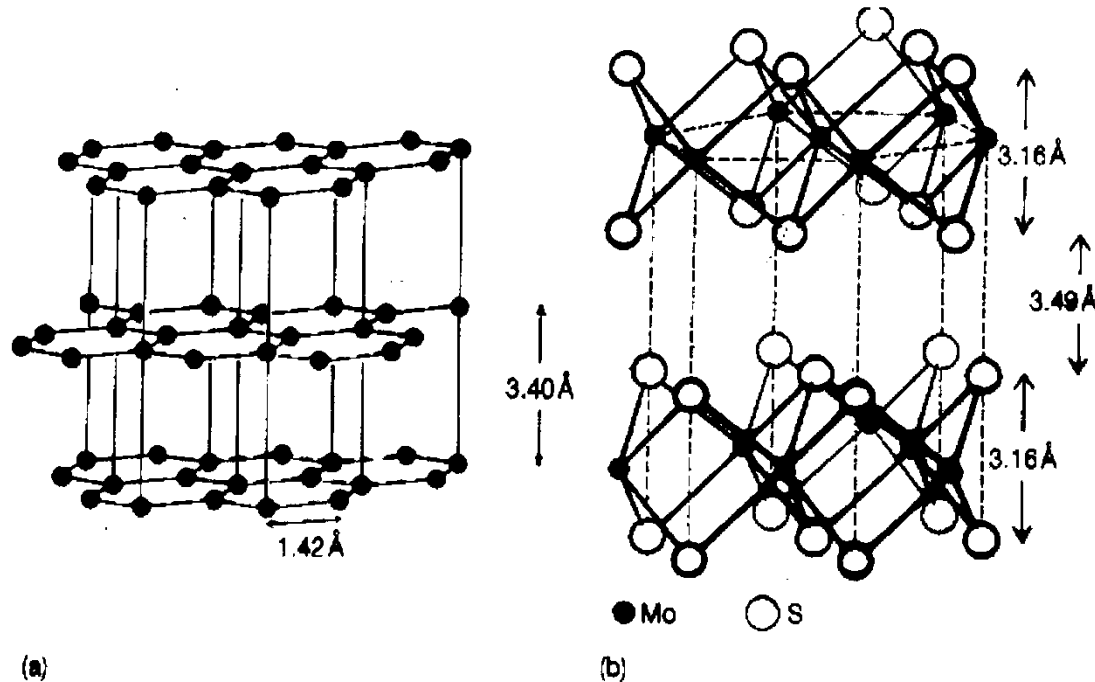
O coeficiente de atrito varia com o regime de lubrificação:

Regime 1 - Lubrificação limite (asperezas estão em contato).

Regime 2 - Lubrificação com filme fino (asperezas parcialmente em contato).

Regime 3 - Lubrificação com filme grosso (não há contato entre asperezas - Lubrificação Hidrodinâmica).

Lubrificantes sólidos.



Estrutura do (a) grafite e (b) dissulfeto de molibidênio.

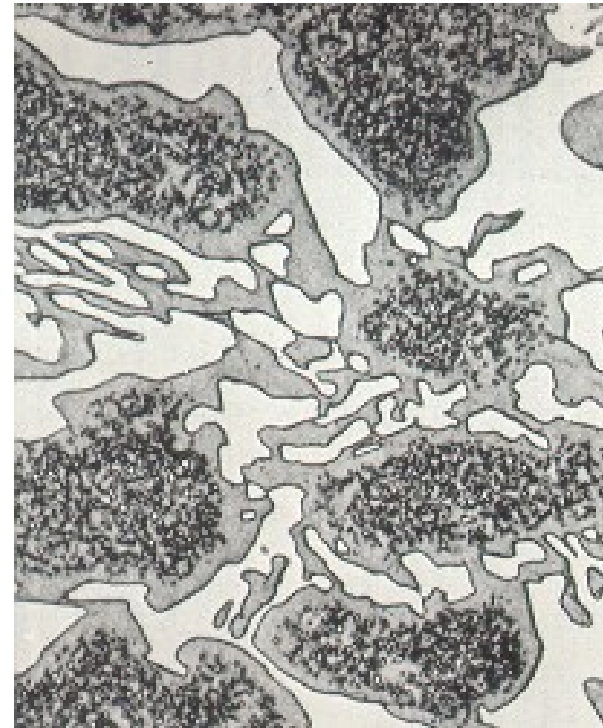
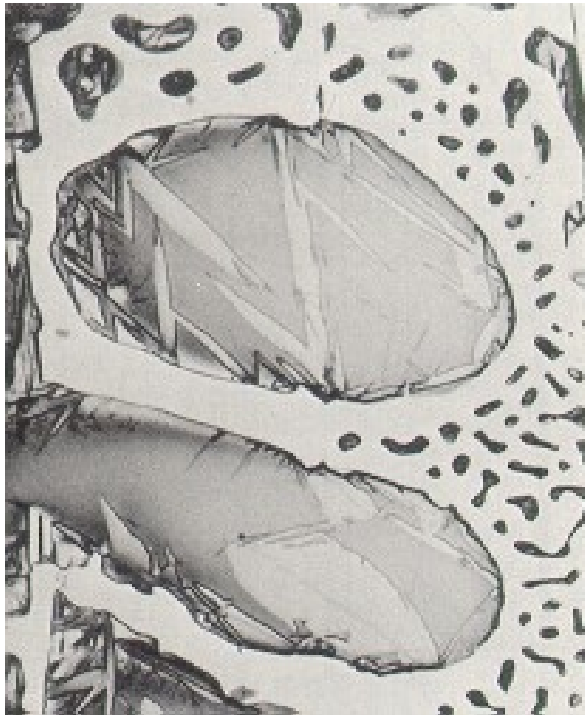
Lubrificantes sólidos têm estruturas em escamas ou lamelares com ligações de Van der Waals entre camadas atômicas

Aplicação: Materiais resistentes ao desgaste abrasivo para indústria de mineração.

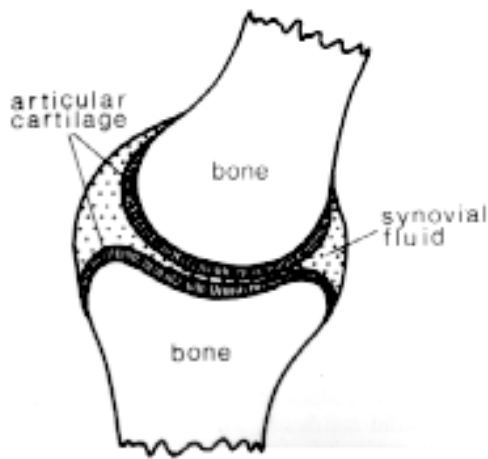
Os ferros fundidos de alta liga são materiais que possuem uma combinação de fases de alta dureza e alta resistência ao desgaste: carbonetos de ferros, carbonetos de elementos de liga, martensita e austenita retida.

Ni-Hard - rede contínua de Fe_3C - fase frágil é contínua.

Os ferros fundidos brancos de alto cromo possuem rede de carbonetos M_7C_3 não contínua. Apesar de serem carbonetos muito duros e frágeis não comprometem a tenacidade do material.



Aplicação: Implantes cirúrgicos.



Schematic showing key components of a natural synovial joint

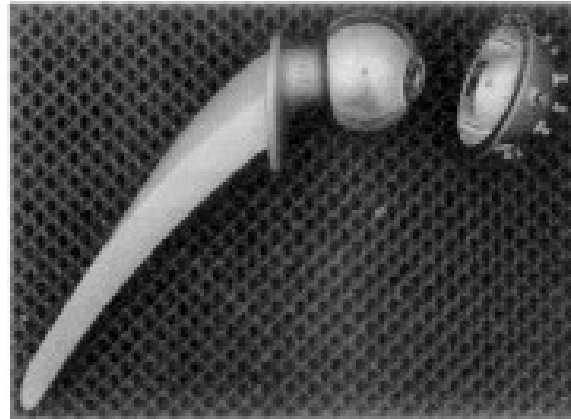


Fig 2 McKee-Farrar total replacement hip joint incorporating lapped-in Vitallium femoral and acetabular cup components. Stud shaped projections facilitate installation of cup into hip bone of patient.

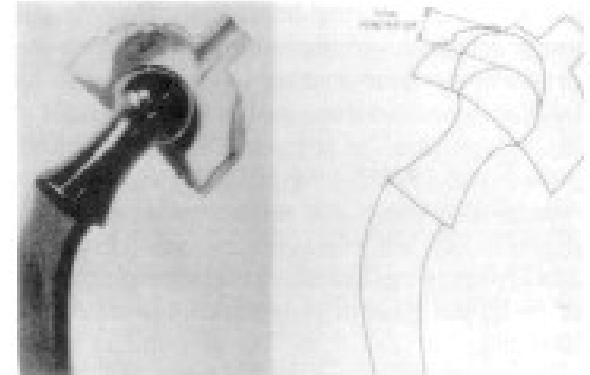


Fig 3 Excessive penetration of PTFE acetabular cup by a stainless steel femoral stem approximately 2 to 3 years after implantation of a vintage Charnley joint in the early 1960s

Inicialmente utilizava-se PTFE - Politetrafluoretileno, de baixo atrito porém não muito resistente ao desgaste.

Posteriormente passou-se a utilizar UHMWPE (polietileno de ultra-alto peso molecular) com alto grau de cristalinidade e alta resistência ao desgaste e esse material é o atualmente consagrado para a aplicação.

Referências

Sinatora, A. Tribologia, Epusp, 2005.

leituras adicionais

Zum-Gahr, K.H. Microstructure and wear of materials, Elsevier, 1987.

Lansdown, AR e Price, AL Materials to resist wear, Pergamon, 1986 (biblioteca do PMT)
Cap 1 e 2.