



METMAT

Tribologia, engenharia de superfície e tratamentos de superfície

tribes



tribologia

engenharia de superfícies

PMT-2200 - Ciência dos Materiais

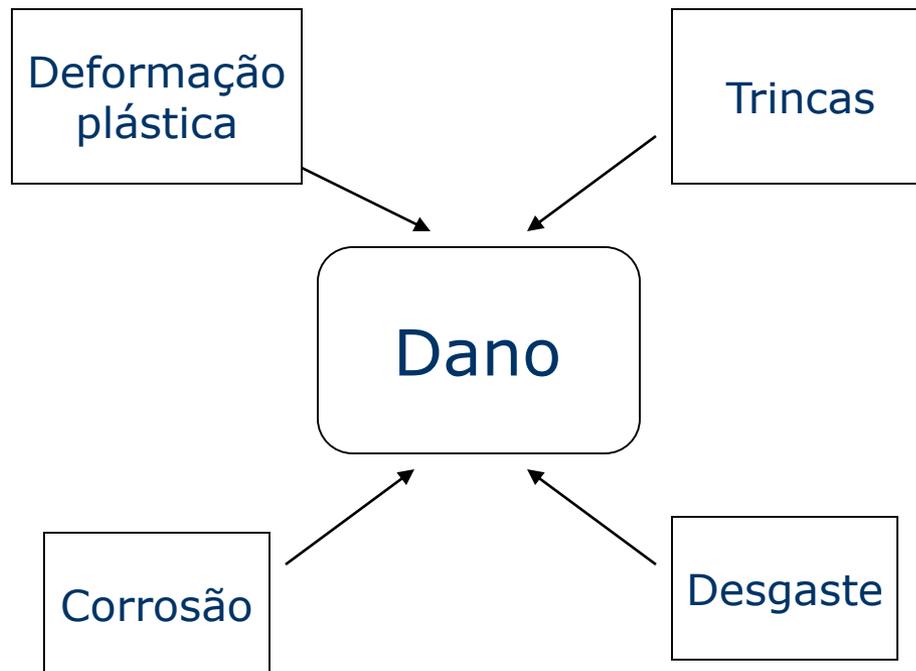
Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin

Atrito e Desgaste

- Wolfgang Pauli dizia que Deus criou os materiais e o Diabo criou as superfícies.
 - A característica diabólica das superfícies é que seus átomos compartilham átomos com átomos do mundo exterior. As propriedades dos átomos da superfície são muito diferentes dos átomos imersos no volume do material.
- 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.
- PIB de 2012 * 3% = US\$ 2,3 trilhões de dólares * 3% = R\$ 138 bilhões



Mecanismos de deterioração



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



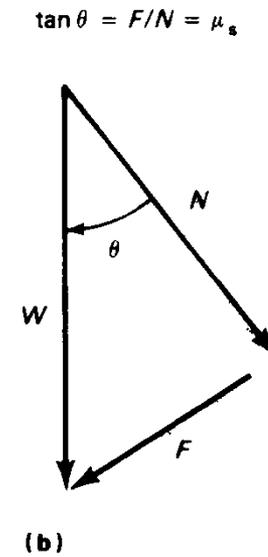
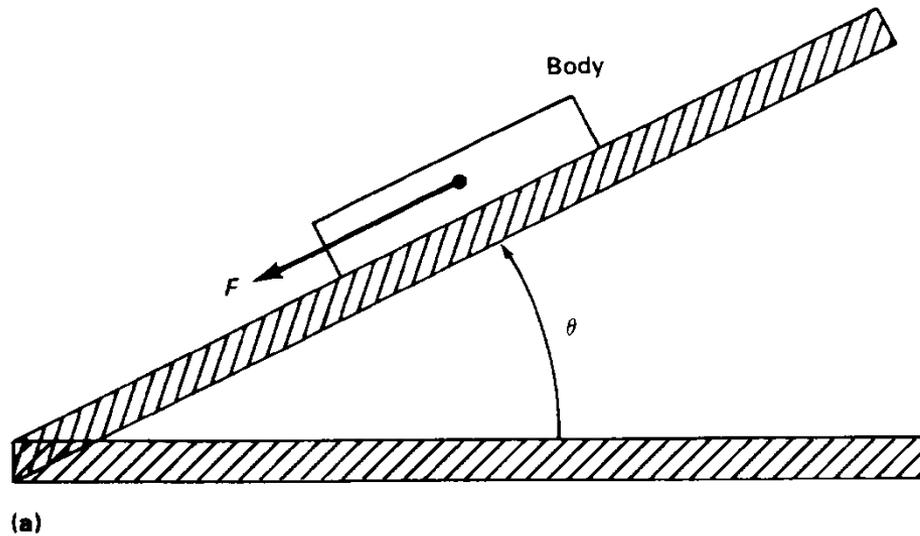
Atrito

- 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.
- Amontons (1663-1705) chegou às mesmas conclusões que da Vinci, 200 anos depois, sem saber que o trabalho já havia sido feito por da Vinci (o trabalho de da Vinci foi descoberto em 1968 – CODEX - Madrid).
- Entretanto, a técnica de medição não era suficientemente precisa.

Atrito

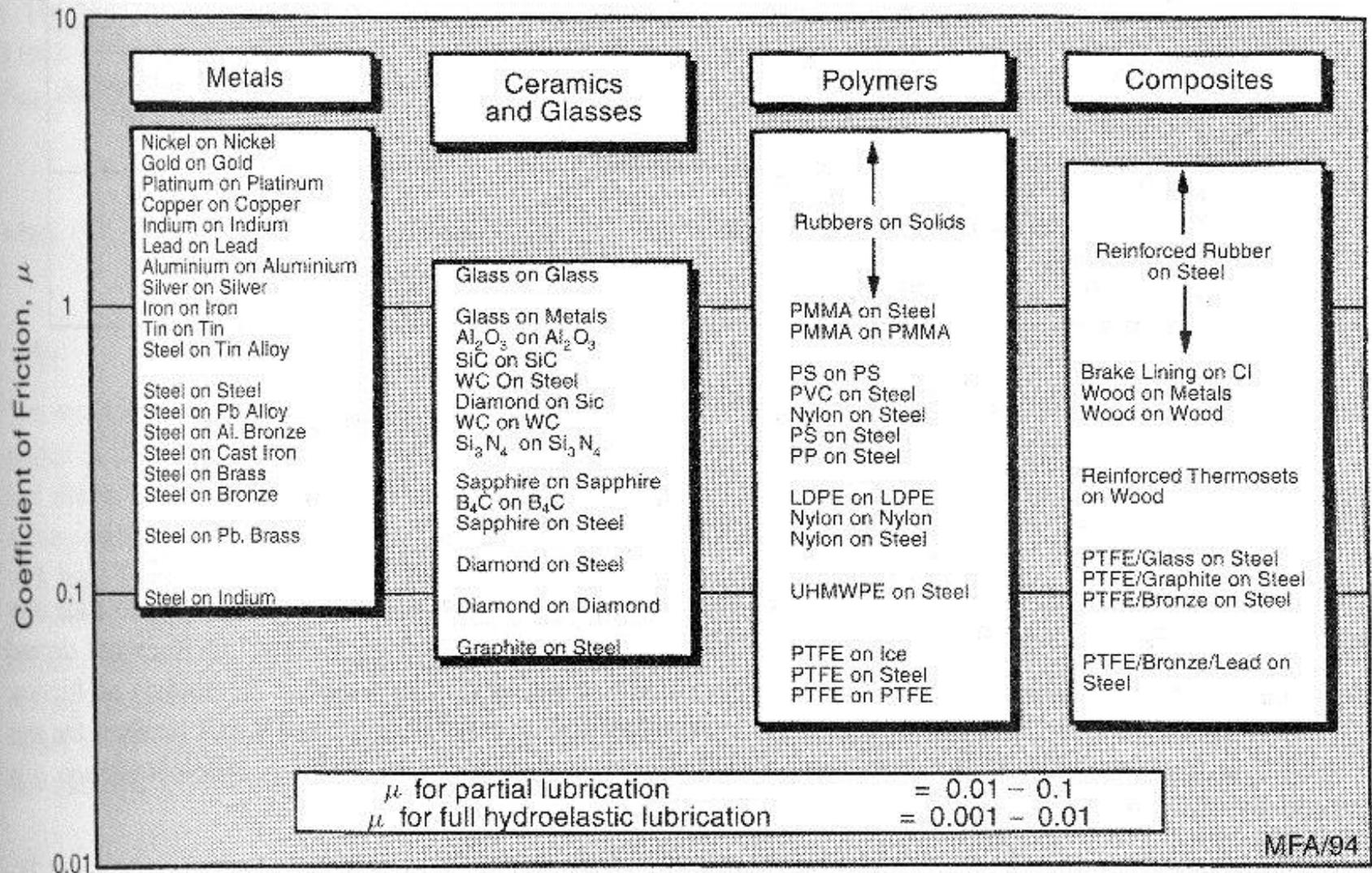
Coeficiente de atrito

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





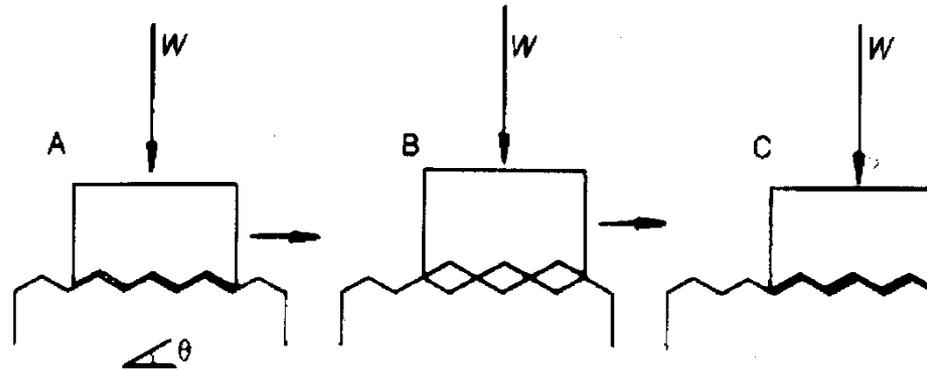
Atrito



(a)

Modelo de Coulomb

- O atrito é uma resistência ao movimento e surge das interações ente os sólidos em uma área de contato real.
- O fenômeno de atrito depende da interação entre asperezas.

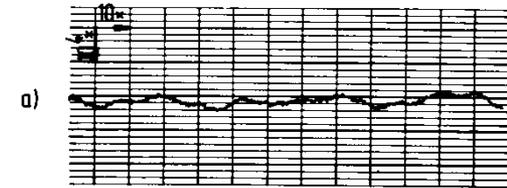
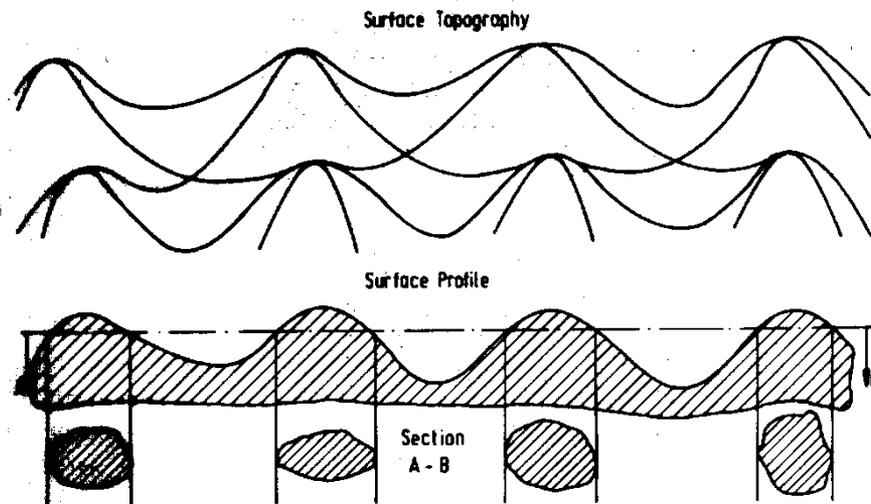


Esquema ilustrando o modelo de Coulomb. De A para B é realizado trabalho contra a carga normal. Então, de B para C a carga realiza igual quantidade de trabalho.

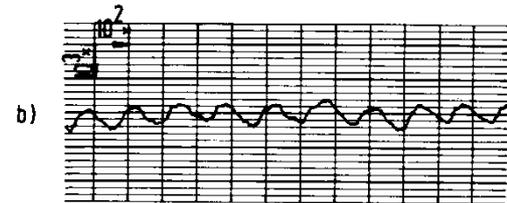
- A dissipação de energia é essencial para qualquer modelo que represente o atrito.
- O trabalho realizado para elevar o centro de gravidade do corpo é todo recuperado em seguida.

Superfícies em contato

- A área de contato real é diferente da área aparente.



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



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

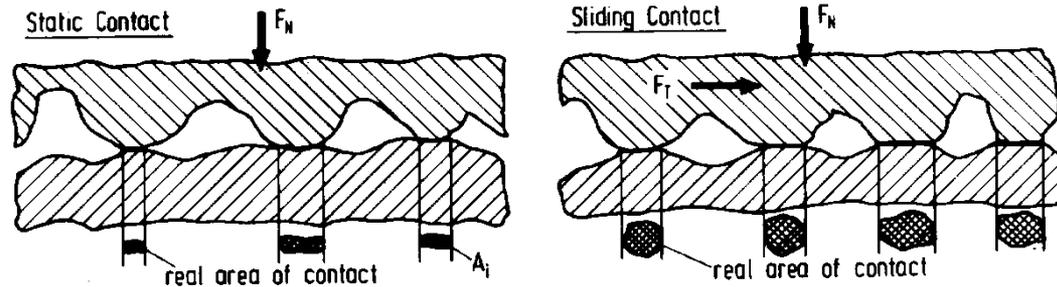
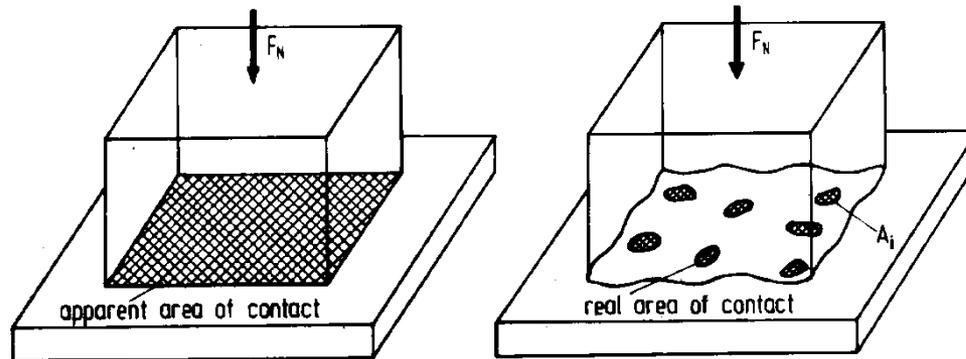


$R_a = 0.42 \mu\text{m}$, $R_t = 3.21 \mu\text{m}$

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



Superfícies em contato



Diferença entre área de contato aparente e real e entre área real de contato em repouso e em deslizamento

Atrito

- A força de atrito depende da área de contato real.
- O aumento da carga promove aumento da área de contato.
- O atrito é gerado por mecanismos de interferência mecânica, interações químicas e tribo-químicas 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.

Tensões de Hertz

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

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

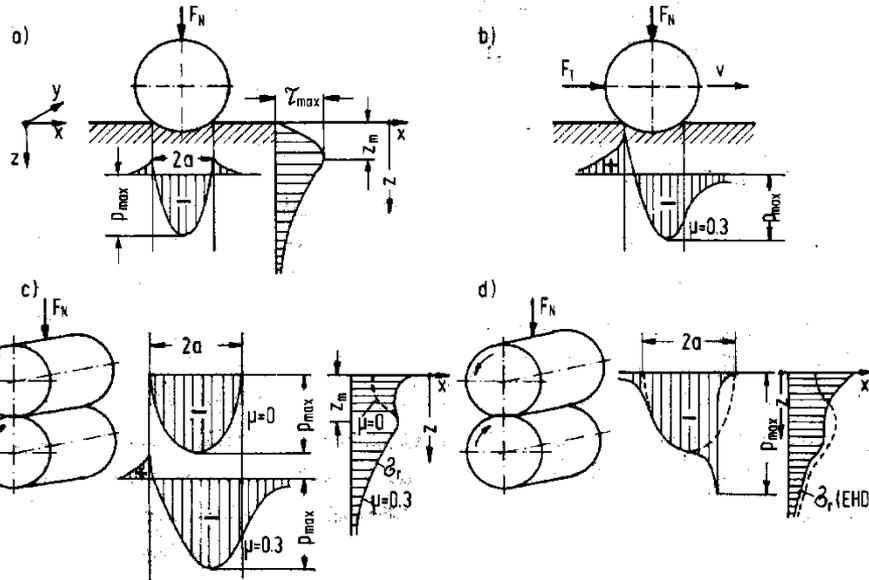
e a pressão máxima de contato:

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

a máxima tensão de cisalhamento ocorre a uma profundidade Z_m

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

$$Z_m = 0,47 a$$

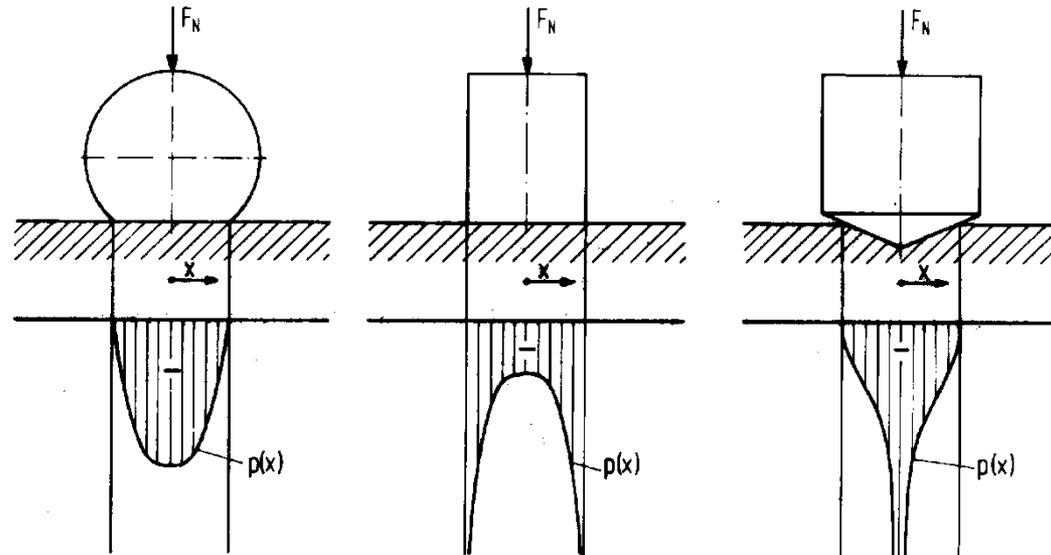


a = raio do círculo em contato
 R = raio da esfera
 E = módulo elástico
 F_N = Força normal



Tensões de Hertz

METMAT

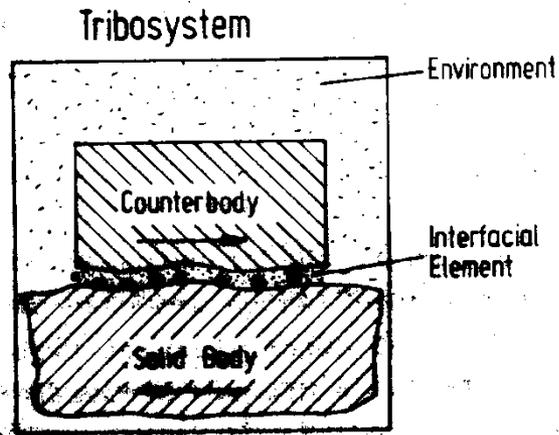
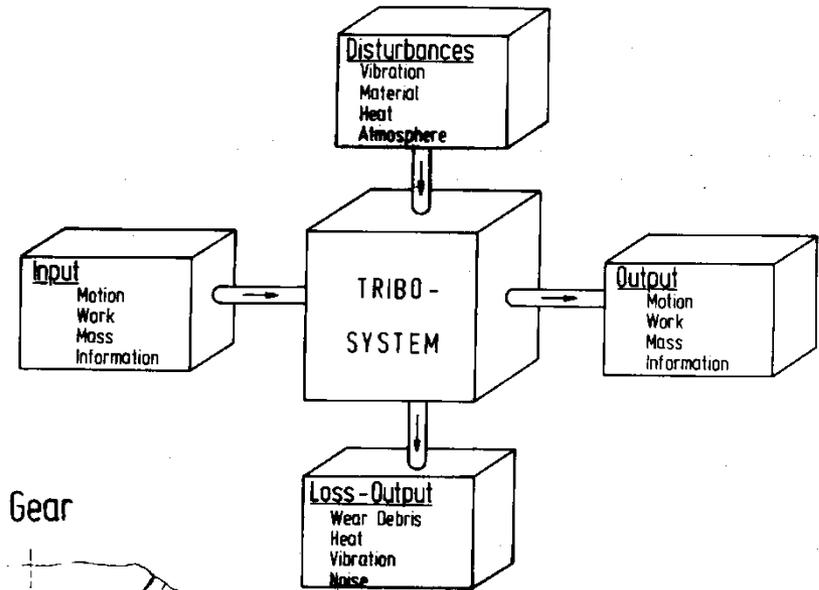


Curvas de distribuição de pressões em um contato elástico para três diferentes penetradores.

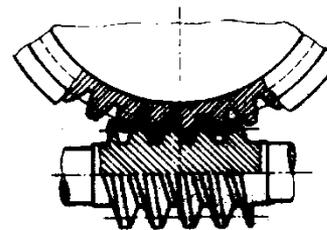


Tribossistema

METMAT



Worm Gear

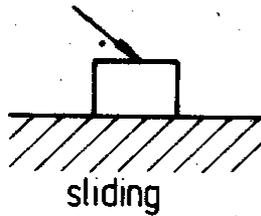


- solid body : worm
- counterbody : worm wheel
- interfacial element : oil
- environment : air

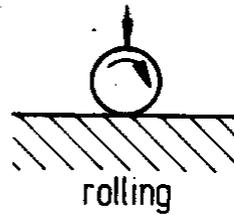


Modos de desgaste

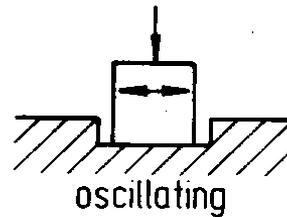
Sliding Wear



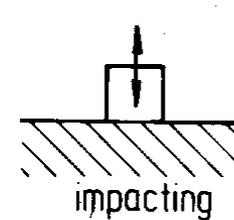
Rolling Wear



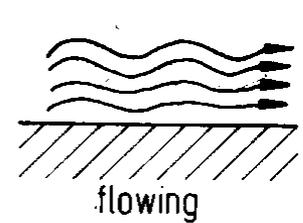
Oscillation Wear



Impact Wear



Erosive Wear



sliding

rolling

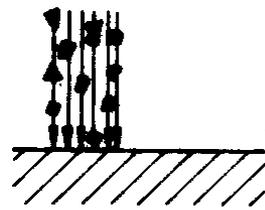
oscillating

impacting

flowing

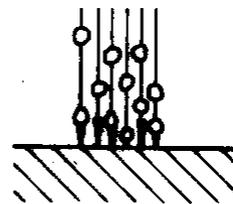
Motion

Particle Erosion



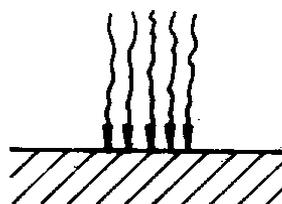
solid particle
+
liquid or gas

Drop Erosion



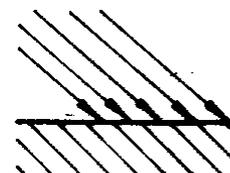
liquid particle
+
liquid or gas

Fluid Erosion

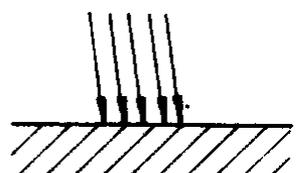


stream
of
liquid or gas

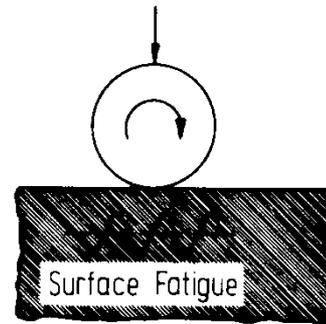
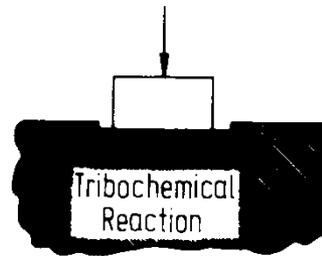
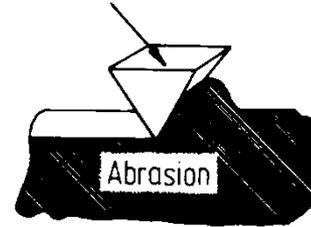
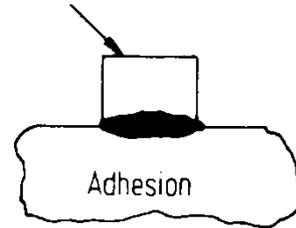
Low Angle
Erosion



High Angle
Erosion



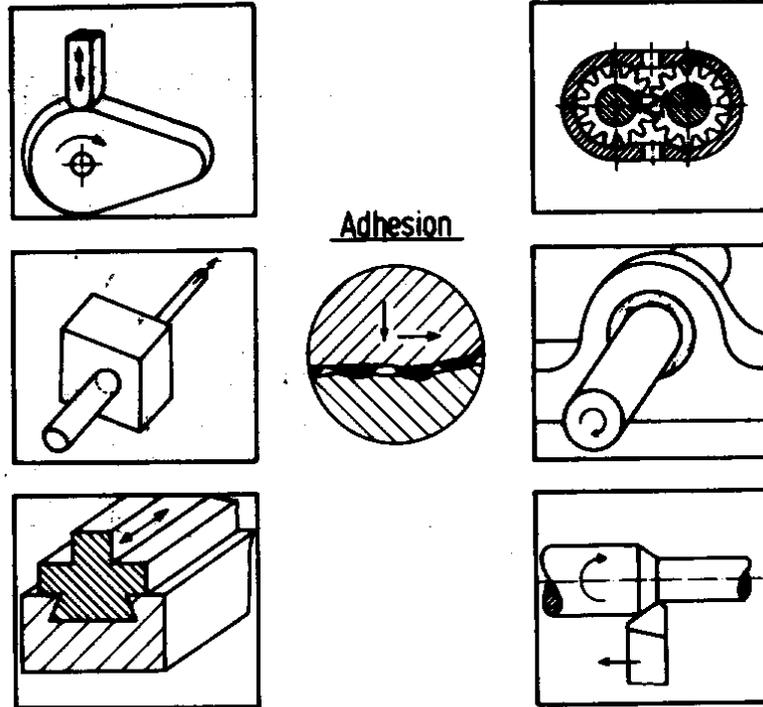
Mecanismos de desgaste



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

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

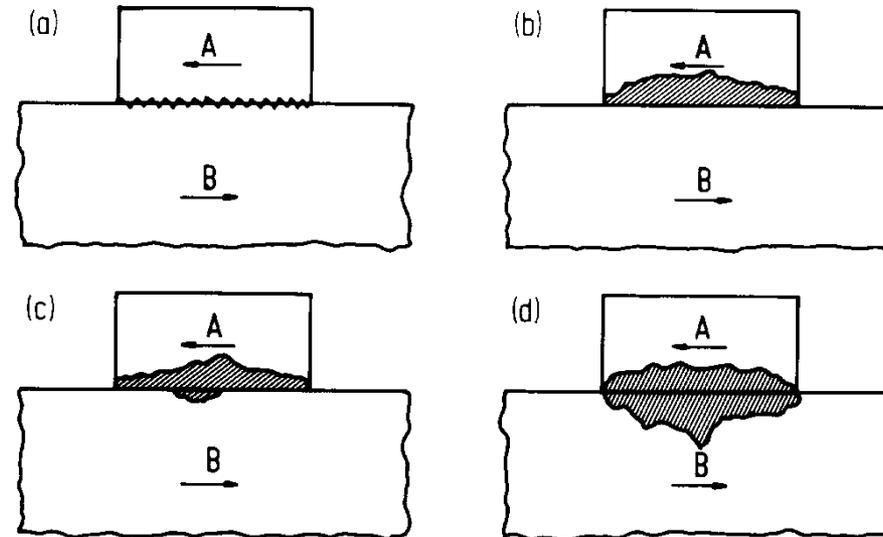
Desgaste adesivo



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



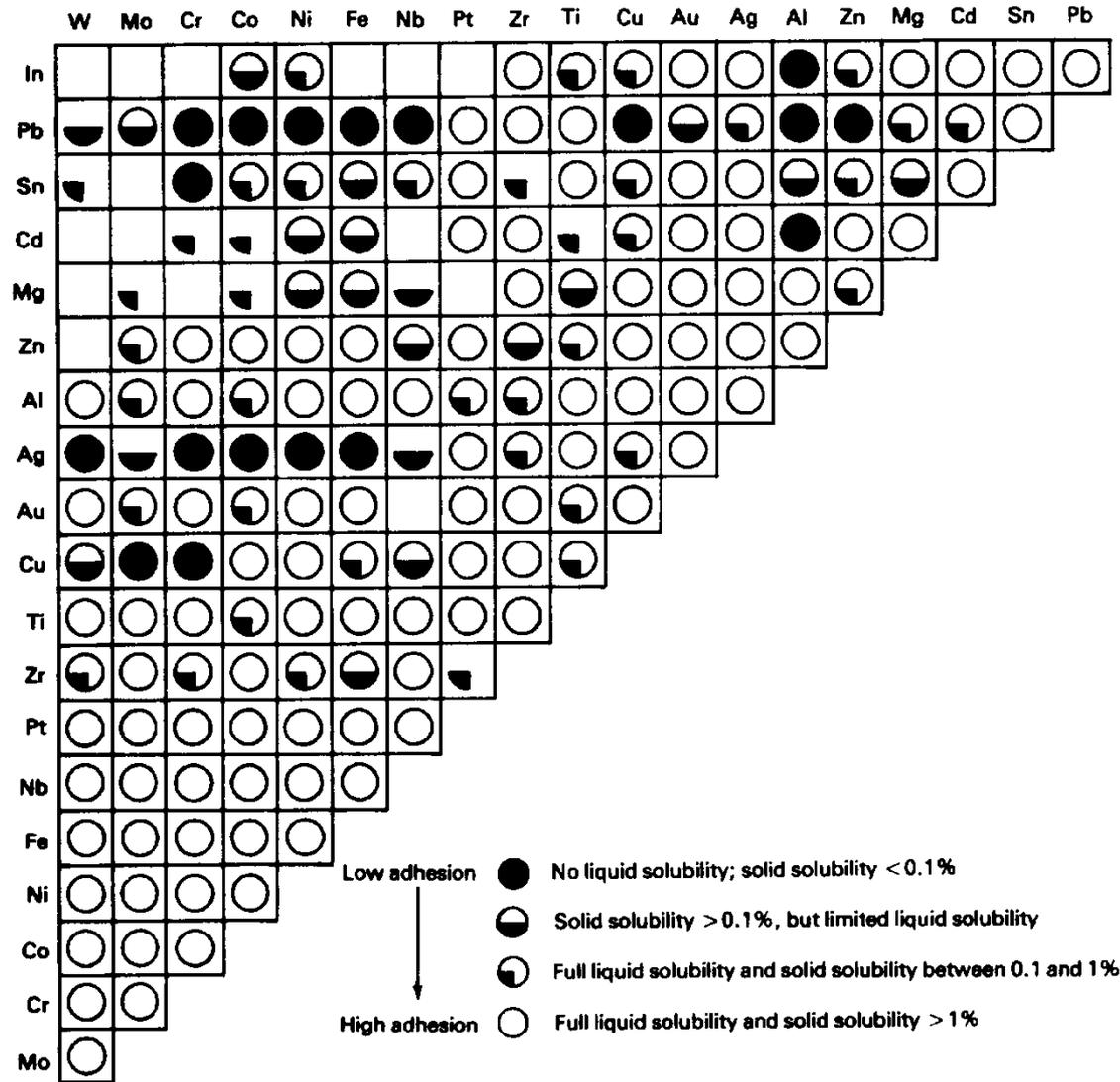
Desgaste adesivo



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

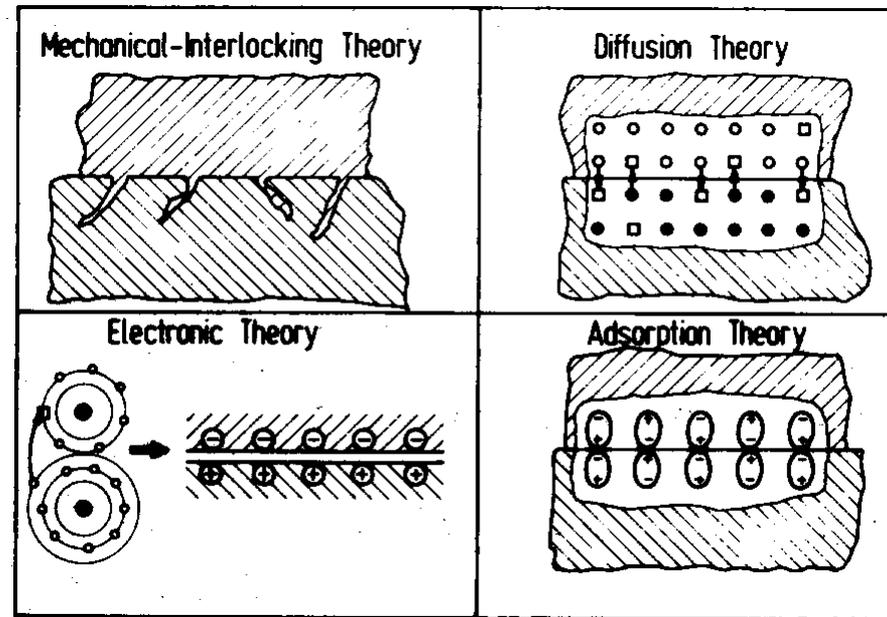


Segundo Rabinovic apresentam maior tendência para adesão

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.

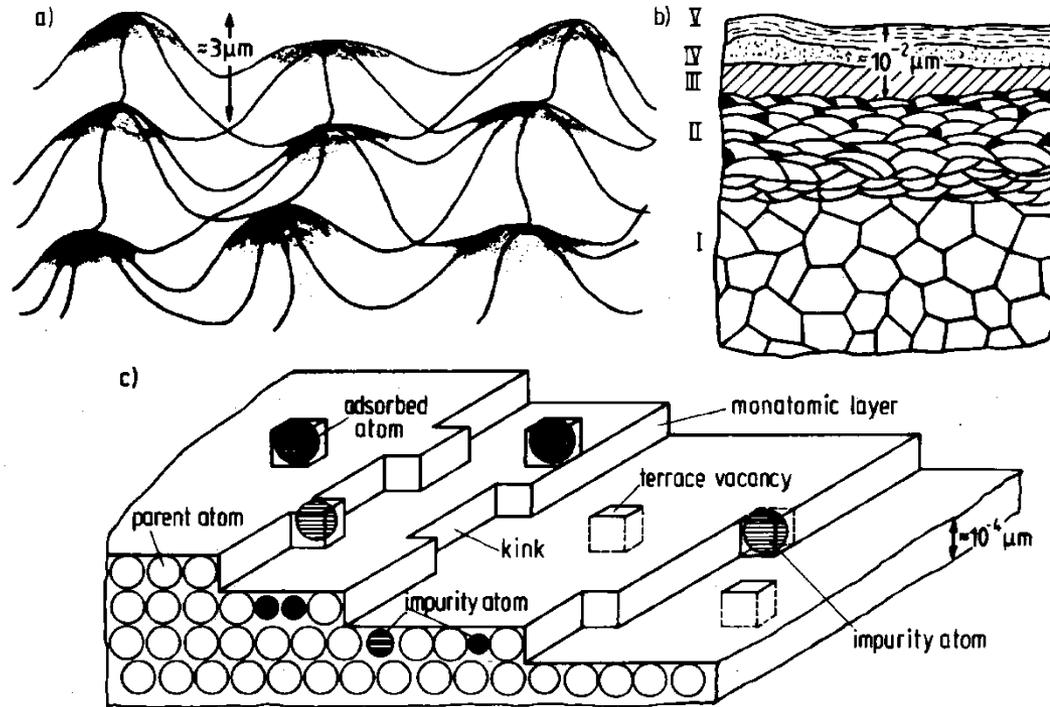
Mecanismos de adesão



- 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.



Topografia e estrutura da superfície de metais



Topografia e estrutura da superfície de metais

I - microestrutura do metal base

II - camada encruada

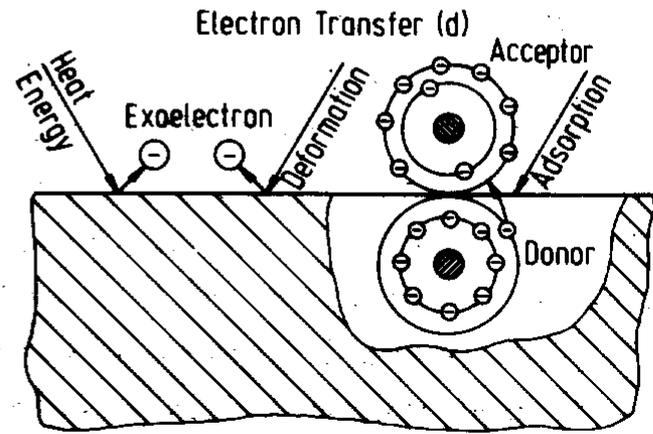
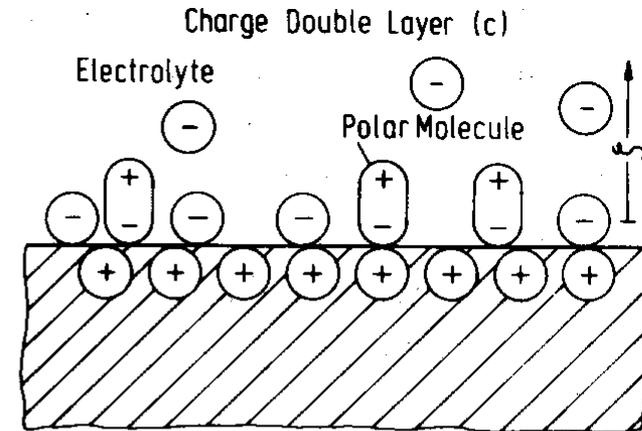
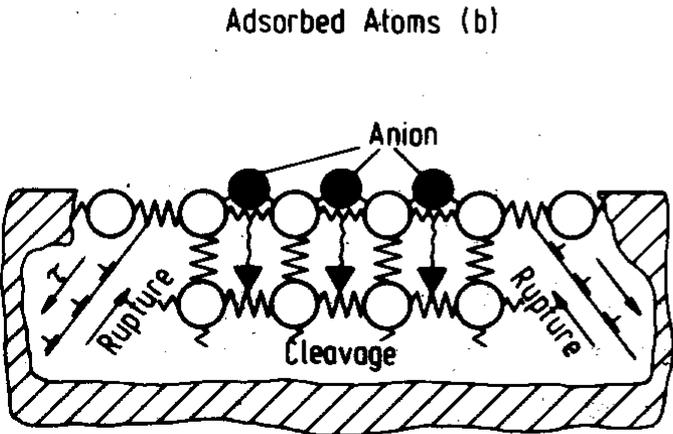
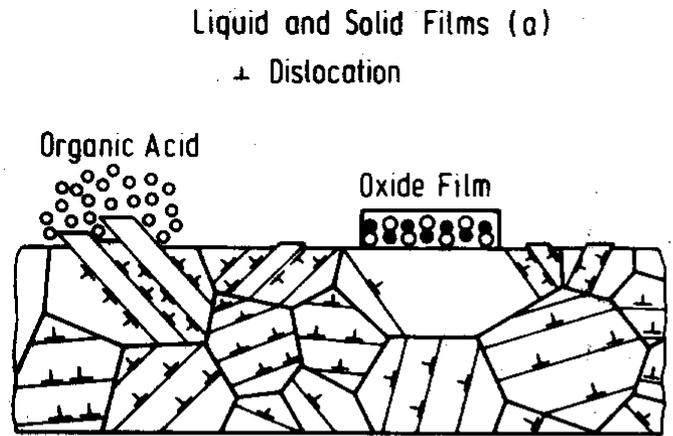
III - camada de reação

IV - camada de adsorção

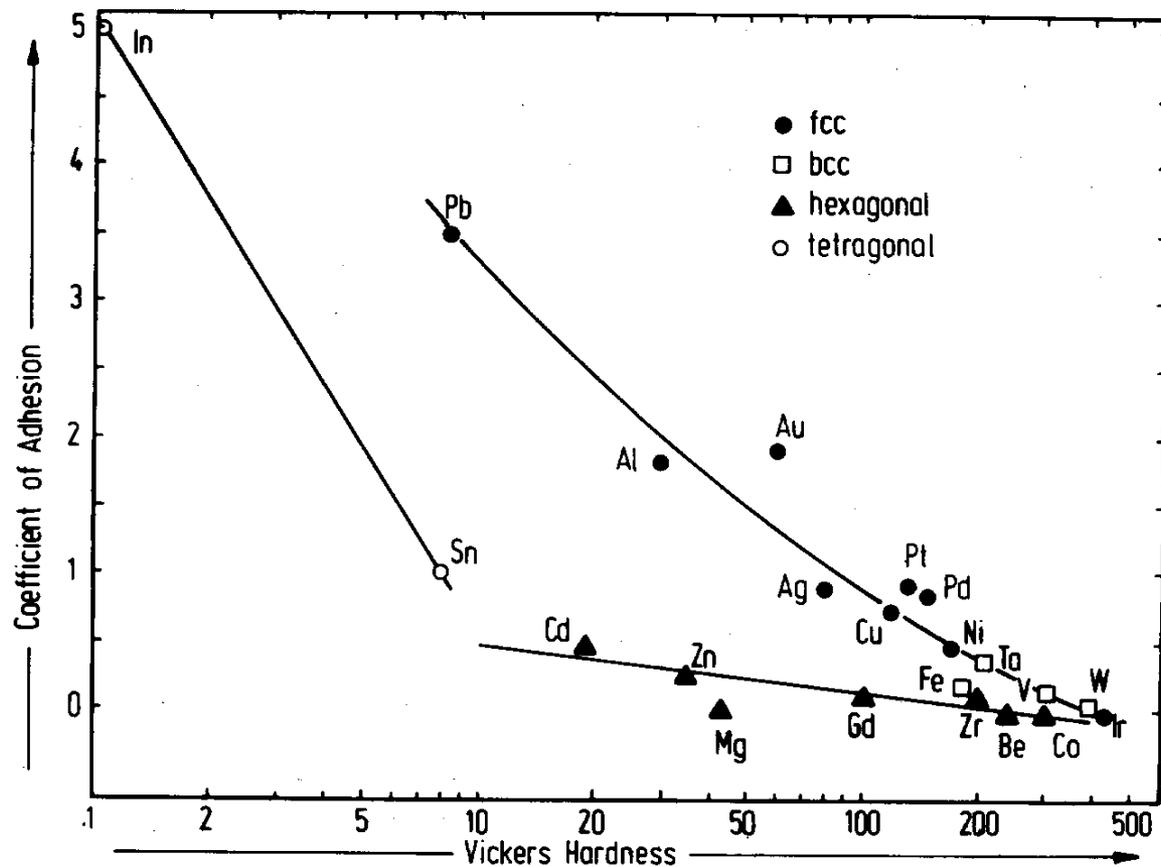
V - camada de contaminação



Adesão

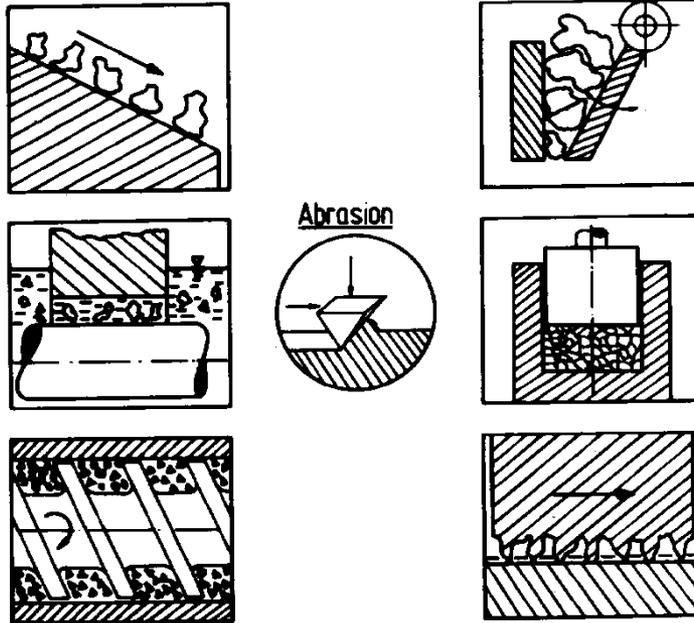


Adesão



Relação entre dureza , estrutura cristalina e coeficiente de adesão

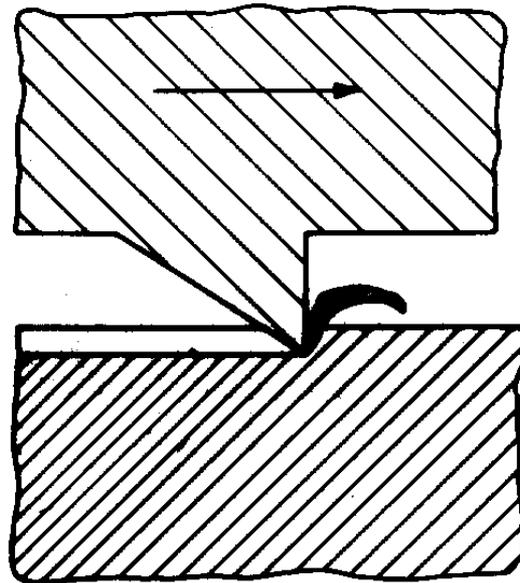
Abrasão



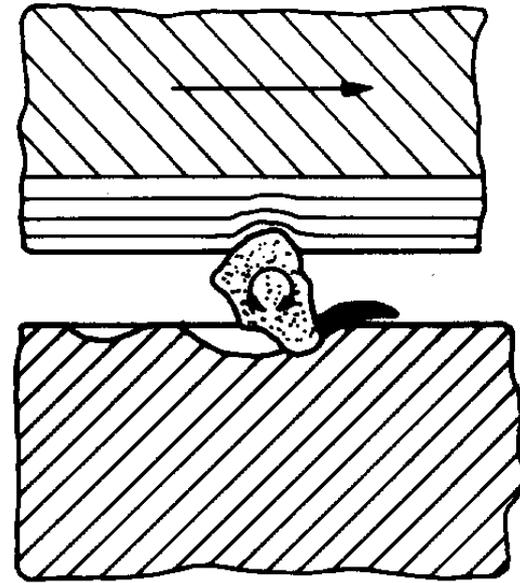
- Desgaste abrasivo ocorre quando há deslocamento de material provocado por partículas de alta dureza existentes entre as duas superfícies em movimento ou embebidas em uma ou nas duas superfícies em movimento.
- As partículas de alta dureza podem ter como origem o produto do processamento de minérios (sílica, alumina, etc.), fragmentos metálicos altamente encruados, removidos das superfícies em contato ou asperezas de usinagem de uma das superfícies em contato.

Tipos de abrasão

2- Body Abrasion

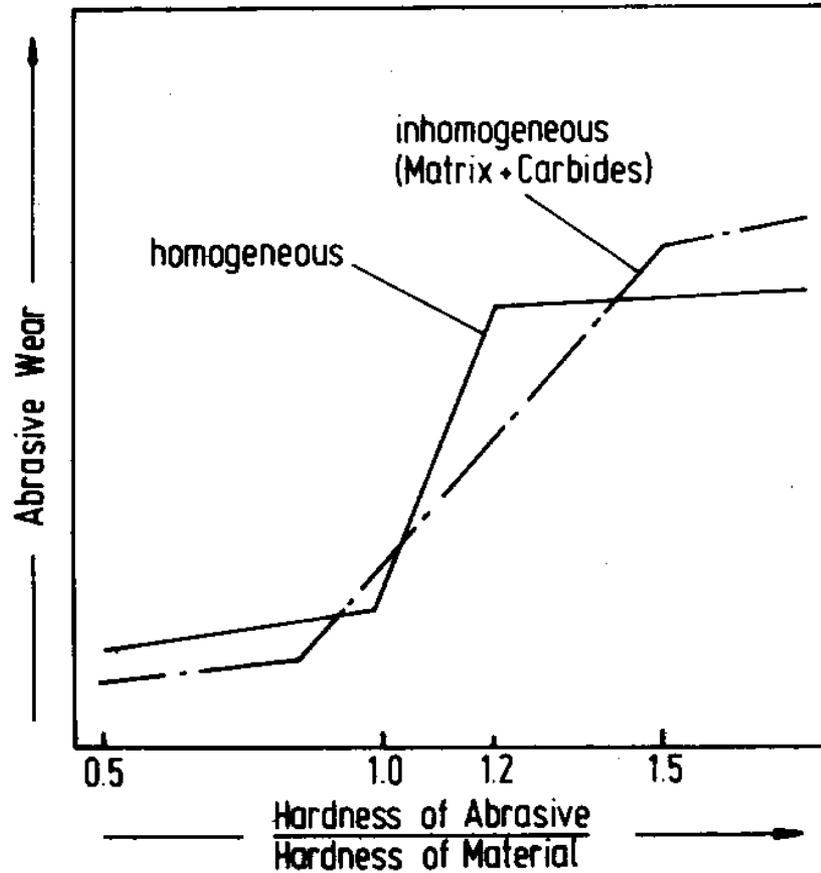


3- Body Abrasion



Abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos

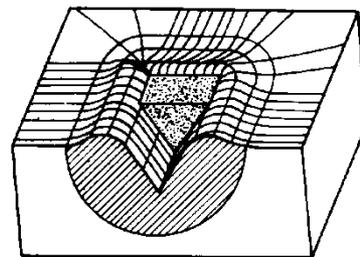
Abrasão



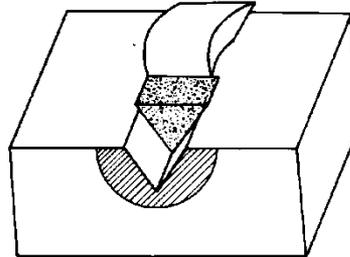
- Sistemas hidráulicos sujos, extrusoras de plástico contendo carga, moinhos e britadores, matrizes utilizadas em metalurgia do pó e a própria operação de usinagem.
- Observa-se uma transição entre regime de desgaste brando para desgaste severo quando a relação entre as durezas da partícula abrasiva e do material se tornam maiores que 1.



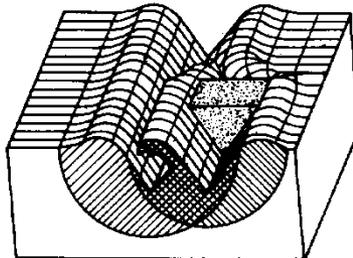
Abrasão



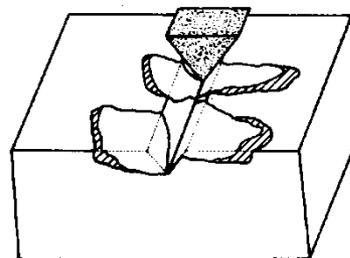
Microploughing



Microcutting



Microfatigue

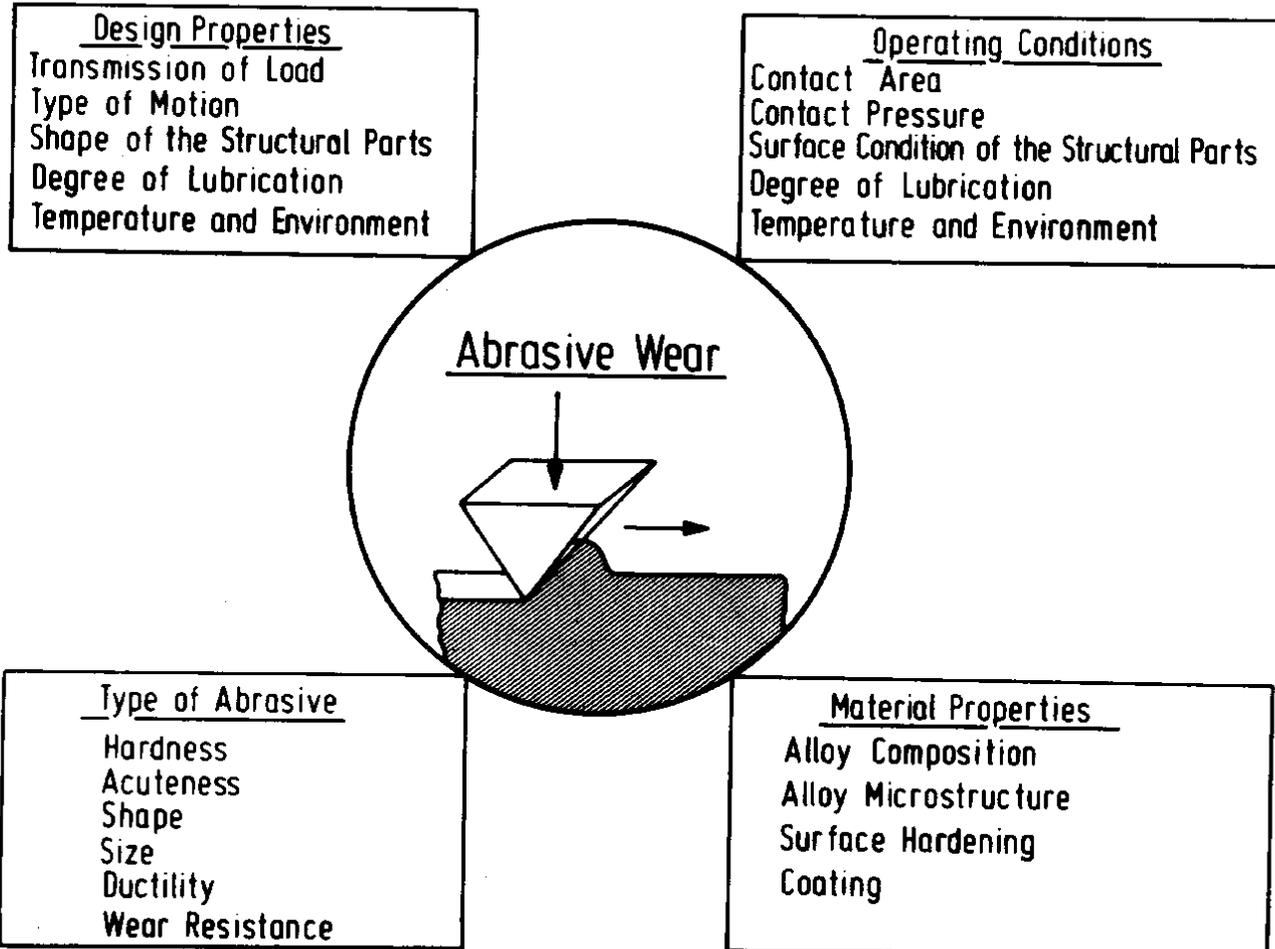


Microcracking

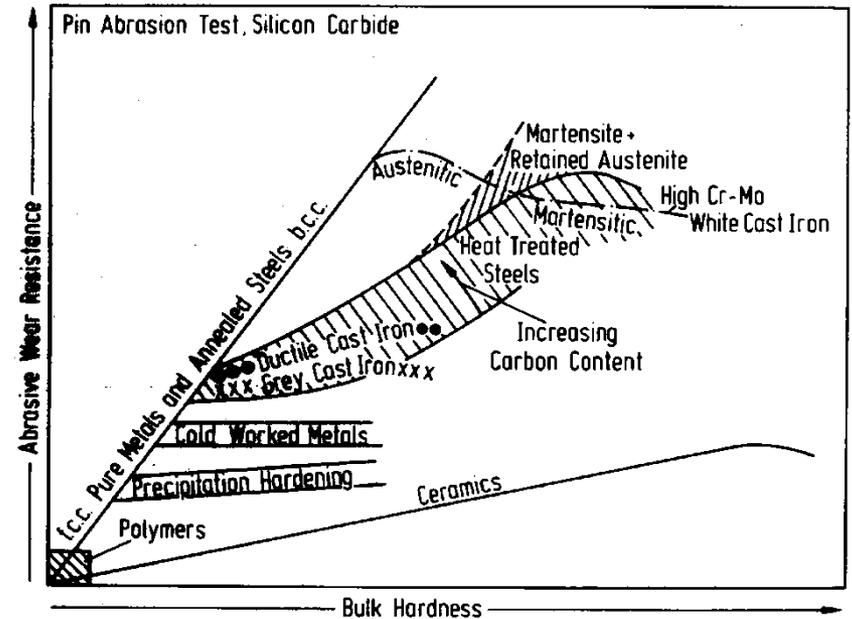
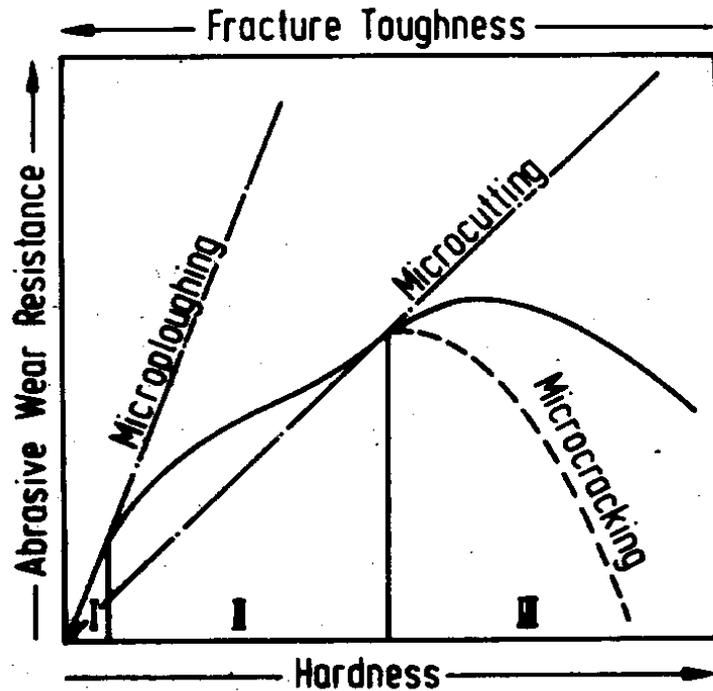
➤ Quatro micromecanismos são responsáveis pelo desgaste abrasivo:

- ✓ a) microsulcamento
- ✓ b) microcorte
- ✓ c) microfadiga
- ✓ d) microtrincamento

Abrasão

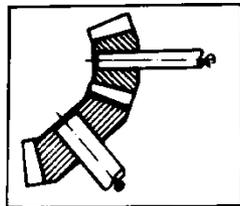
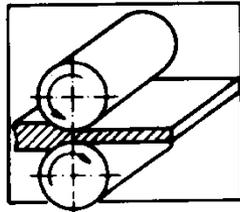
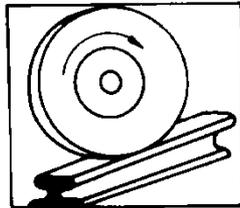


Abrasão

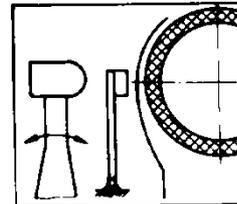
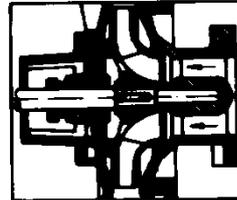
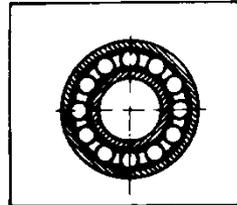
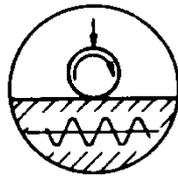


Efeito da dureza e da tenacidade sobre a resistência ao desgaste abrasivo de materiais

Desgaste por Fadiga de Contato



Surface Fatigue

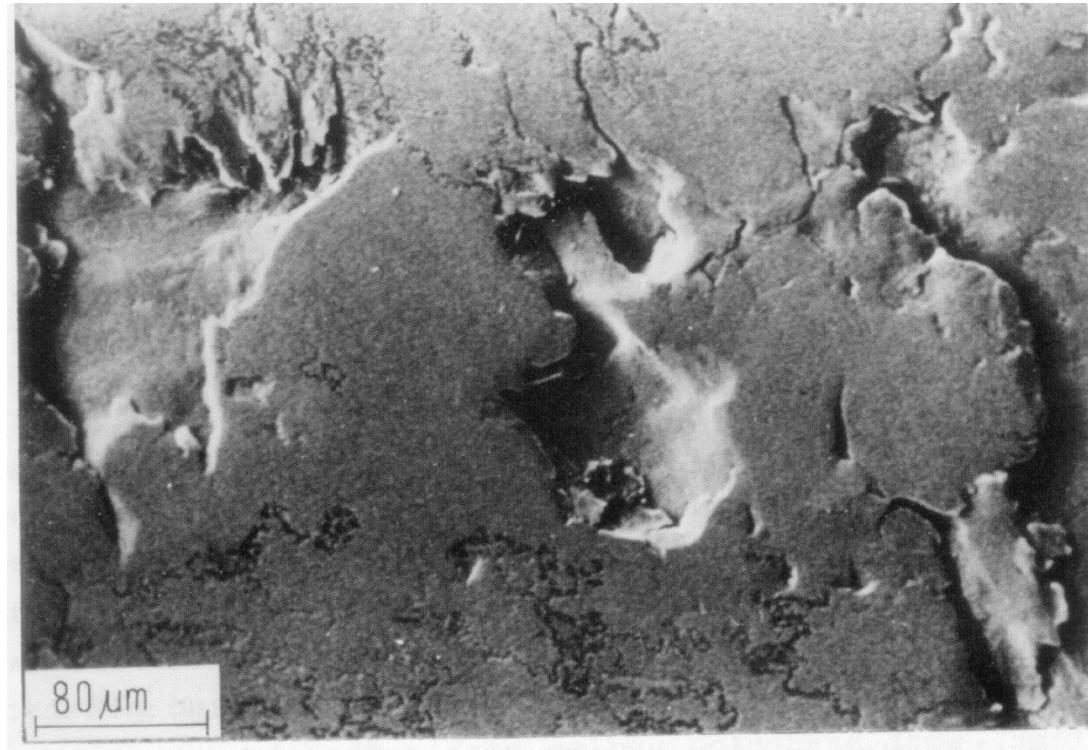


- Desgaste por fadiga ocorre pela formação de trincas superficiais ou subsuperficiais devido a aplicação de cargas alternadas repetidas e lascamento do material
- A fadiga de contato ocorre na sequência: deformação elástica, seguida de deformação plástica, encruamento, nucleação de trinca e propagação da trinca.



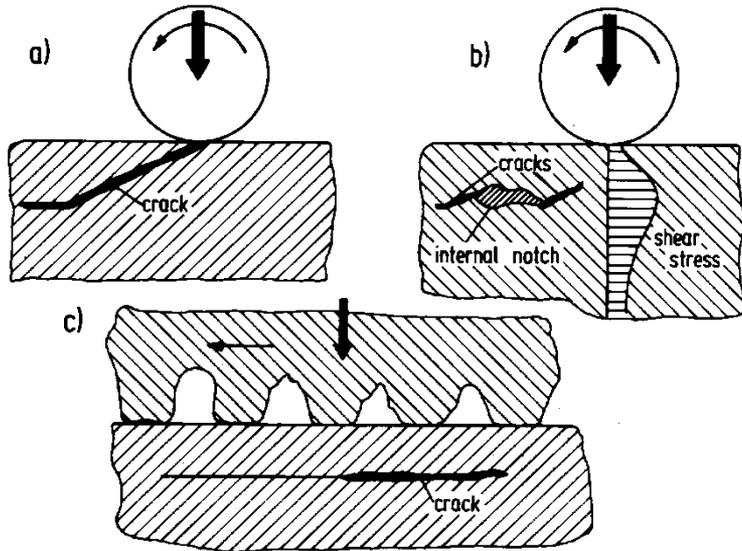
METMAT

Desgaste por fadiga



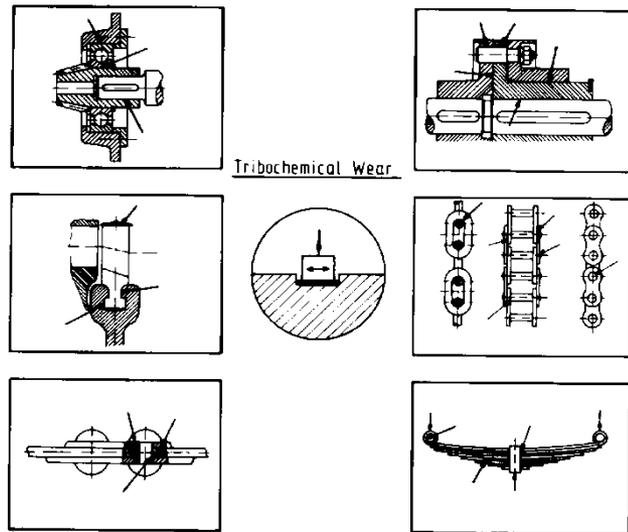
Formação de pites na superfície de uma engrenagem de aço cementado com dureza de 60 HRC

Desgaste por fadiga



- 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.

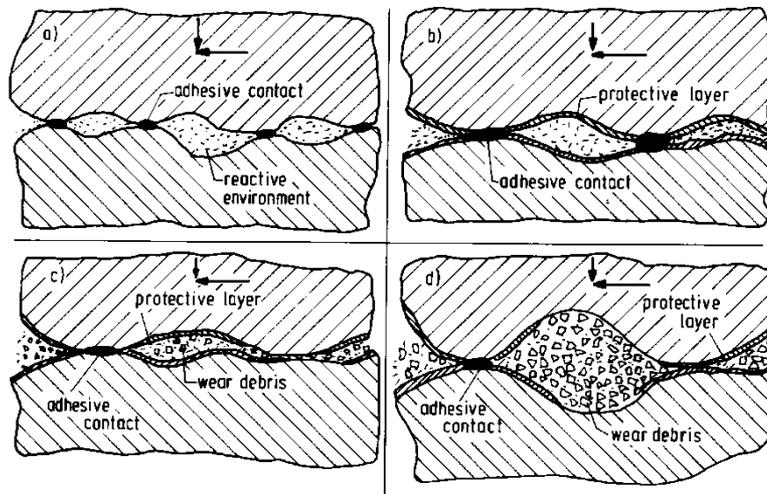
Desgaste por reação tribo-química



- O desgaste por reação tribo-química pode ser caracterizado como sendo decorrente do contato de duas superfícies que se esfregam 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.



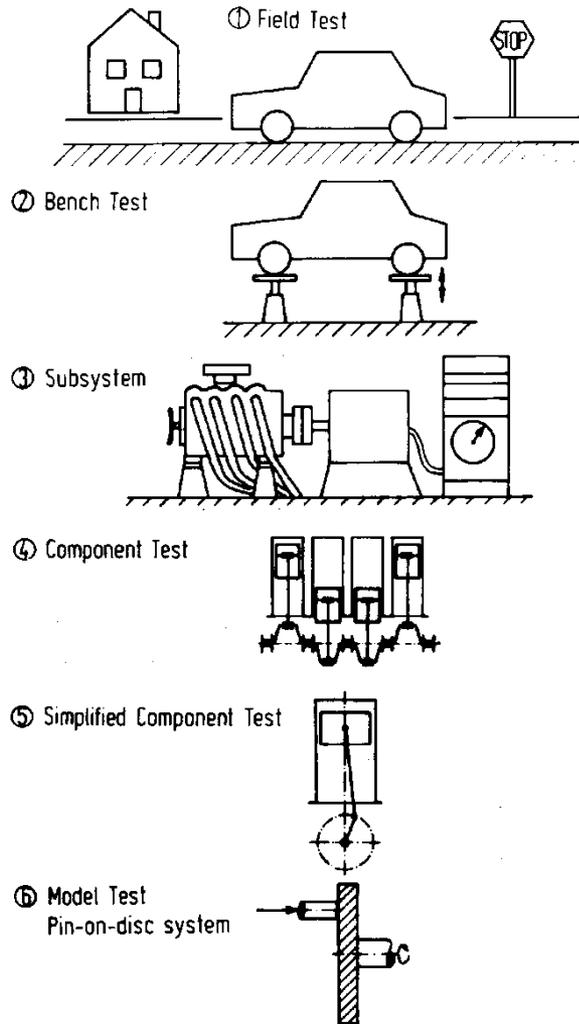
a) Adesão de asperezas e remoção de material com formação de fragmentos metálicos que se oxidam.

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



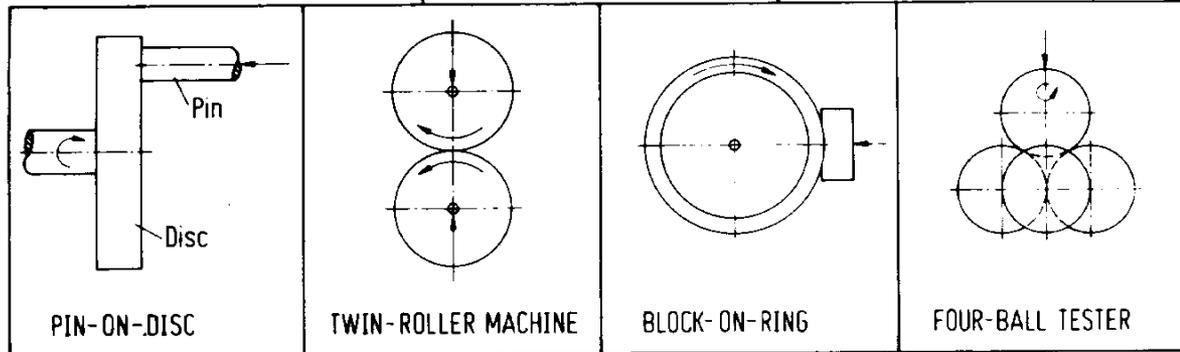
- A resistência ao desgaste é uma propriedade que depende fortemente do sistema tribológico. Não é uma característica intrínseca do material.
- Os ensaio de desgaste fornecem resultados, muitas vezes, específicos para a situação tribológica encontrada no ensaio.



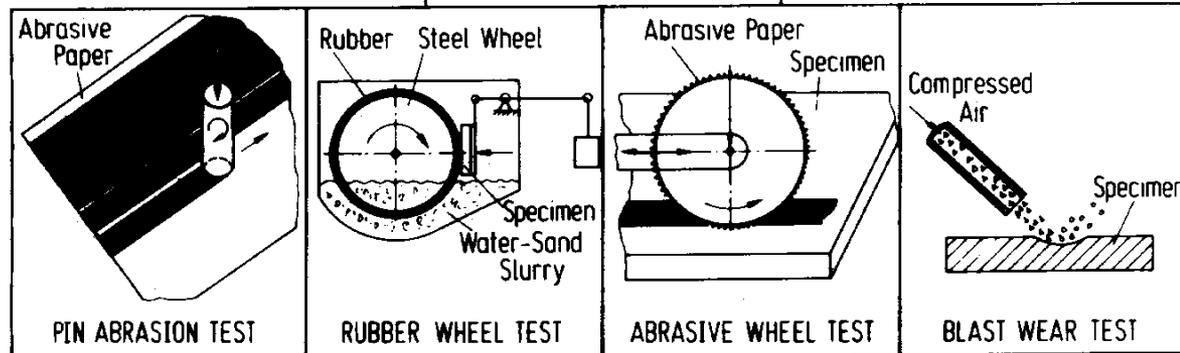
Ensaio de desgaste

METMAT

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)

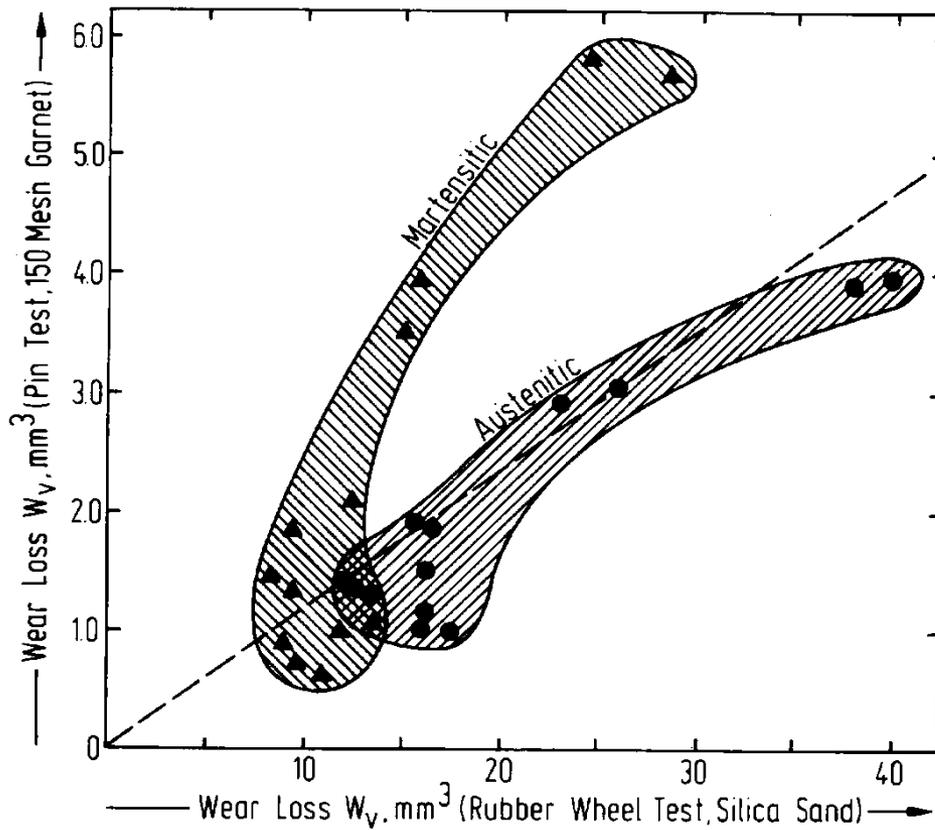
desgaste volumétrico W_V (mm³)

taxa de desgaste $W_{V/S}$ (mm²)

desgaste linear $W_{l/S}$

resistência ao desgaste $1/W_{V/S}$ (mm⁻²)

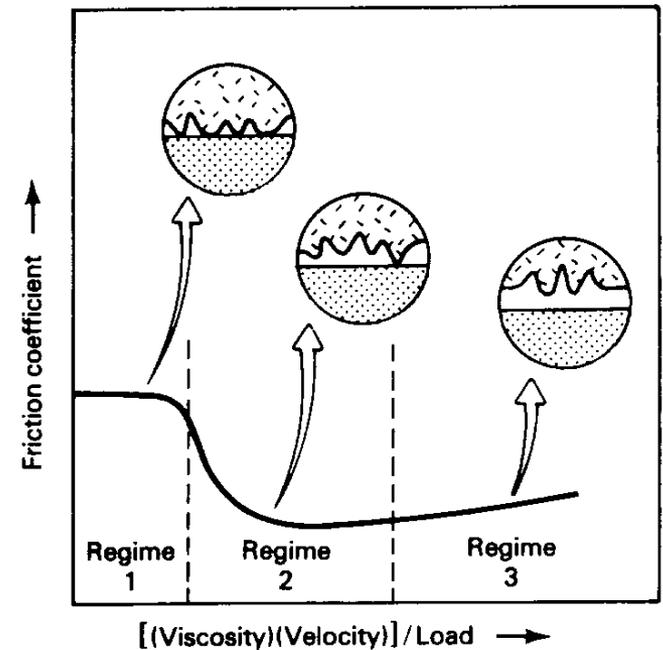
Ensaio de desgaste



- 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 no ensaio de roda de borracha X perda de massa no ensaio de pino no disco

A curva de Stribeck curve“ que descreve as propriedades do contato entre duas superfícies foi desenvolvida na primeira metade do século 20.

O coeficiente de atrito varia com o regime de lubrificação

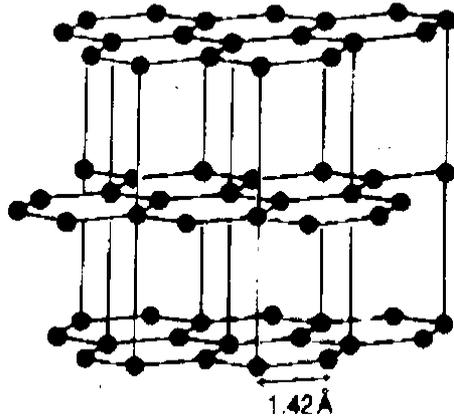


Regime 1 - Lubrificação limite (asperidades estão em contato)

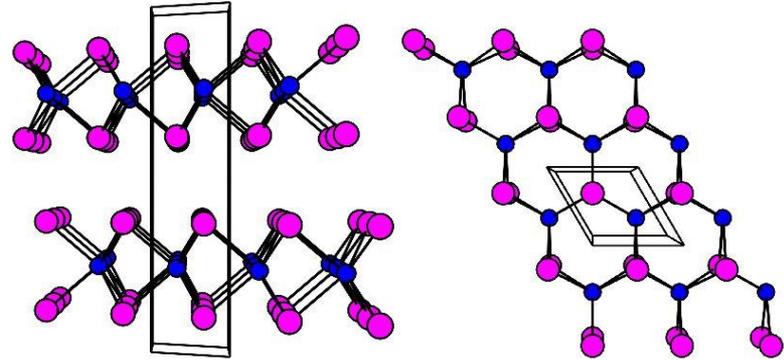
Regime 2 - Lubrificação com filme fino ou lubrificação mista (asperidades parcialmente em contato)

Regime 3 - Lubrificação Hidrodinâmica (não há contato entre asperidades)

Lubrificantes sólidos



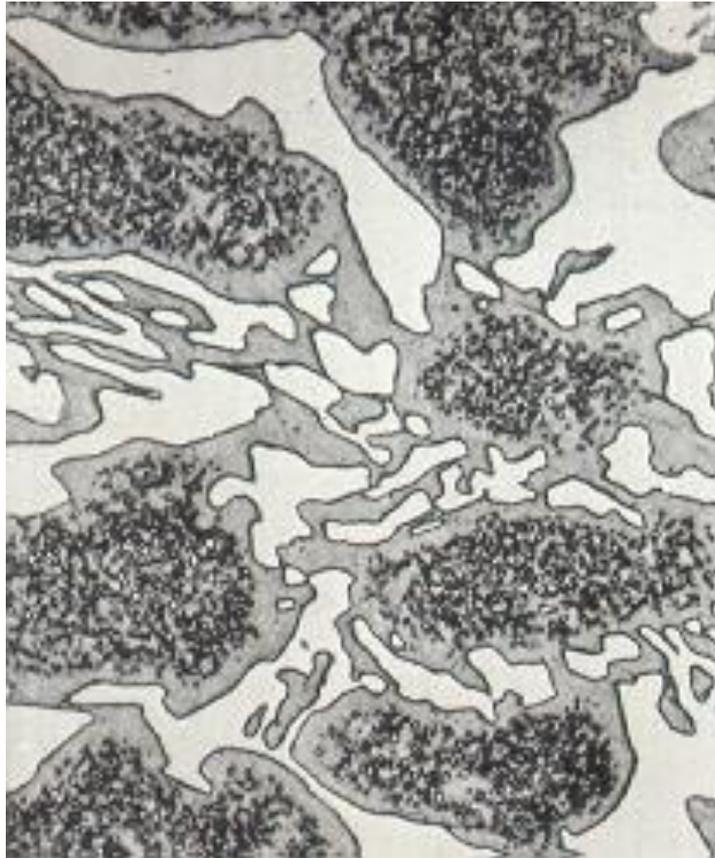
(a) Grafita



(b) Bissulfeto de molibdênio

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

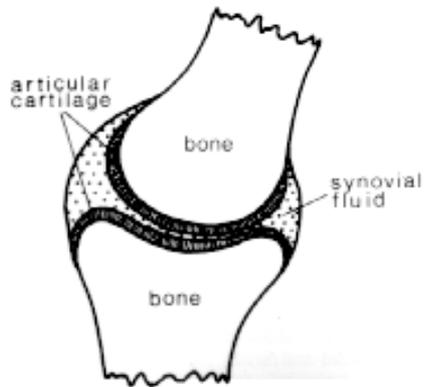
Materiais resistentes ao desgaste abrasivo para indústria de mineração.



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.

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.

Implantes cirúrgicos



Schematic showing key components of a natural synovial joint

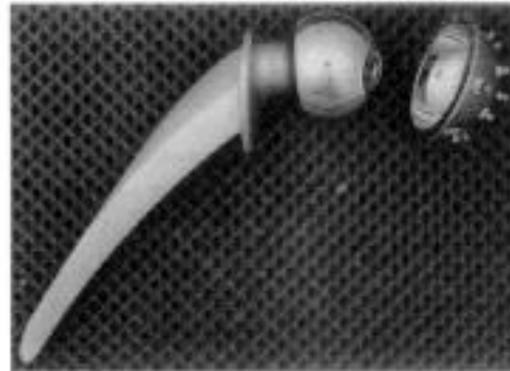


Fig 2 McKee-Farrar total replacement hip joint incorporating lapped-in Vitallium femoral and acetabular cup components. Stud shaped projections facilitate installation of cup into hip bone of patient.

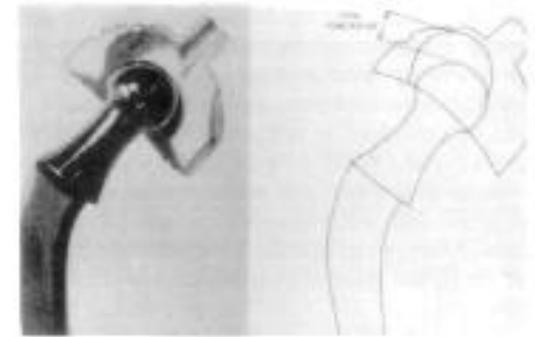


Fig 3 Excessive penetration of PTFE acetabular cup by a stainless steel femoral stem approximately 2 to 3 years after implantation of a vintage Charnley joint in the early 1960s

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.

Mai recentemente o acetábulo vem sendo fabricado com material cerâmico de alta resistência ao desgaste (zircônia ou alumina de alta pureza).



Revestimentos Cerâmicos

- Uma grande variedade de recobrimentos duros vem sendo utilizada em ferramentas, com a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste e o poder de corte.
- Carbonetos e nitretos dos metais de transição, o diamante e os DLC (diamond like carbon) são os materiais mais utilizados para essa finalidade.
- Esses materiais apresentam elevada dureza e elevada inércia química, propriedades que conferem baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste e baixa interação química com a peça a ser trabalhada.



Tabela 1

Propriedades estruturais, mecânicas e térmicas de materiais utilizados em recobrimentos duros^[1]

Material	Dureza	Dureza	Módulo de Young	Condutividade térmica	Coefficiente de expansão térmica	Ponto de fusão
	(kgf/mm ²)	H (GPa)	E (GPa)	(W/mK)	(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(°C)
TiN	2.000	20	440	29	9,4	2.949
TiC	2.900	29	450	18-30	7,4	3.067
VN	1.500	15	460		8,0	
VC	2.900	29	430			2.648
NbN	1.400	14	480		10,1	2.204
NbC	2.400	24	580		6,6	3.600
CrN	1.100	11	400		10,3	1.810
WC	2.100	21	695	84	4,3	2.776
Al ₂ O ₃	2.100	21	400	14	9,0	2.300
SiC	2.600	26	480	350	5,3	
BN	4.000	40	660	27		
B ₄ C	3.500	35	440		5,0	
Diamante	9.000	90	590		0,8	
Aço ferramenta	800	8	220	33	13,0	1.500
Aço inox 304	300	3	220	16	18,0	1.500

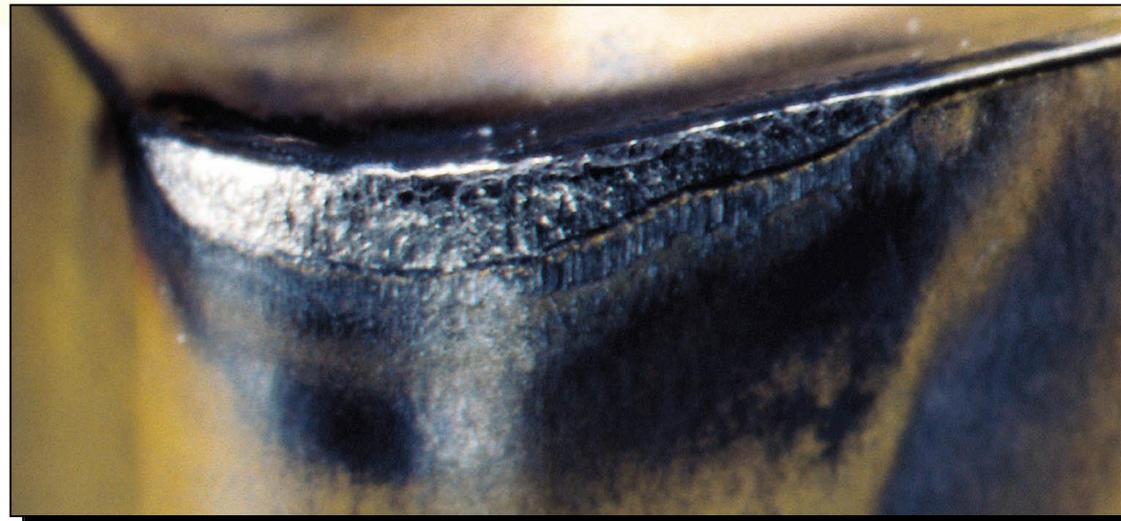
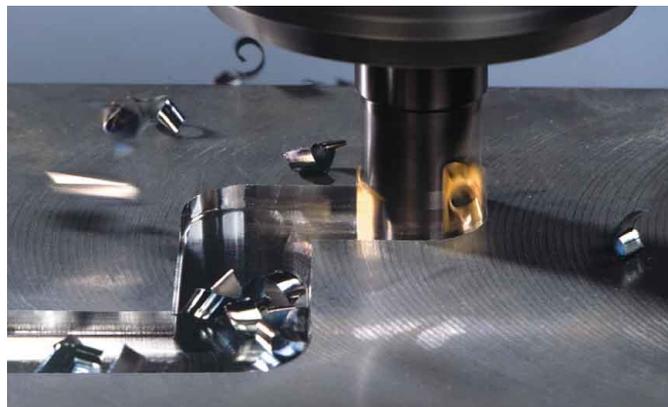
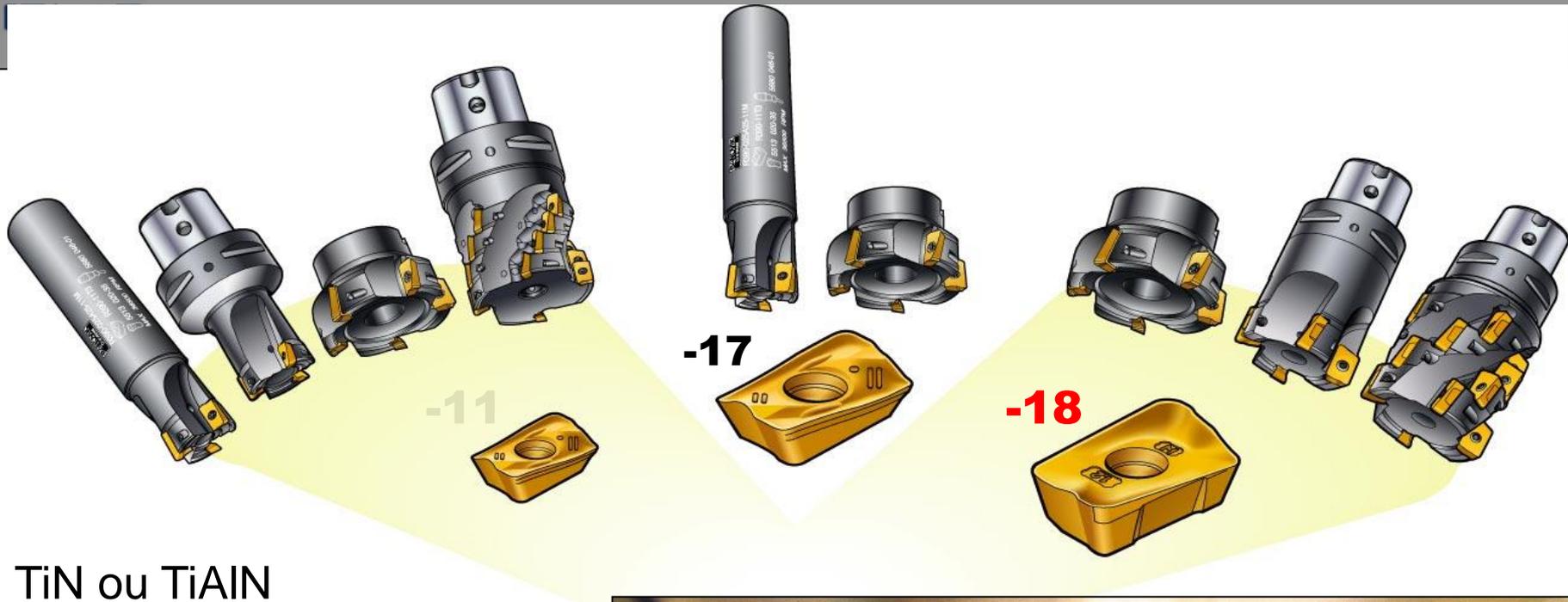


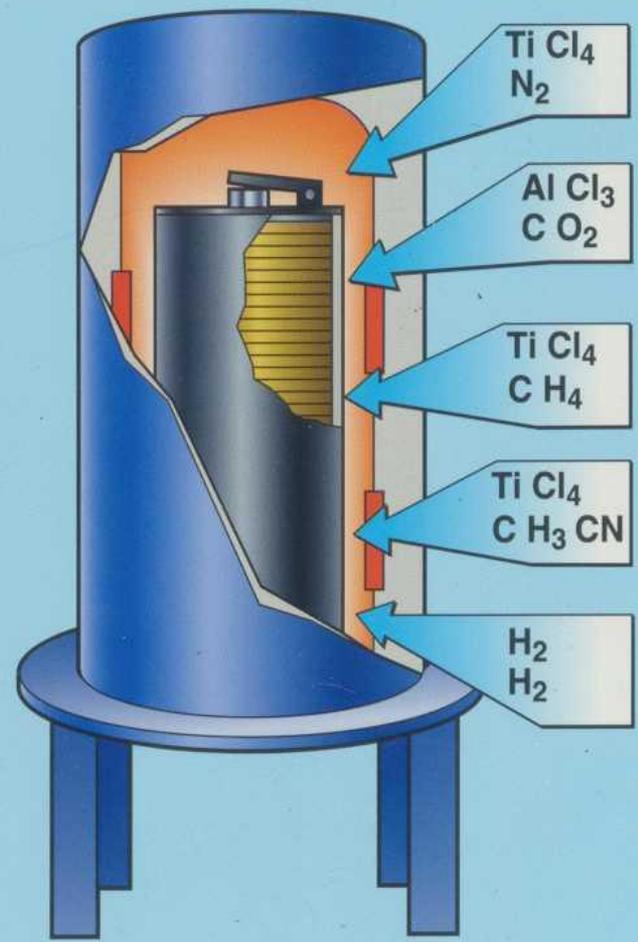
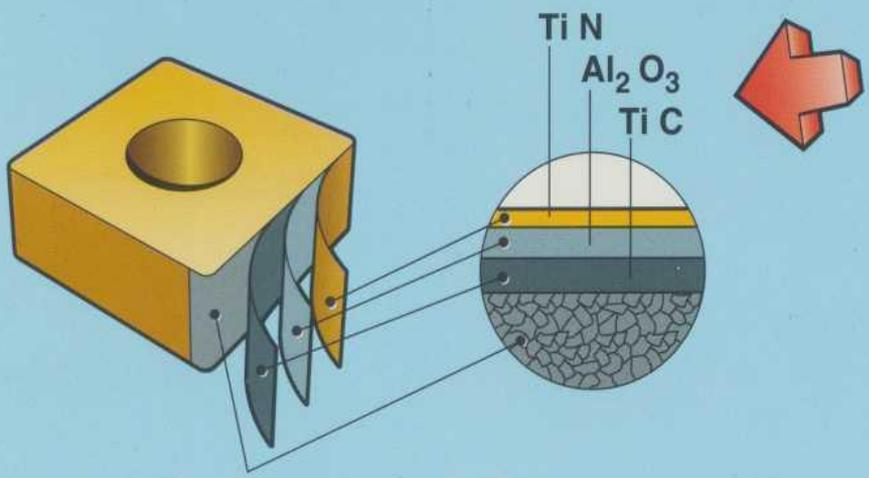
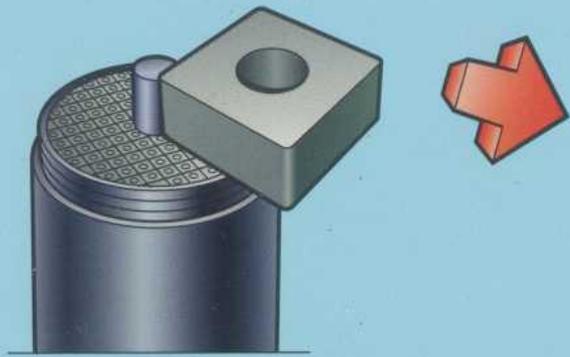
Propriedades estruturais, mecânicas e térmicas de materiais utilizados em recobrimentos duros.

- Os materiais de recobrimento são muito mais duros, apresentam pelo menos o dobro do módulo elástico e têm coeficiente de expansão térmica variando entre 1 e 0,5 do coeficiente de expansão térmica do aço.
- Os pontos de fusão são muito altos e indicam uma elevada inércia química destes materiais.
- A alumina apresenta metade da condutividade térmica do aço e por esta razão é utilizada como barreira térmica em vários tipos de recobrimentos.



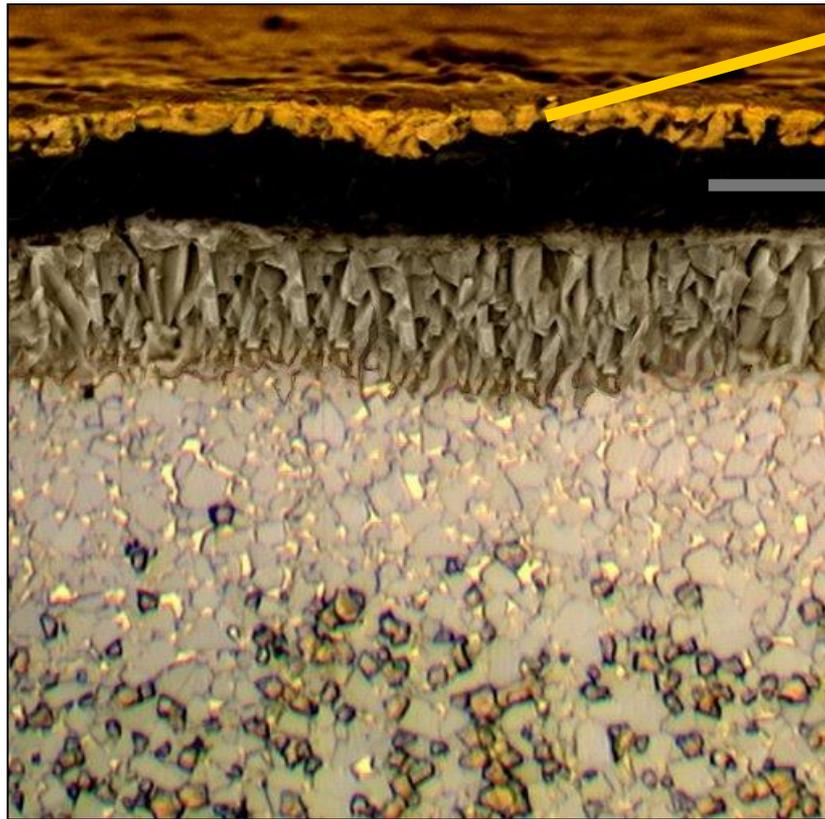
Aplicações - Recobrimento de Ferramentas





Recobrimento multicamada

➤ Ferramenta de torneamento rápido



Camada de TiN

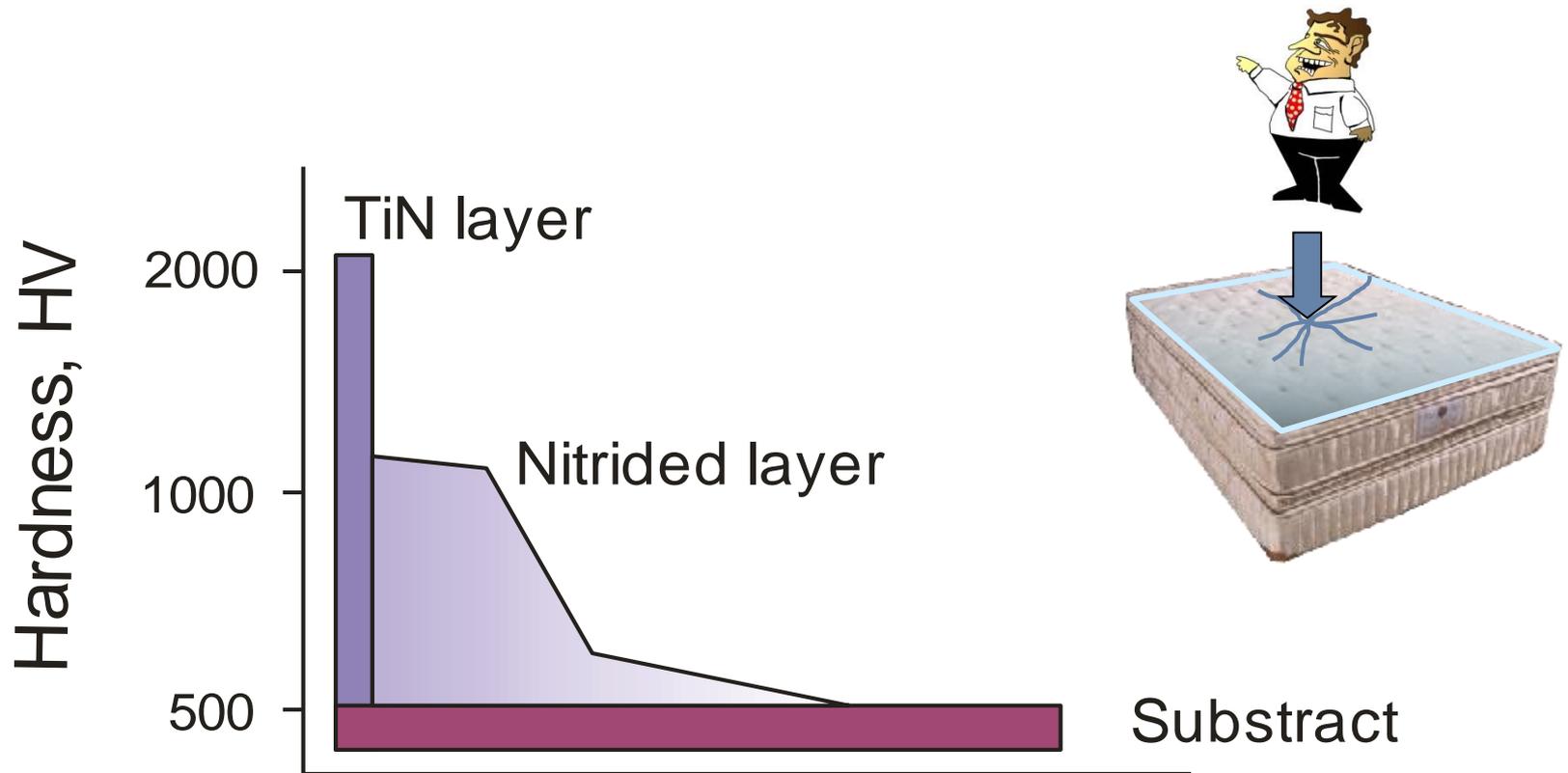
Camada de Al₂O₃

Camada de TiCN

Zona enriquecida em cobalto

Substrato ⇒ WC + TiWC + TaNbC

Tratamento duplex



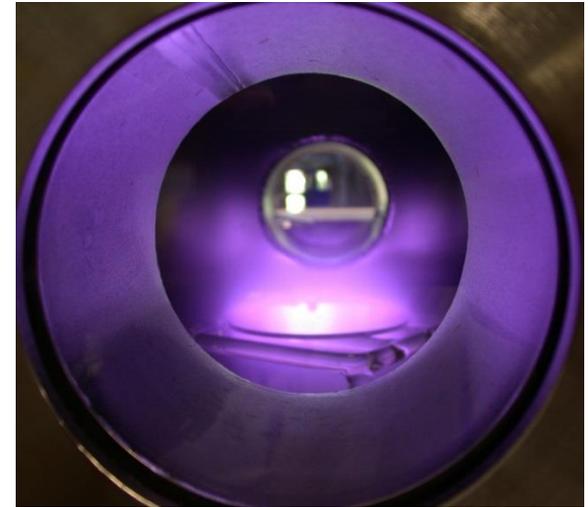
Uma camada nitretada a plasma de elevada dureza com elevado nível de tensões residuais de compressão reduz o gradiente de dureza e de tensões, entre o substrato e a matriz, aumentando a capacidade de suportar carga do substrato.

Multi-camadas

Os recobrimentos multicamada com formação de superreticulado são geralmente obtidos por processos PVD sendo o mais comum o sputtering reativo.

Trata-se de um processo em que alvos de Ti, Nb e outros metais são erodidos em plasma de ($N_2 + Ar$) obtendo-se compostos estequiométricos de alta dureza.

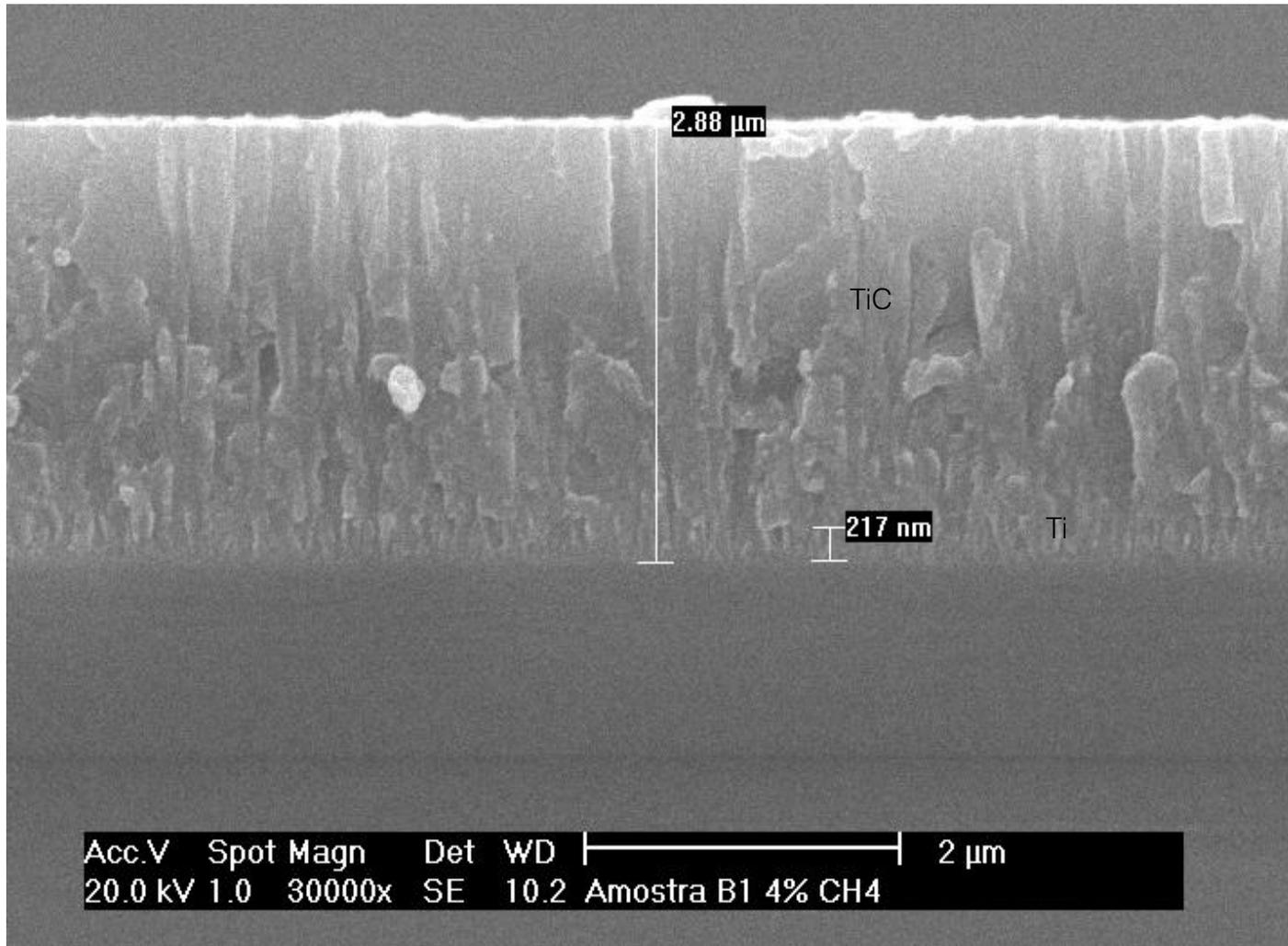
Pode-se utilizar um único alvo (Ti p.e) e trabalhar com dois gases reativos (N_2 e CH_4) diferentes resultando em multi-camadas TiN e TiC.





Filmes finos tribológicos - TiC

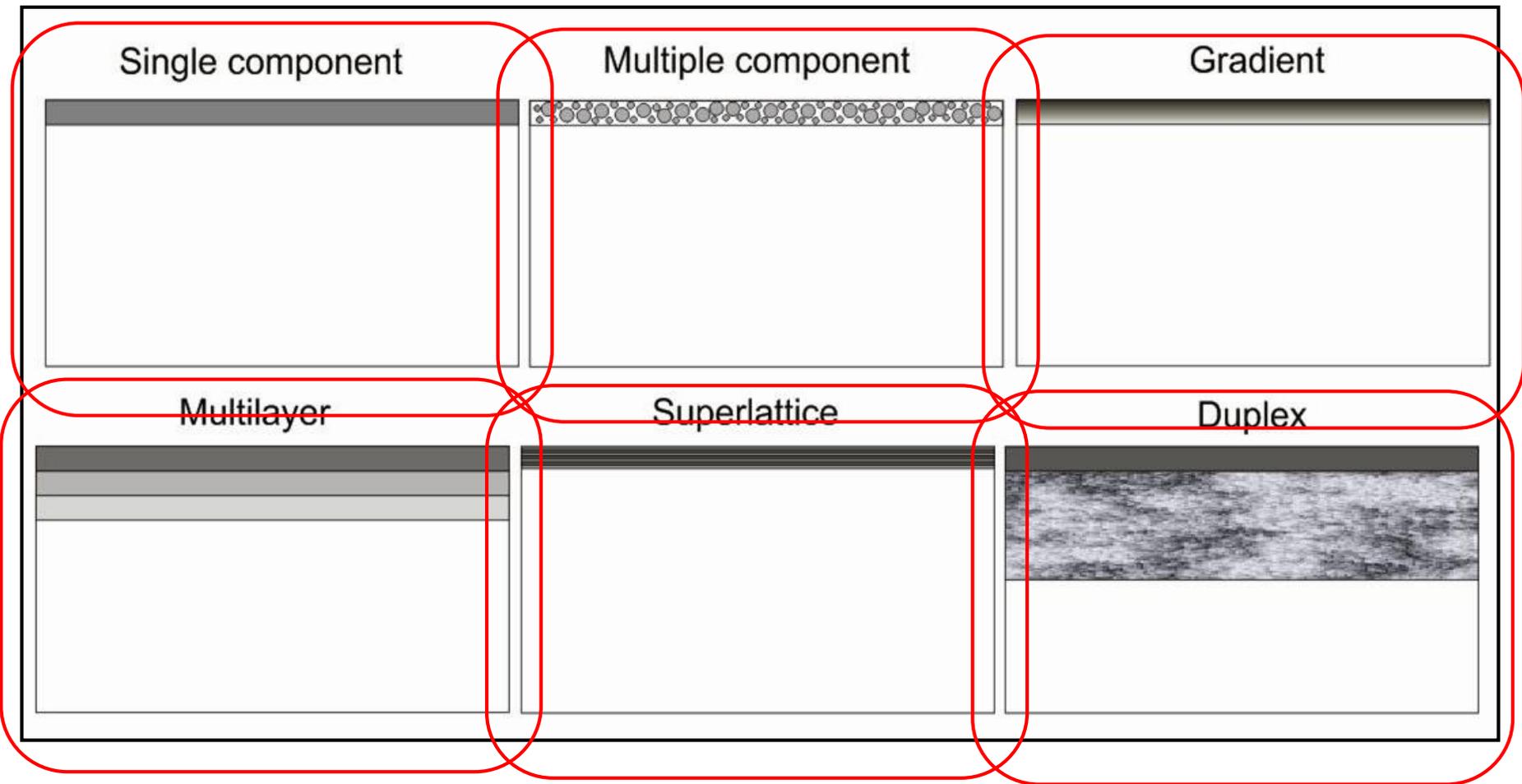
METMAT





METMAT

Possíveis arquitetura de revestimentos

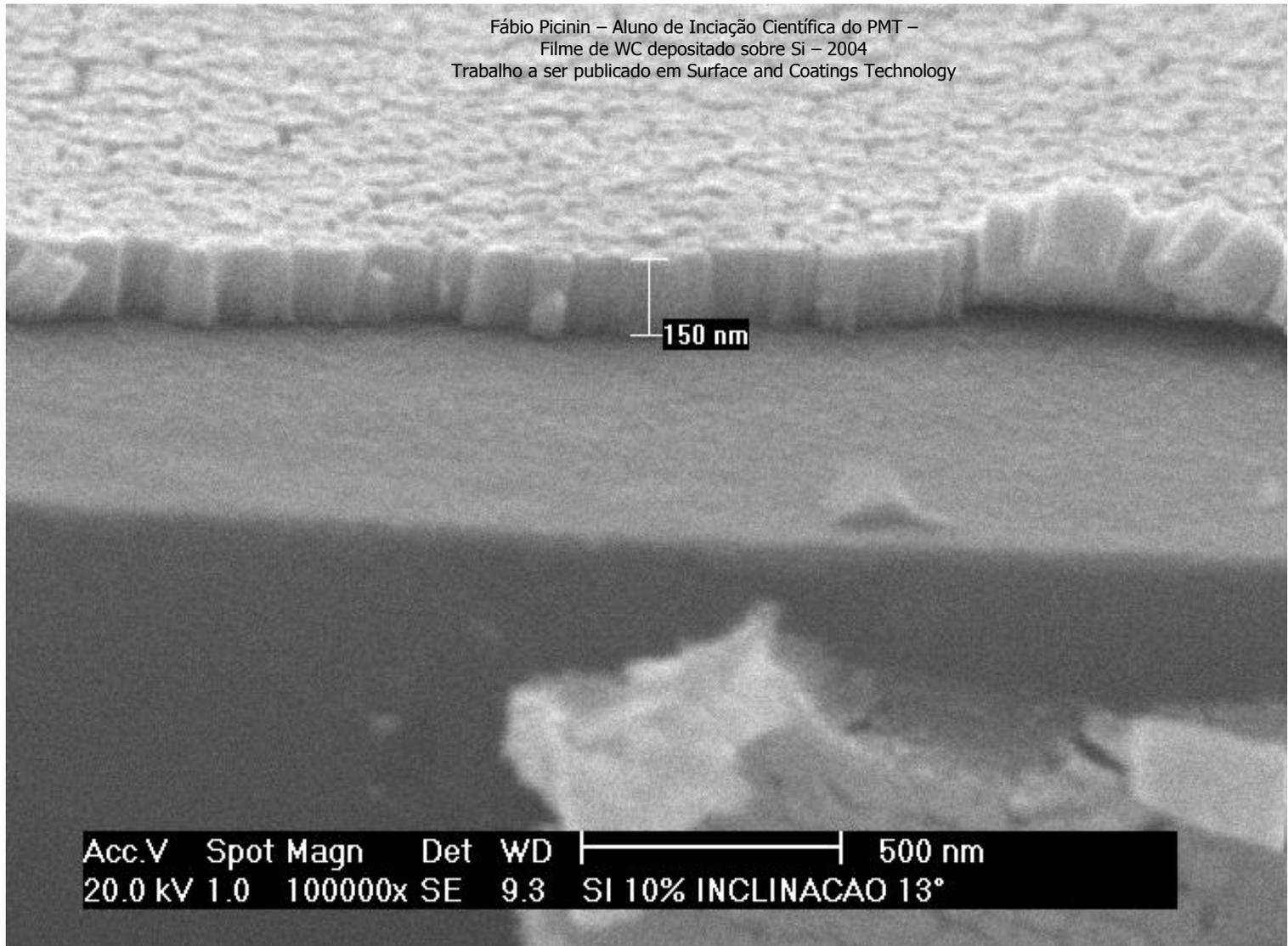




METMAT

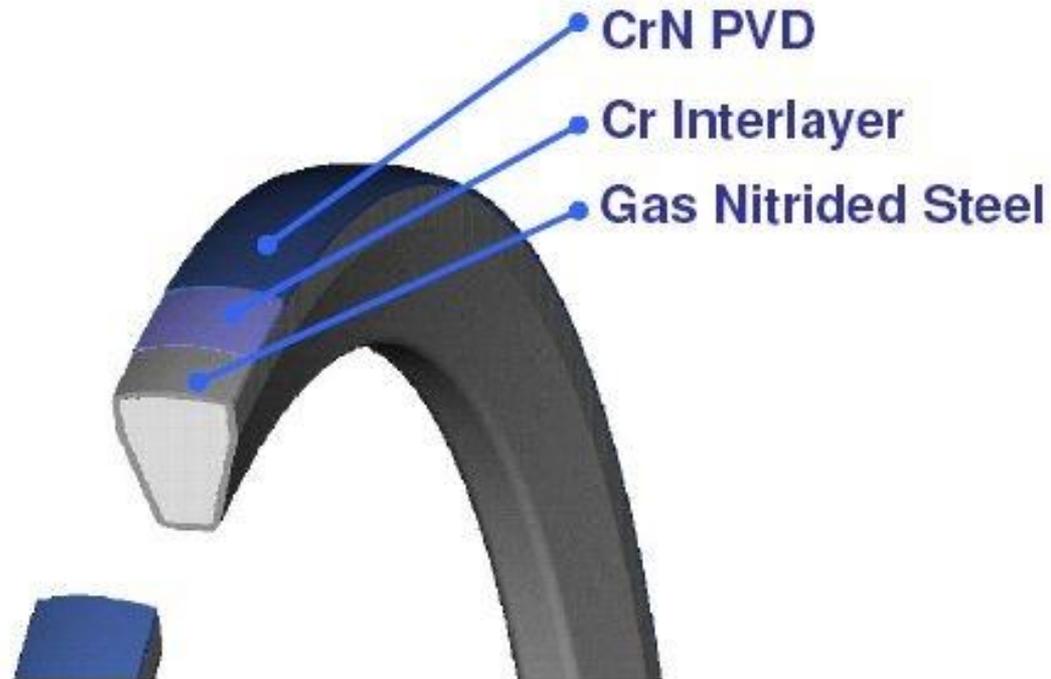
Filmes finos tribológicos - WC

Fábio Picinin – Aluno de Iniciação Científica do PMT –
Filme de WC depositado sobre Si – 2004
Trabalho a ser publicado em Surface and Coatings Technology



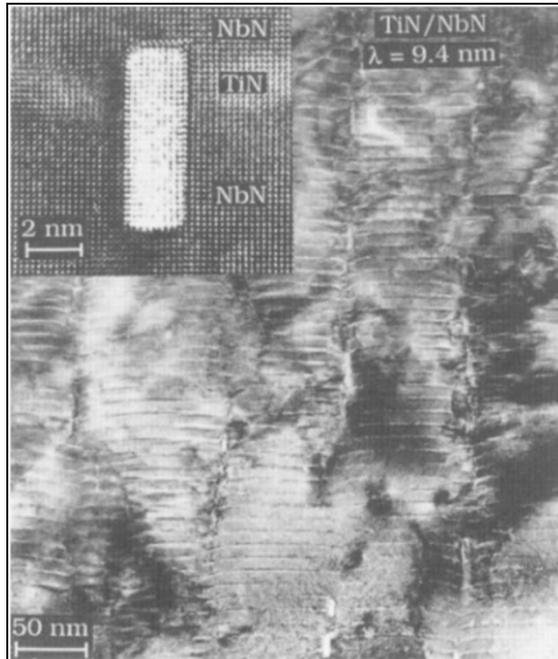


Motores à combustão interna e melhoria de desgaste



- ✓ Recobrimentos do 30 μm de espessura contendo monocamada de CrN depositado por processo PVD.

Recobrimentos multicamadas



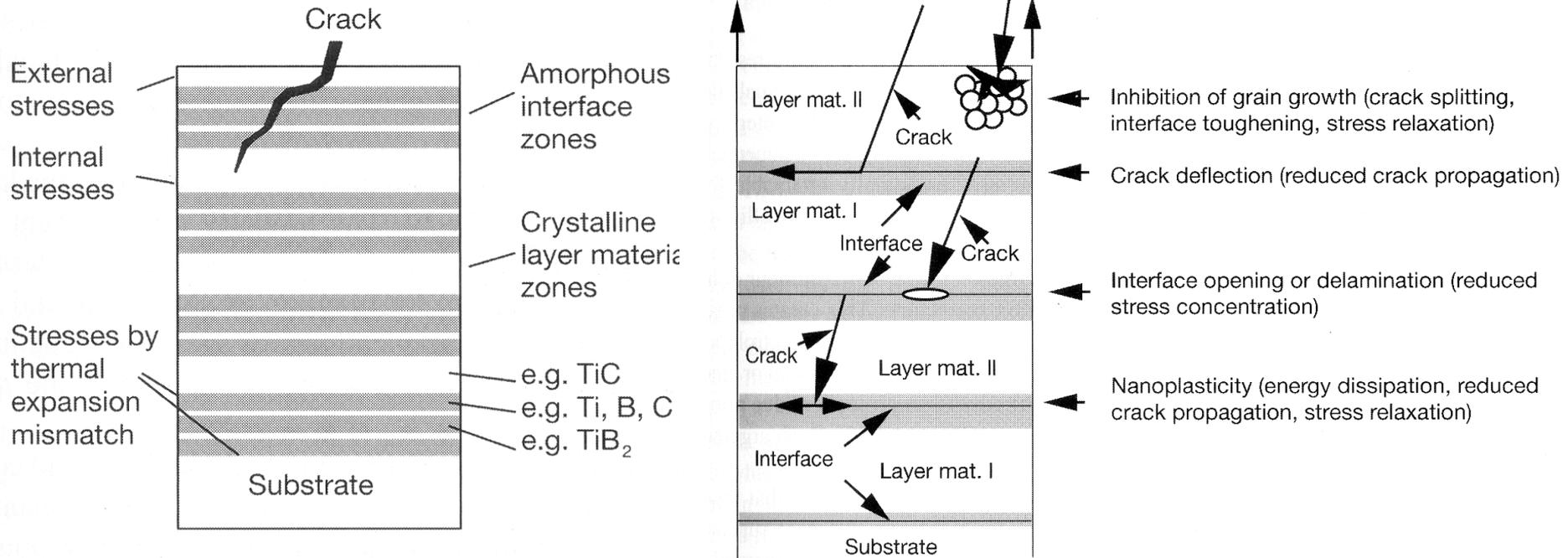
- ✓ Os revestimentos multicamadas apresentam excelentes propriedades mecânicas e tribológicas.
- ✓ Essas propriedades têm sido explicadas baseado nas diferenças entre os módulos elásticos dos dois materiais , nos efeitos de tensões e deformações elásticas residuais devidas ao desajuste de reticulados cristalinos e na restrição à movimentação de discordâncias interposta pelas interfaces.
- ✓ Pode-se atingir durezas de 35 até 50 GPa, muito além da prevista pela lei das misturas.
- ✓ Estrutura modulada com comprimento de onda de 9,4 nm

Material	Dureza	Dureza	Módulo de Young	Condutividade térmica	Coefficiente de expansão térmica	Ponto de fusão
	(kgf/mm ²)	H (GPa)	E (GPa)	(W/mK)	(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	(°C)
TiN	2.000	20	440	29	9,4	2.949
NbN	1.400	14	480		10,1	2.204



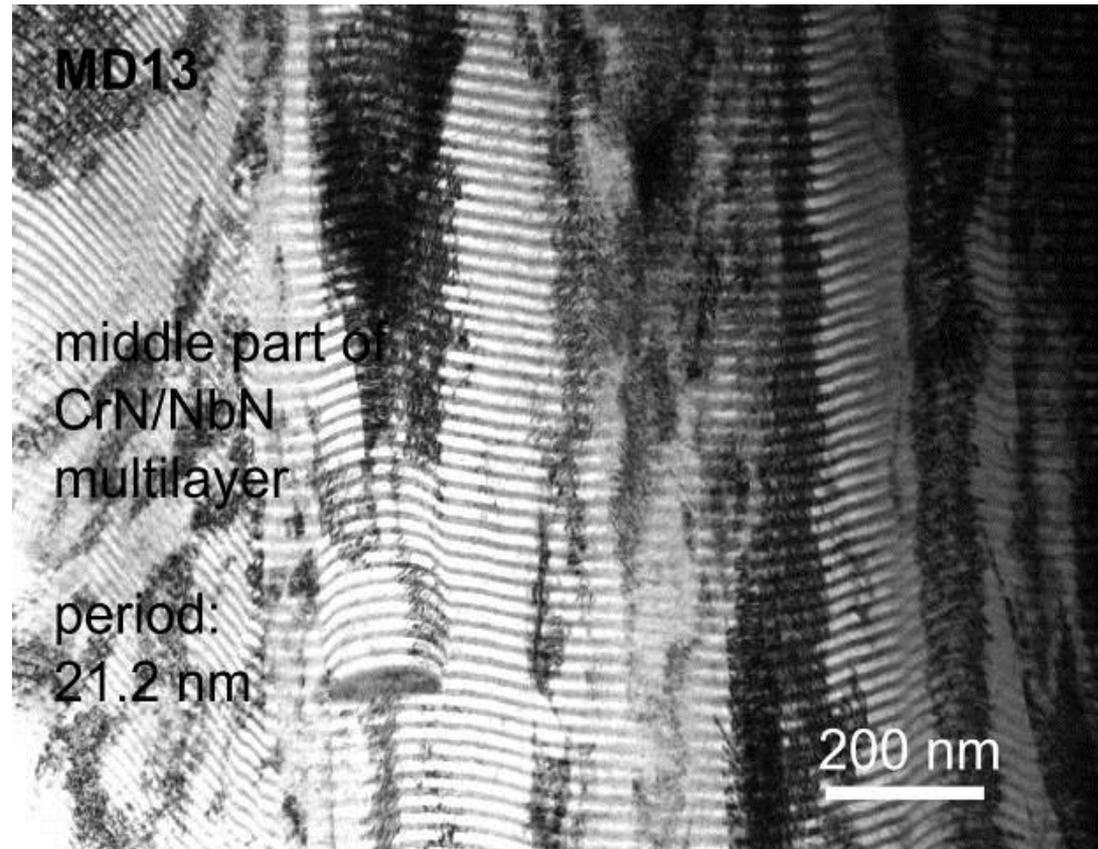
METMAT

Funcionalidade de filmes multicamadas



- ✓ [Zonas de material cristalino e amorfo intercaladas](#)
- ✓ [Defletores de trincas reduzindo sua propagação](#)
- ✓ [Redutores de tensões residuais](#)
- ✓ [Podem conferir nanoplasticidade e dissipação de energia elástica](#)

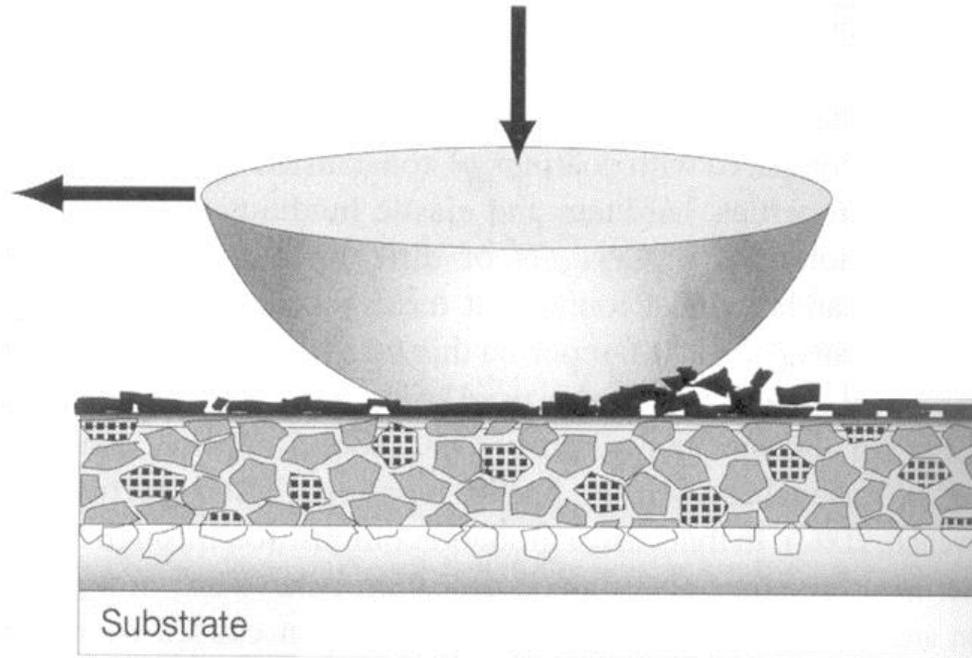
Motores à combustão interna e melhoria de coeficiente de atrito e resistência ao desgaste



- ✓ Recobrimentos do 30 μm de espessura contendo multicamadas de CrN/NbN formando superreticulados depositado por processo PVD.



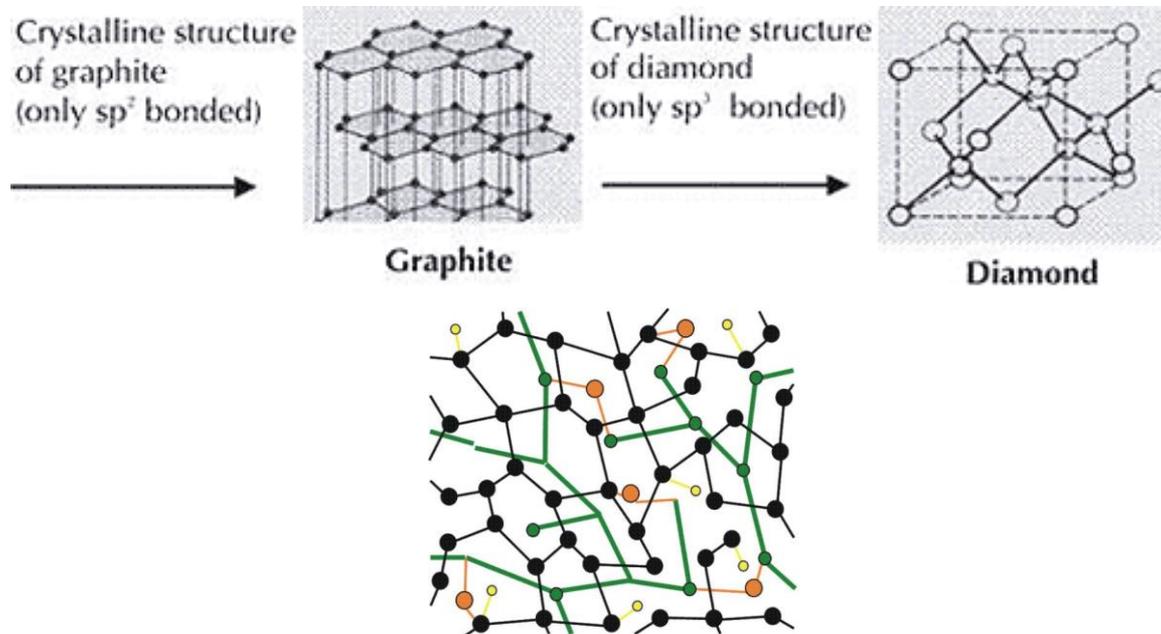
Nanocompósitos contendo fases amorfas



- ✓ Nanocompósito contendo fases amorfas de baixo módulo de Young possibilitam acomodação de deformações elásticas.
- ✓ Partículas nanocristalinas de elevada dureza conferem resistência ao desgaste ao material.

Diamond-like carbon (DLC)

- ✓ **Recobrimentos amorfos contendo ligações carbono-carbono sp^2 e sp^3 típicas da grafita e do diamante, sem ordenação de longo alcance.**

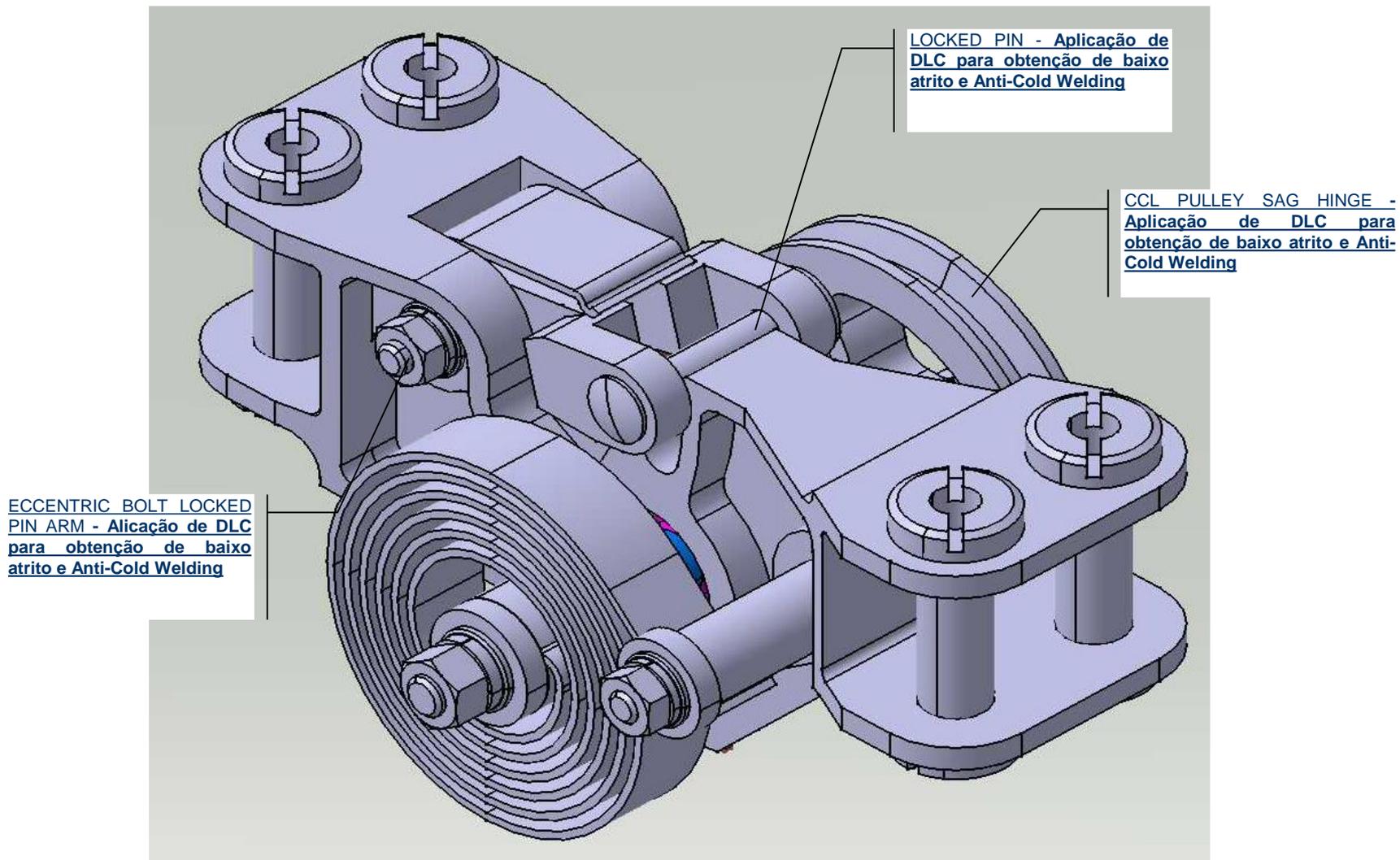


- ✓ **DLC apresenta propriedades combinadas dos dois materiais.**
 - ☐ Alta Dureza, Baixo Coeficiente de atrito e propriedades lubrificantes

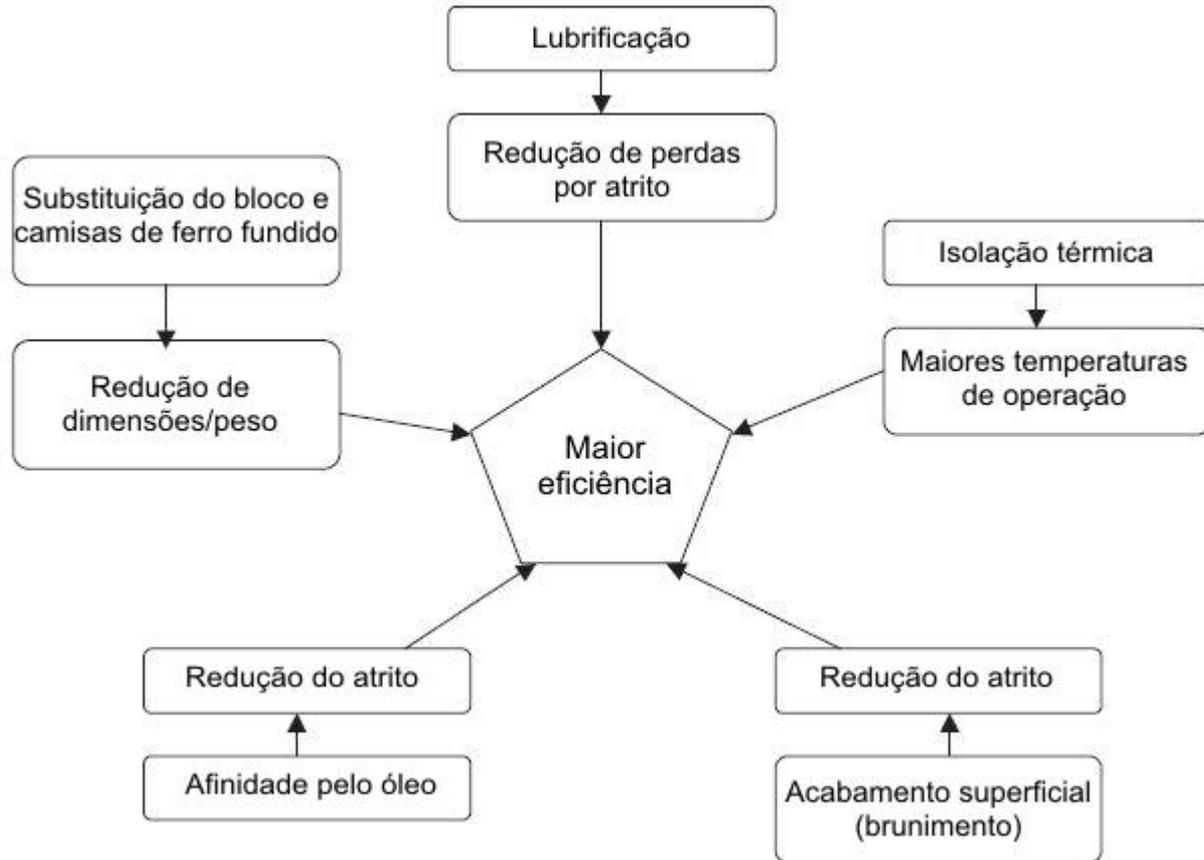


METMAT

Mecanismo para movimento de painéis solares de satélite



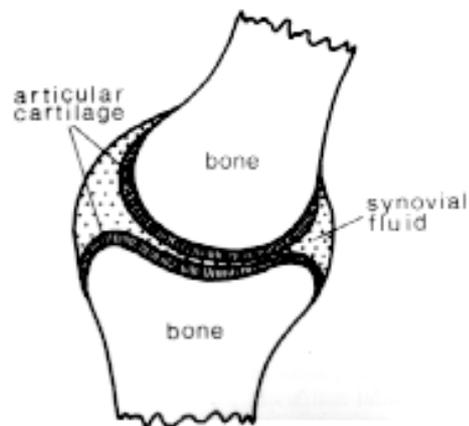
Motores à combustão interna e melhoria de lubricidade





METMAT

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.

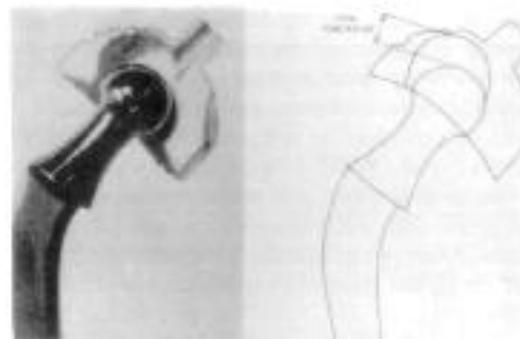


Fig 3 Excessive penetration of PTFE acetabular cup by a stainless-steel femoral stem approximately 2 to 3 years after implantation of a vintage Charnley joint in the early 1960s

- ✓ Inicialmente utilizava-se PTFE - Politetrafluoretileno, Teflon™ 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.
- ✓ Recobrimento do UHMWPE com DLC obtido por PVD





- O Núcleo de Apoio à Pesquisa em Tribologia e Engenharia de Superfícies dedica-se:
 - ✓ à obtenção de materiais resistentes ao desgaste e ao tratamento termoquímico de superfícies por processos convencionais ou sob plasma;
 - ✓ à caracterização das superfícies obtidas por tais processamentos; ao estudo das propriedades tribológicas (mecânica do contato, atrito, desgaste e lubrificação) dos filmes obtidos;
 - ✓ ao estudo das propriedades de corrosão e da interação corrosão-desgaste.
 - ✓ ao desenvolvimento de materiais resistentes ao desgaste (aços ferramenta, cilindros de laminação, ferros fundidos brancos resistentes ao desgaste abrasivo para a indústria de mineração, aços inoxidáveis austeníticos e martensíticos), estabelecendo sempre correlações entre o processamento, a microestrutura, as propriedades de superfície e o comportamento tribológico destes materiais.
 - ✓ todos os estudos conduzidos pelos pesquisadores envolvidos neste Projeto têm se encaminhado, mais recentemente, para um foco temático que é o estudo dos Fenômenos de Superfície associado a filmes tribológicos.

Núcleo de Apoio à Pesquisa em Tribologia e Engenharia de Superfícies

Equipe

- André Paulo Tschiptschin – EPUSP/PMT/LFS
- Guilherme Lenz – EPUSP /PMT
- Hélio Goldenstein – EPUSP /PMT
- Neusa Alonso Falleiros – EPUSP /PMT
- Ticiane Valera – EPUSP/PMT
- Amilton Sinatora – EPUSP – PME/LFS
- Deniol Tanaka – EPUSP/PME/LFS
- Isabel Machado – EPUSP/PME /LFS
- Roberto Martins de Souza EPUSP/PME/LFS
- Marcio Vernieri Cuppari - UFABC
- Rodrigo Magnabosco - FEI

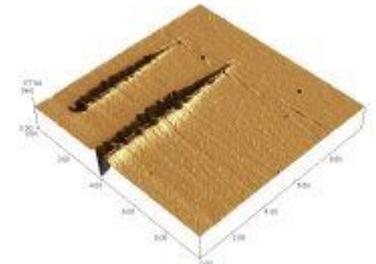
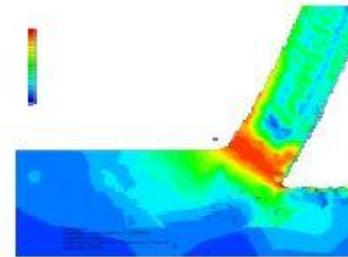
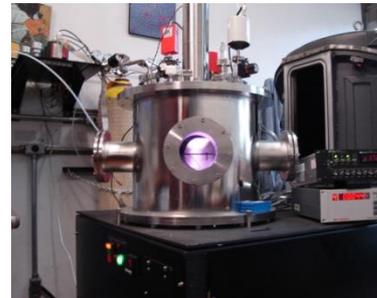
Laboratórios

- LFS
- LabPlasma
- LabMicro
- LabH2S
- Laboratório de Transformação de Fase
- LM²C²

tribes



tribologia
engenharia de superfícies





Mapas de seleção de materiais

Taxa de desgaste é dada por:

W = Volume de material removido/distância escorregada (m^2)

e a taxa de desgaste específica Ω

$$\Omega = \frac{W}{A_n} \quad k_a = \frac{W}{F_n} = \frac{\Omega}{P} (MPa)^{-1}$$

$$P_{\max} = CH (MPa)$$

$$\Omega = k_a P = C \frac{P}{P_{\max}} k_a H$$

P é a pressão

H é a dureza

C é uma constante

k_a é uma medida da propensão ao desgaste