



Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

EMEC7062 (PGMEC) / ECMA7042 (PIPE) Engenharia de Superfícies

O papel da tribologia em engenharia
de materiais/superfícies

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

Cronograma para conclusão da disciplina

- Sexta-feira (26/10), apresentação do exercício de seleção de processo de eng. sup.
- Apresentações:
 - Tempo da apresentação será de 30 min.
 - As apresentações serão no dia 21/11
 - Pensar em um título e estrutura da apresentação
- Prova 02 dia 23/11
- Listas de Tribologia e Corrosão devem ser entregues até o dia da Prova (23/11)

Introdução

- A palavra tribologia vem do Grego -> tribo - “esfregar” +logia - “estudo”.
- O termo “Tribologia” foi criado na Inglaterra nos anos 1960 para definir a “ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e práticas relacionada” (Dawson, 1979)
- Tribologia envolve: Atrito, desgaste, lubrificação e assuntos como mancais e endurecimento de superfícies
- O termo tribologia ainda é pouco conhecido mesmo se muitas universidades já ensinam esta disciplina

Introdução

- Sendo o desgaste uma causa importante de falha de componente, este é um fator importante na seleção de materiais/tratamentos.
 - Assim, um ramo importante da engenharia de superfícies é voltado para aplicações tribológica.
- Buscaremos entender as bases da tribologia, para entender como a engenharia de superfície pode contribuir em aplicações tribológicas.

Introdução

- A importância do atrito, desgaste e lubrificação (tribologia) pode ser facilmente entendido considerando o exemplo de um automóvel:
 - O atrito entre o pneu e a estrada é essencial para que o carro se mova (mas consome energia)
 - O atrito entre as pastilhas de freio e o disco de freio é importante para que o carro pare
 - Atrito e desgaste ocorrem em todas as peças em movimento -> lubrificação é aplicada para reduzir o desgaste, mas este acaba destruindo componentes
 - Desgaste é a primeira causa de fim de vida de automóveis (pode durar 150.000 ou 200.000 milhas, mas falhará) -> desgaste nunca para em peças em movimento

Introdução

- Terremotos são causados pelo fenômeno do “stich-slip” entre placas tectônicas
- Erosão, uma forma de desgaste, causa mudanças na paisagem (costa, Grand Canyon)
- Atrito e desgaste são importantes no corpo humano -> a artrite está ligada à perda de lubrificação nas juntas (parte importante das pesquisas em tribologia são destinadas a próteses)

Introdução

- Exemplos da importância da tribologia são encontrados em todo lugar e por isso seu entendimento é importante
- Estimasse ainda que gastos de manutenção relacionados ao desgaste representam 5% do PIB de qualquer país
- Entender atrito, desgaste e lubrificação pode reduzir gastos (ex. reduzir consumo de energia e aumentar tempo de vida)

Introdução

- Atrito e desgaste não podem ser eliminados, mas seu efeito pode ser reduzido para níveis economicamente toleráveis
- Para entender tribologia focaremos nos fundamentos de atrito e desgaste

Estudos históricos de atrito e desgaste

- O homem pré-histórico já utilizava dispositivos tribológicos para melhorar sua qualidade de vida. Quando matavam um grande animal aprenderam que era mais fácil arrastá-lo que carregá-lo (força de arrasto era uma fração do peso). Rodas facilitavam ainda mais (atrito de rolamento < atrito “escorregamento”)
- Os egípcios usavam líquidos lubrificantes para movimentar pedras para construir seus monumentos
- Em 1495, Leonardo da Vinci documentou um dispositivo para estudar o atrito



Estudos históricos de atrito e desgaste

- Em 1699, Guillaume Amontons escreveu que a força para arrastar um objeto no plano era aproximadamente $1/3$ de seu peso e que esta força tinha origem na interação entre asperidades das superfícies. Praticamente postulou a primeira lei do atrito:

“A força de atrito é proporcional à força aplicado ao objeto sendo colocado em movimento, e é independente da área”

- Em 1785, Charles A. de Coulomb estudou o atrito e observou que a força de atrito era independente da velocidade

Estudos históricos de atrito e desgaste

- Hoje a definição de força de atrito é: força de resistência tangencial à interface entre dois corpos quando, sob ação de uma força externa, um corpo tende a se mover relativamente ao outro – ASTM G 40
- O que hoje chamamos de coeficiente de atrito é o “1/3” de Amontons.
- Primeira lei do atrito:

$$F = \mu N$$

F = força de atrito

μ = coeficiente de atrito

N = força normal aplicada ao objeto sendo movido

Estudos históricos de atrito e desgaste

- Muitos outros estudos contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento em atrito, mas não evoluímos ao ponto de poder-se usá-los para “projetar coeficiente de atrito” para a maioria dos sistemas práticos. Basicamente medimos e predizemos atrito através de medidas em laboratório
- Atrito, como tópico, é mais amplo que um sólido deslizando sobre outro. Ocorre também entre um fluido e a superfície que desliza sobre ele ou em qualquer coisa que se mova. (não sabemos evitar – “um dos problemas para o motoperpétuo”)

Definição: atrito consiste em forças sobre um objeto, resistindo ao movimento, quando o movimento é “atingido”

Estudos históricos de atrito e desgaste

- A força de atrito para iniciar o movimento é, em geral, maior que a força de atrito para mantê-lo em movimento -> motivo para usarmos os termos coeficiente de atrito estático e dinâmico
-
- A história do desgaste é similar à do atrito, sendo conhecido desde a pré-história, “mas ainda não conhecemos as leis como no caso do atrito”.
 - A evolução das ferramentas dão uma ideia cronológica de como o homem tratou o desgaste (Madeira, Pedra, Metais, Tratamentos de metais para reduzir desgaste)
 - Paralelamente estavam lubrificantes e mancais que reduziam o efeito negativo do atrito e desgaste em dispositivos mecânicos

Estudos históricos de atrito e desgaste

- Hoje temos dispositivos engenhosos, materiais e lubrificantes no “arcenal de combate” ao atrito, desgaste e erosão, boa parte deles estudados pela engenharia de superfícies

Mecânica do contato

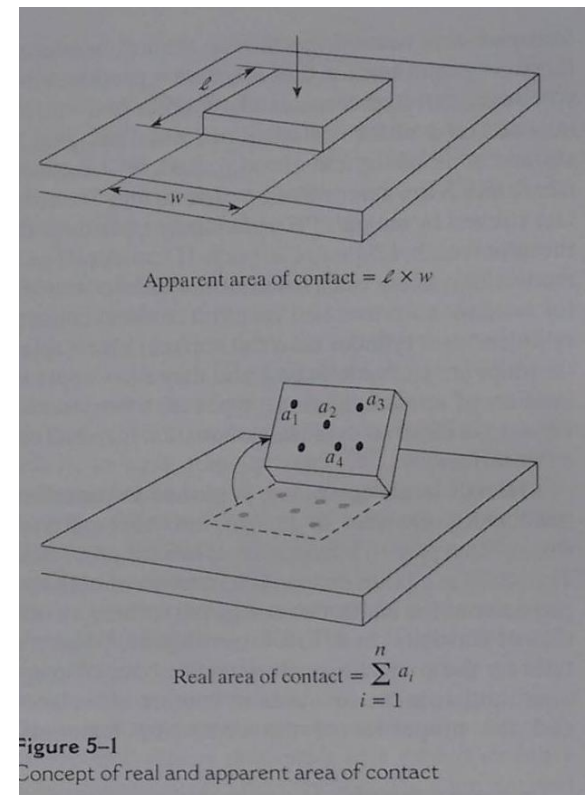
- Principais interessados em tribologia (comunidade de tribologia):
 - Físicos: em geral interessados nos aspectos atômicos das superfícies em contato
 - Químicos: em geral interessados em lubrificantes e materiais orgânicos “robustos” para separar superfícies
 - Eng. Mecânicos: em geral interessados aspectos de projeto de partes e mecânica do tribosistema (mecânicas dos fluidos, aumento de temperatura, esforços ...)
 - Eng. de Materiais: em geral interessados na resposta dos materiais

Mecânica do contato

- Mecânica do contato: concentra-se nos esforços e deformações em áreas microscópicas no contato entre sólidos
- Contato real x aparente

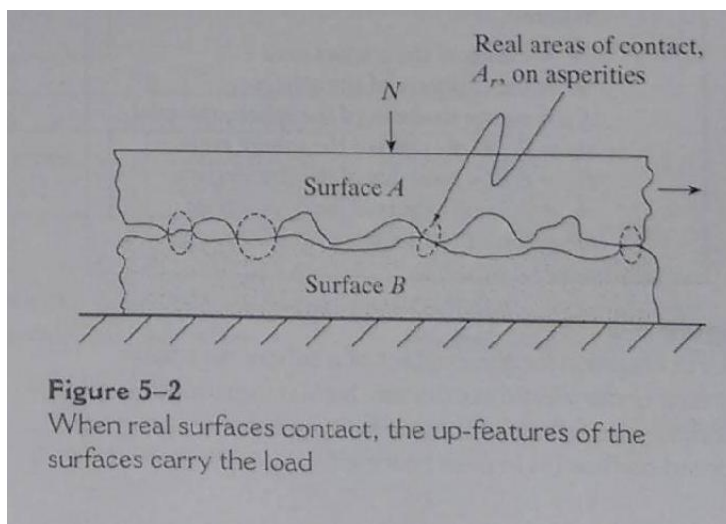
Como as superfícies têm erros de forma (+rugosidade), devido ao processo de fabricação, as superfícies apresentam várias regiões de contato, com tamanho dependente da carga aplicada.

Maior carga -> Maior área de contato



Mecânica do contato

- A mecânica do contato considera que as “asperidades” da superfície suportam a carga aplicada, e busca um tratamento matemático dos aspectos relacionados ao atrito e ao desgaste



Vários modelos teóricos foram desenvolvidos para calcular o coeficiente de atrito em pares tribológicos, conhecendo a topologia das superfícies e as força de interação. Mas poucos são usados em problemas práticos devido a baixa confiabilidade “na vida real”

Mecânica do contato

- Desgaste nem sempre envolve contato entre superfícies conformes, como veremos, algumas forma de desgaste ocorrem por ação mecânica de fluidos, contatos de partículas abrasivas ou esferas/rolos em movimento na superfície
- Um dos aspectos mais importantes e útil da mecânica do contato é a determinação de esforços pontuais ou em linha pelas equações de tensão de Hertz

Mecânica do contato

- No século 19 Henrich Hertz desenvolveu modelos para calcular tensões elásticas para sistemas como:

- Esfera em superfícies plana
- Cilindros cruzados
- Cilindro em superfícies plana

Expressões ainda muito usadas para aproximar esforços

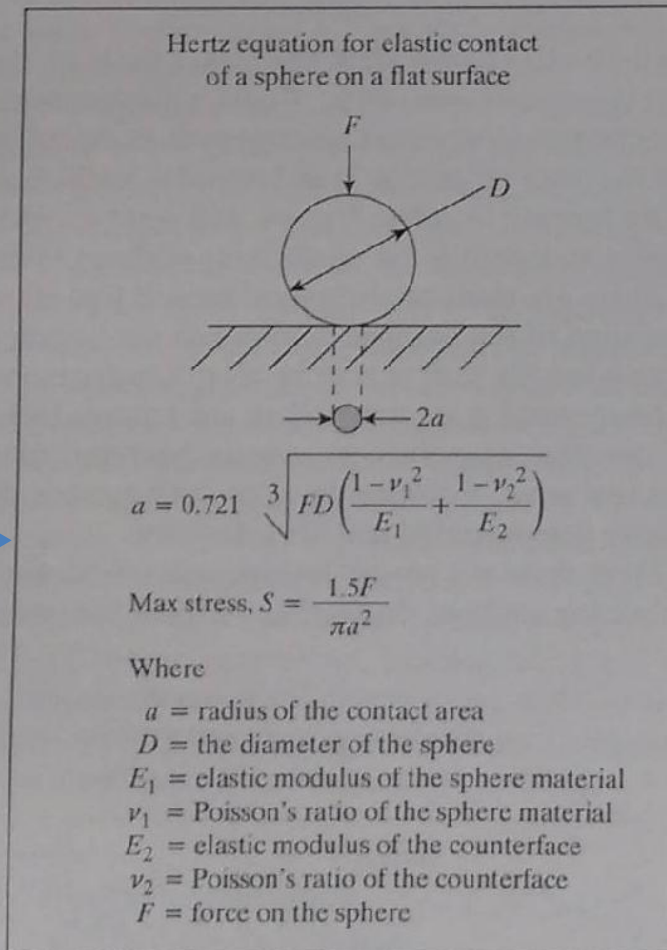
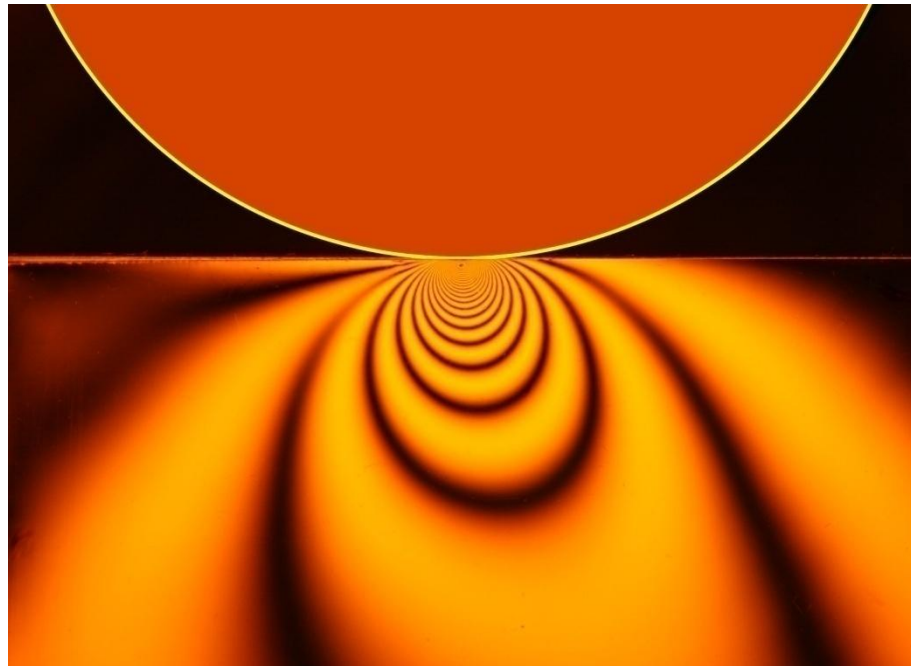


Figure 5-3

Hertz equation for the contact of a sphere on a flat surface under elastic conditions. Similar equations exist for a cylinder on a flat surface and for a cylinder on an upward curved surface (as in plain bearings)



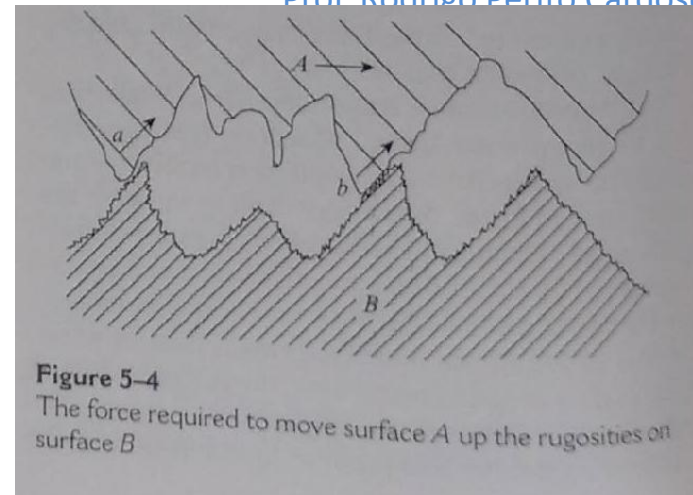
Stresses produced by a contact with a combined normal and tangential load made visible by polarization optics

Mecânica do contato

- As eq. de Hertz possibilitam estimar esforços no material, com papel importante nos processos de desgaste
- O esforço no ponto de contato é uma função da geometria, da rigidez (E) e do módulo de Poisson dos materiais em contato
- A base de muitos modelos de desgaste é a área real de contato e as propriedades dos materiais.
- Resumidamente, a mecânica de contato é uma ferramenta importante no entendimento de pares tribológicos, mas atualmente não é suficiente para resolver os problemas práticos encontrados

Atrito

- O que causa o atrito:
 - Planos inclinados, devido a rugosidade/erros de forma, que devem ser vencidos para que o movimento ocorra e seja mantido
 - Forças atômicas tendendo a unir os corpos (princípio da ligação atômica, forças de atração/repulsão)
 - Filmes formados podem ter papel importante (todas superfícies reais em contato são recobertas por filmes que interagem) -> com forte influência



Atrito

- O que causa o atrito:
 - Forças para deformar plasticamente “partes/relevos” das superfícies em interação
- Em um caso real todos as causas devem participar:

$$F = F_a + F_p + F_s + F_n$$

where F = observed friction force

F_a = forces to break adhered junctions

F_p = forces to plow and deform surface features

F_s = forces to shear films between surfaces

F_n = forces due to the nature of the sliding system

Atrito

- A força de atrito independente da área pode ser explicada/entendida da seguinte forma:

Força de atrito

$$F = S A_r$$

Área de contato real

Máxima tensão de cisalhamento

A área real de contato depende da força normal (N) e da dureza (“dureza de penetração”)(P) do corpo mais mole

$$A_r = \frac{N}{P}$$

combinando
as eqs.



$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{S A_r}{P A_r} = \frac{S}{P}$$

Explica ainda porque
atrito nunca é zero

$$F = \mu N$$

Atrito

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{SA_r}{PA_r} = \frac{S}{P}$$

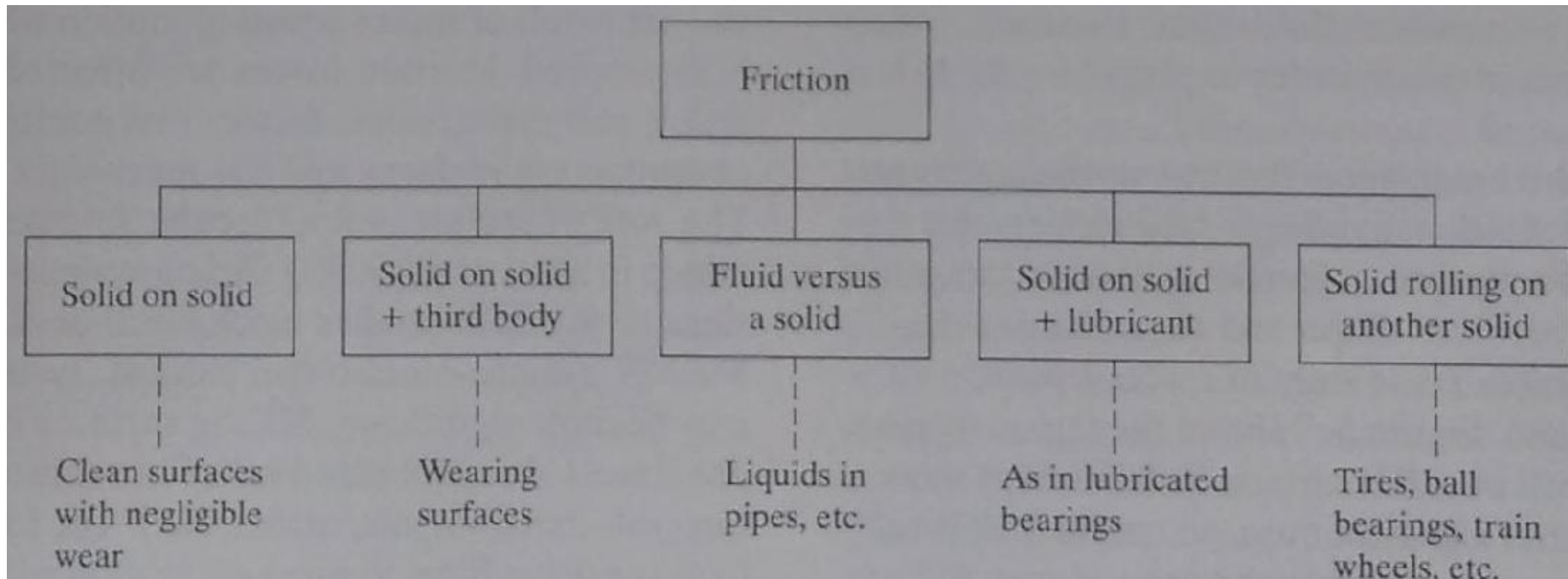
- Coeficiente de atrito é raramente maior que 1 pois é incomum um material onde a dureza é menor que a máxima tensão cisalhante (como borrachas)
- Adicionalmente a expressão explica porque μ é pouco dependente de T e da velocidade de deslizamento (S e P variam no mesmo sentido)

Atrito

- O atrito depende obviamente da natureza do material, devido ao P e S ser diferente para diferentes materiais e filmes.
- Existe ainda um efeito químico influenciando a máxima tensão de cisalhamento (adesão rápida à superfície)
- Alto atrito de borrachas com a maioria dos sólidos (normalmente >1) vem da relação S/P e da elevada “conformabilidade” da superfície (elevada área com pequena carga) + efeito visco-elástico

Atrito

- Existem diferentes tipo de atrito



- A principal contribuição varia de caso a caso

$$F = F_a + F_p + F_s + F_n$$

Atrito

- Atrito de rolamento é a força para iniciar o “rolamento” de um corpo e mantê-lo rolando. Tem a mesma forma matemática:

$$\mu_r = \frac{F_r}{N}$$

where μ_r = coefficient of rolling friction
 F_r = force to produce rolling
 N = normal force

Normalmente chamada de coeficiente de atrito de rolamento

Atrito

- A diferença física
- Rolamento puro “não geraria desgaste”
- Raramente encontra-se “rolamento puro” -> uma parte do contato

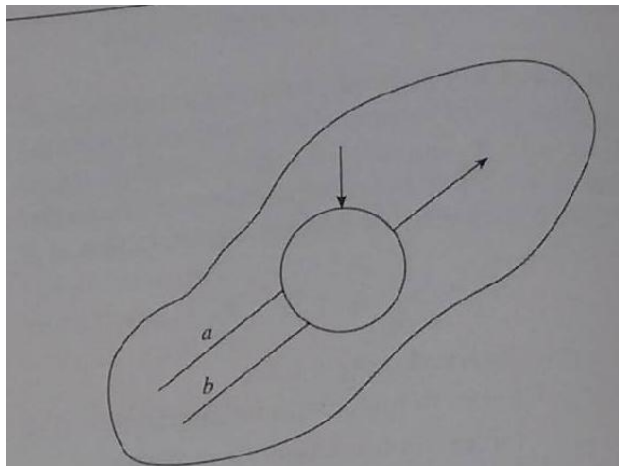
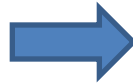


Figure 5-7
Pure rolling occurs only in areas *a* and *b*

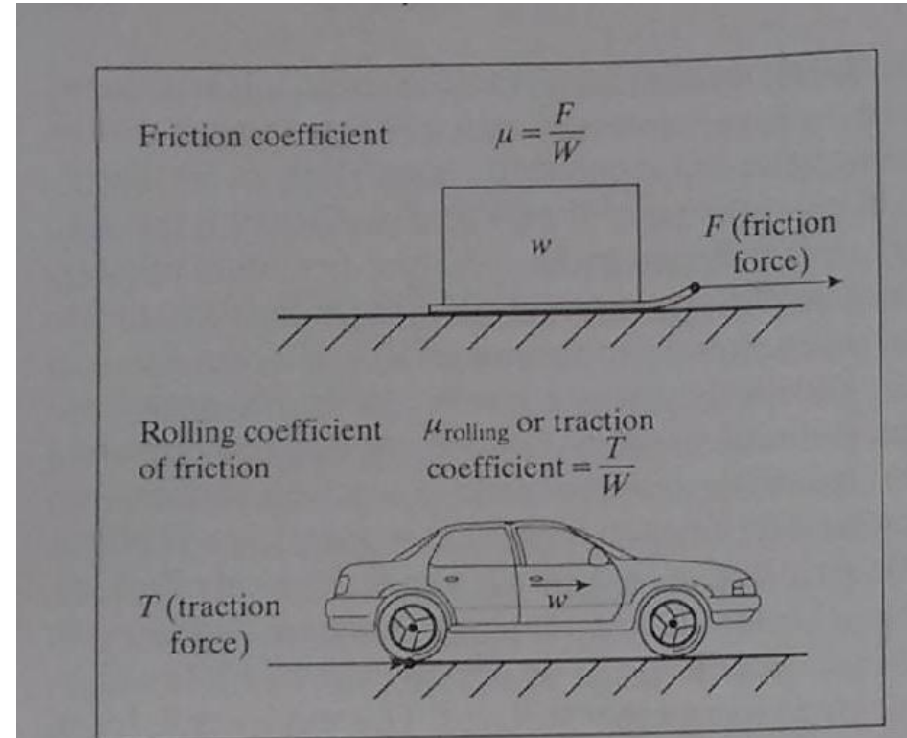


Figure 5-6

The difference between the coefficient of friction and the traction coefficient, which are mathematically the same, but different in point of force application

Esfera “rolando” em um plano

Atrito

- Aspectos que afetam o atrito de rolamento:
 - Raio do “corpo rolante” -> maior raio rola mais fácil
 - Um “corpo rolante” mais duro rola mais facilmente que um macio
 - Um “corpo rolante” mais rígido rola mais facilmente
 - Superfícies lisas facilitam o rolamento

Curiosidade: estima-se que se todos mantivessem os pneus dos carros calibrados existiria uma redução de consumo de ~10% (“pneu + duro”)

Atrito

- Resumindo:
 - O atrito é uma soma de forças impedindo o deslizamento ou rolamento de corpos
 - Forças de atrito são afetadas por fatores microscópicos e macroscópicos que controlam a interação entre as superfícies
 - O papel das forças atômicas e moleculares é provavelmente menor na maioria dos sistemas deslizantes de engenharia, mas para sistemas de pequena escala, como MENS (micro-electro-mechanical systems), elas podem se significativas

Atrito

- Resumindo:
 - Superfícies deslizantes de máquinas são, em sua maioria, cobertas por filmes (umidade adsorvida, óleo, óxidos, contaminantes ...) -> a força para cisalhar este filme é uma componente da força de atrito
 - A deformação plástica que ocorre em contatos reais também é um fator importante, pois superfícies não são perfeitamente lisas e planas, logo o contato é feito em “pontos” que se deformam elástica e plasticamente -> a força de atrito é a manifestação da energia dissipada para alterar as superfícies em movimento
 - Atrito é dissipativo -> forças e calor -> não pode ser eliminado

Atrito

- Medidas de atrito, ex.:
 - Testes de deslizamento a seco mais comuns para medir o coeficiente de atrito
 - Teste de medida de atrito de rolamento da indústria automotiva

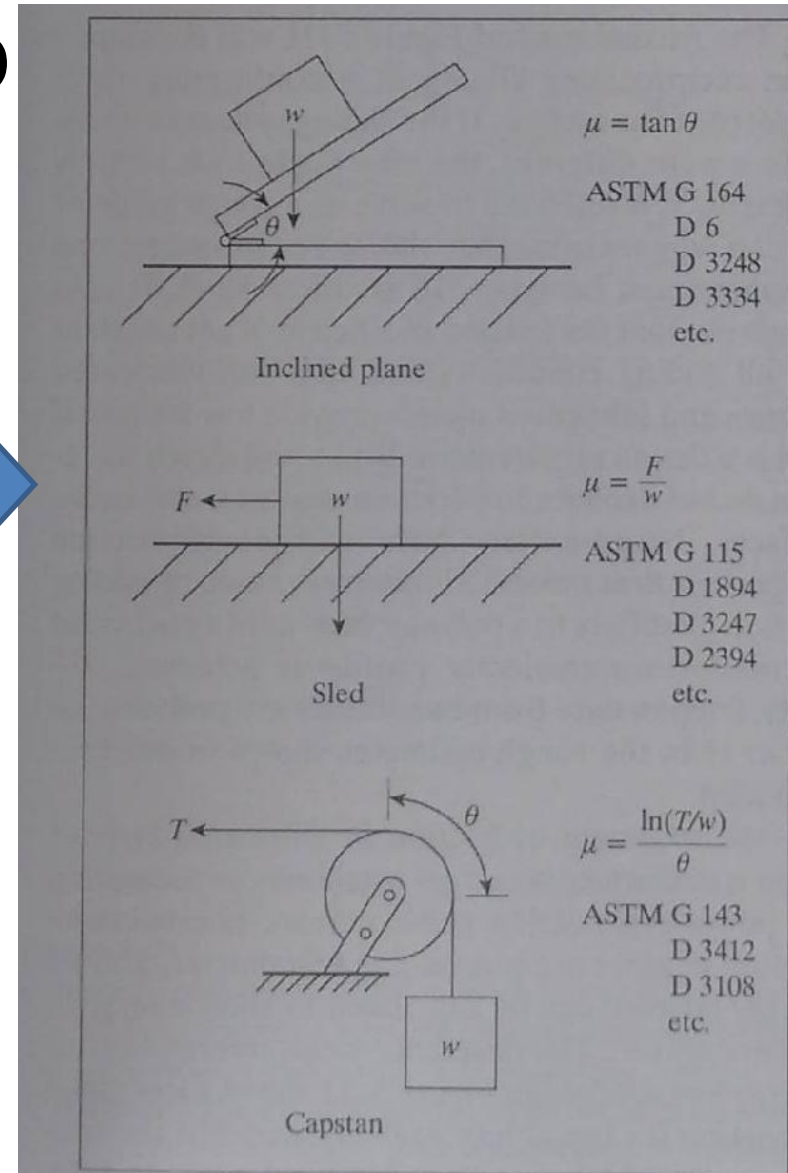
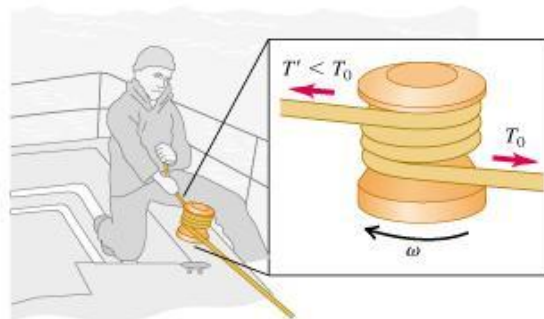


Figure 5-8
Equations for friction force

Atrito

- Registros da força de atrito são empregados para identificar os “tipos de atrito”
- Ao longo de testes os “debris” podem participar e alterar o μ
- Valores de μ são provenientes de testes que simulam as aplicações
- Aplicação de dados da literatura se restringem a tribosistemas similares
-> o coeficiente de atrito não é de um material e sim do tribosistema

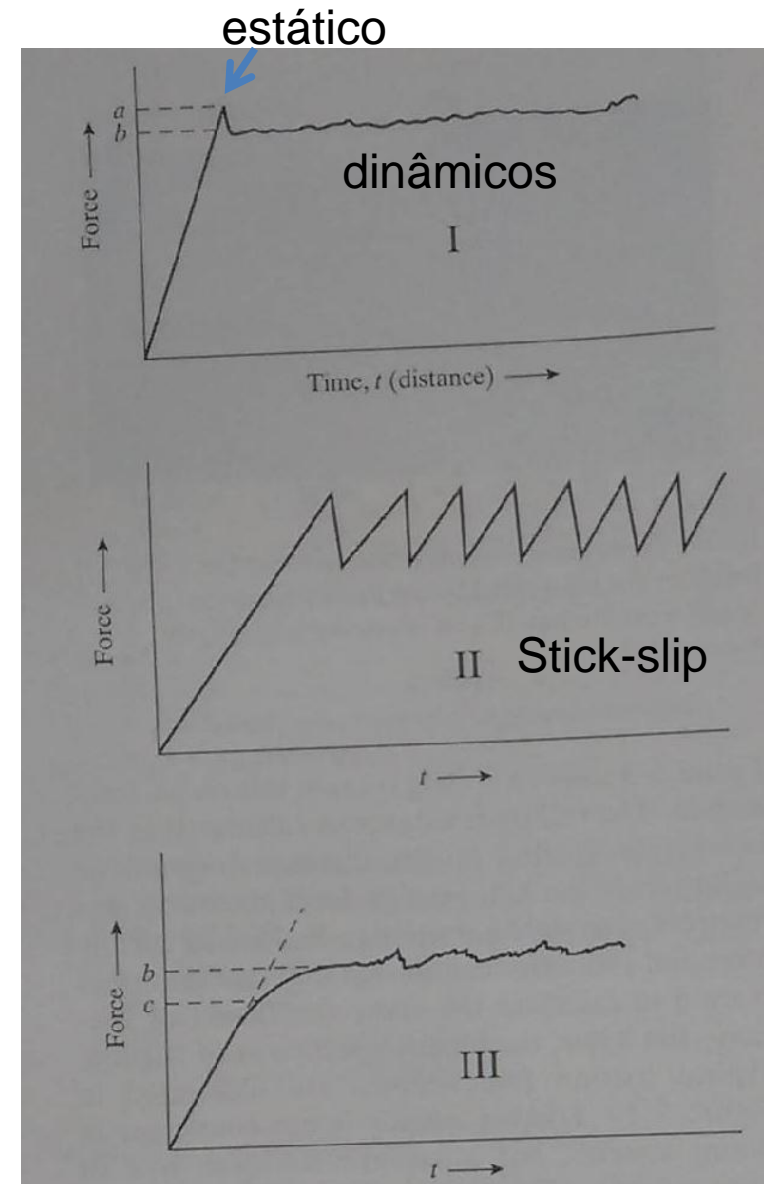


Figure 5-10

Types of friction force recordings that can be encountered

Dados da tese de C.J. Scheuer

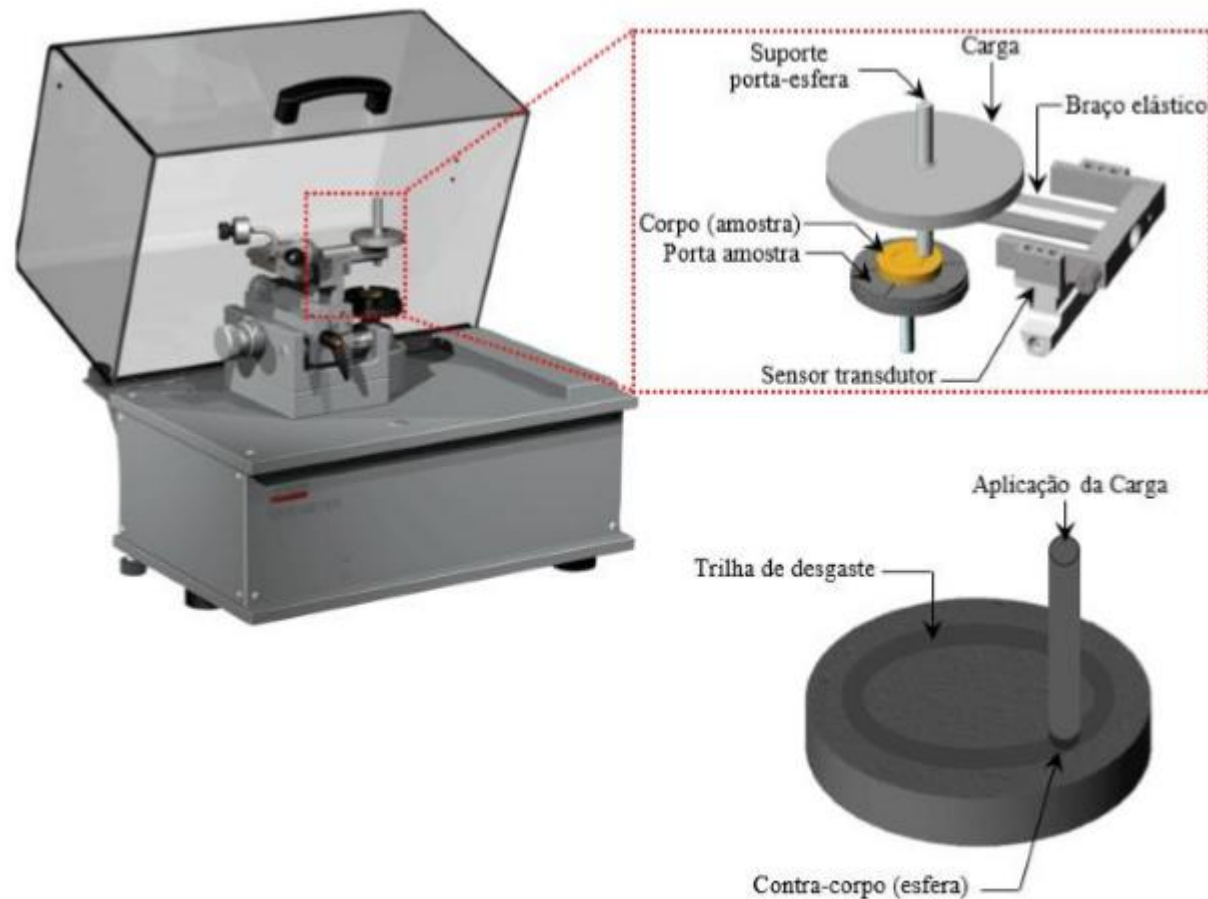


Figura 97. Equipamento de ensaio de desgaste por deslizamento na configuração esfera sobre disco marca CSM.

Dados da tese de C.J. Scheuer

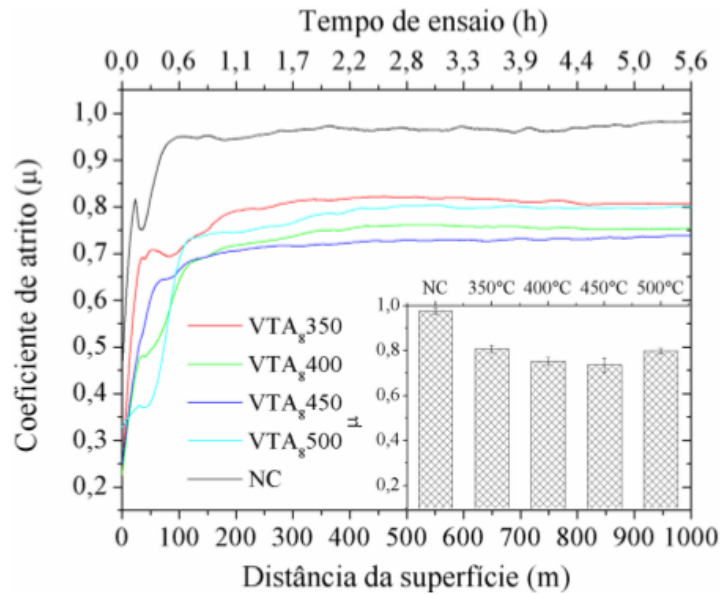


Figura 116. Evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e tempo de ensaio para as amostras não tratada e cementadas por 8 h a 350, 400, 450 e 500°C. Ensaios tribológicos realizados em condições ambiente, utilizando uma esfera de Al_2O_3 de 6 mm de diâmetro, aplicando-se uma carga de 5 N para uma distância de deslizamento de 1000 m.

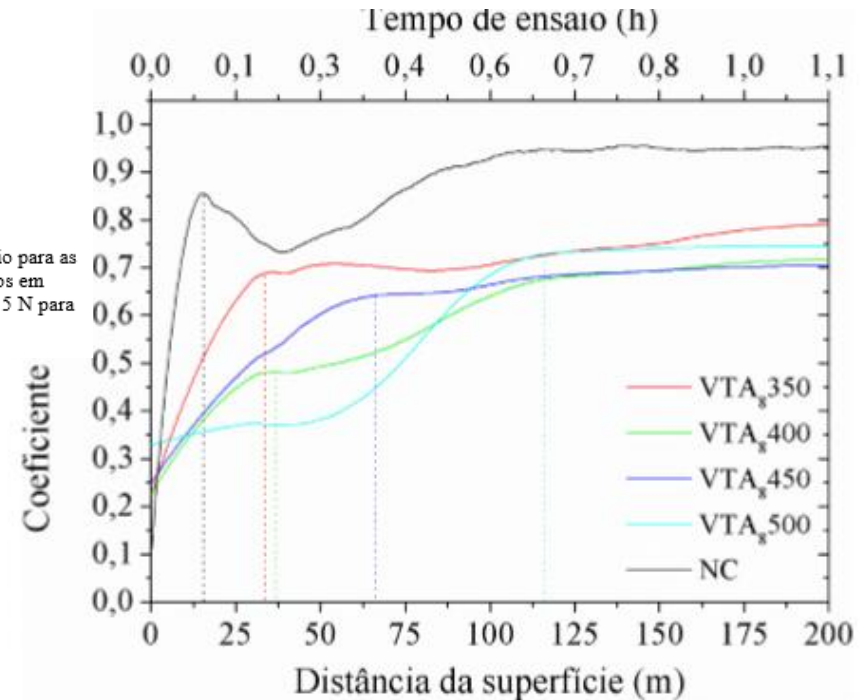
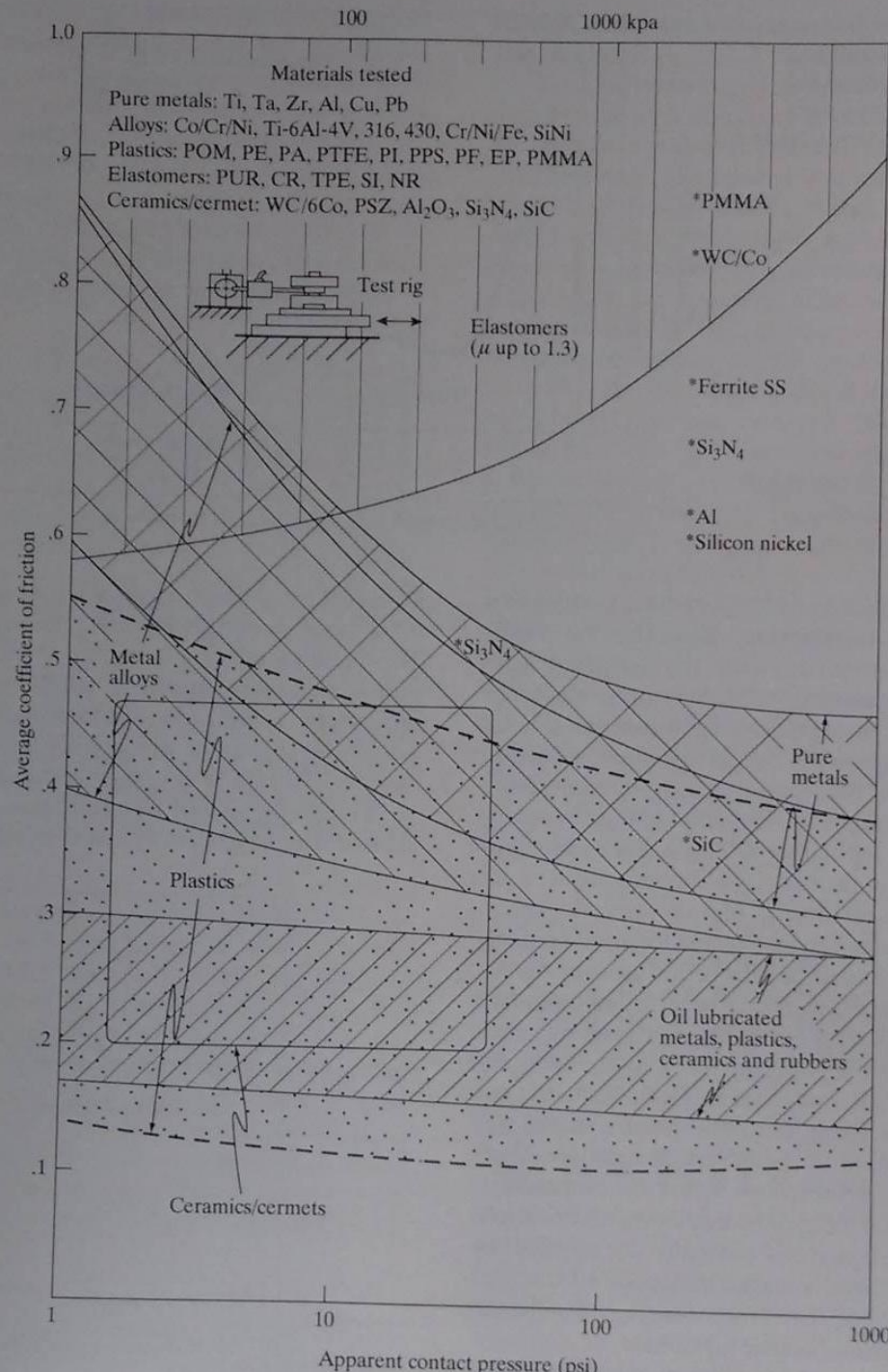


Figura 117. Ampliação da curva coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento apresentada na Figura 116.

Atrito

- Atrito de rolamento e de pares lubrificados pode ser muito baixo.
- Materiais de freios e embreagens são projetados para ter coeficiente de atrito “elevado”



Em alguns casos o aumento da carga tende a reduzir o coeficiente de atrito -> aumento de áreas, deformação da sup., fusão

Em metais o aumento da força pode causar travamento

Se o contra corpo não for o 316 o mapa pode ser bem diferente

*Damaged counterface, galled, etc. (test loads 100, 1000, 9080 g)

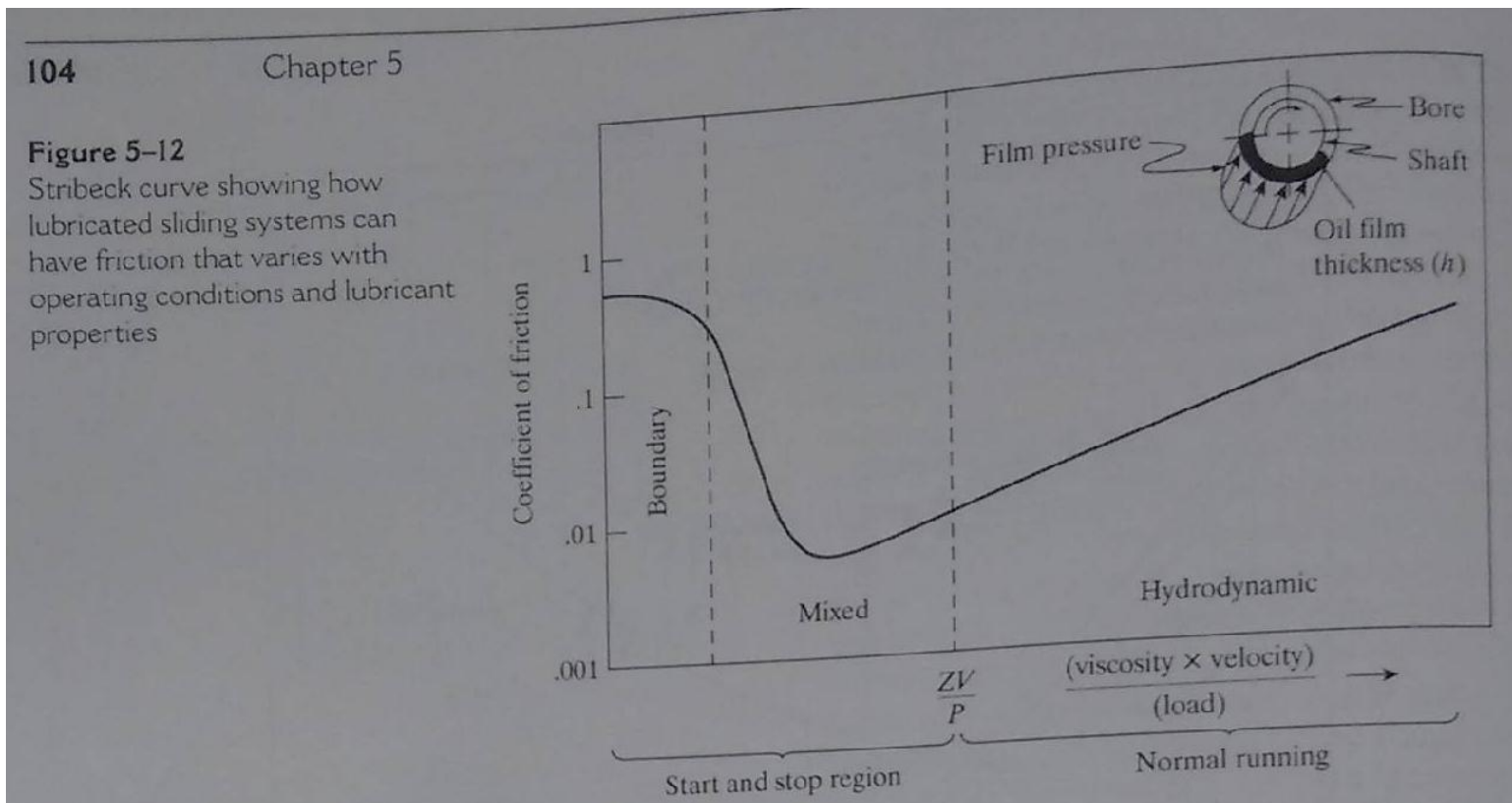
Figure 5-11
 Average friction coefficients for various materials in reciprocating motion of an annular ring rider (0.1 in.² area) on a type 316 stainless steel counterface at 20°C, 50% relative humidity (RH) at various normal forces. The stroke was 50 mm and the frequency was 0.5 Hertz. The friction force was averaged for eight cycles in each test.

Atrito

- Coeficiente de atrito em sistemas lubrificados podem ser medidos nas máquinas reais pela medida da potência consumida
 - Ex. Motores podem ser colocados em dinamômetros e por balanços de energia pode-se estimar a energia dissipada por atrito

Atrito

- Em contatos lubrificados o μ depende do lubrificante e da velocidade



Com engenharia de superfícies pode-se estruturar superfícies e melhorar a lubrificação

Atrito

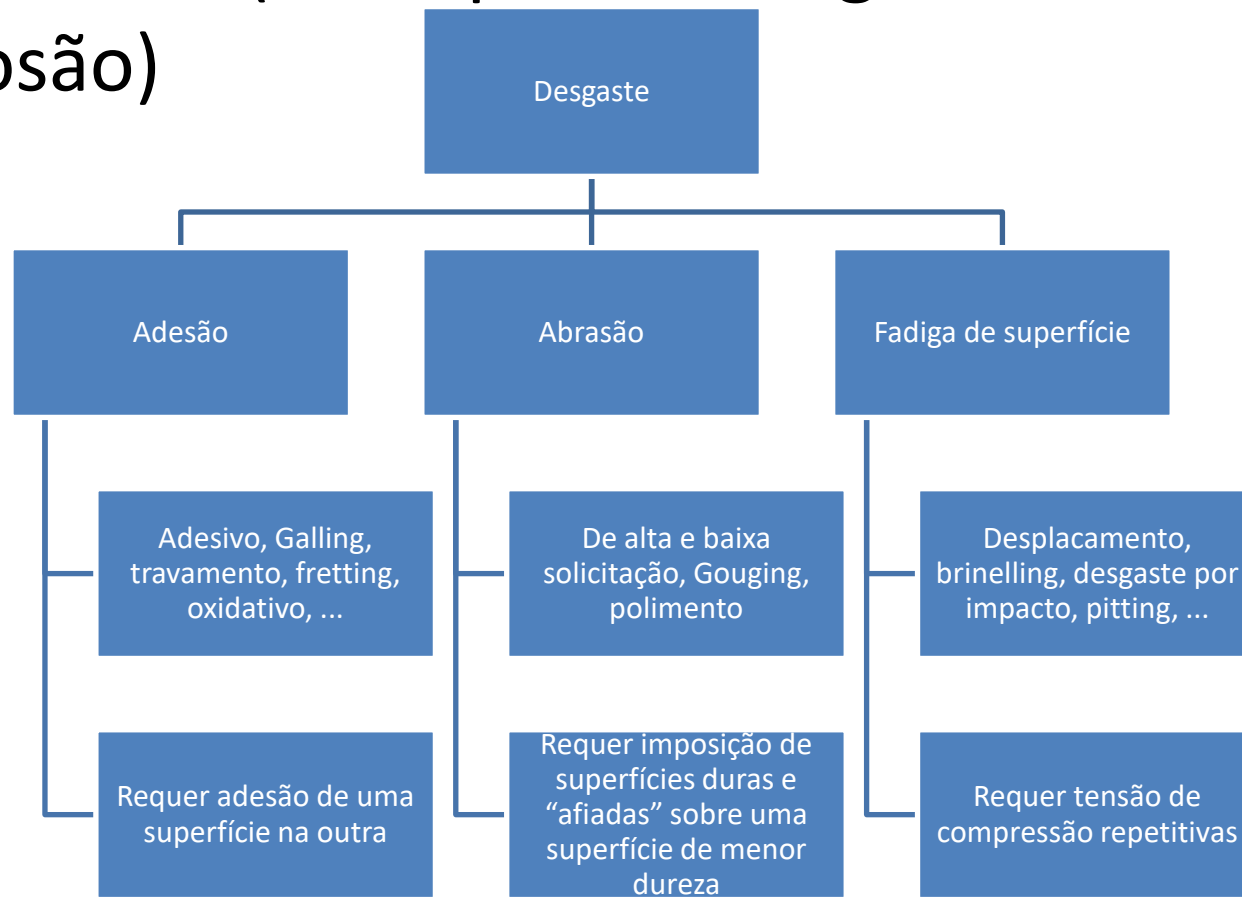
- Desgaste “não ocorre” na lubrificação hidrodinâmica
- Coeficiente de atrito em sistema lubrificadas com óleos e graxas podem ser medidos em laboratório

Definição de desgaste

- Desgaste e erosão, segundo ASTM G40:
“**deterioração de uma superfície sólida**, geralmente envolvendo perda progressiva de material, devido ao movimento relativo entre superfícies, entre uma superfície e um fluido, fluido multicomponente, ou colisão de líquidos ou partículas sólidas”
- Algumas vezes, deslizamento entre sólidos causa mais deslocamento de material por deformação plástica que remoção de material (de acordo com a definição)

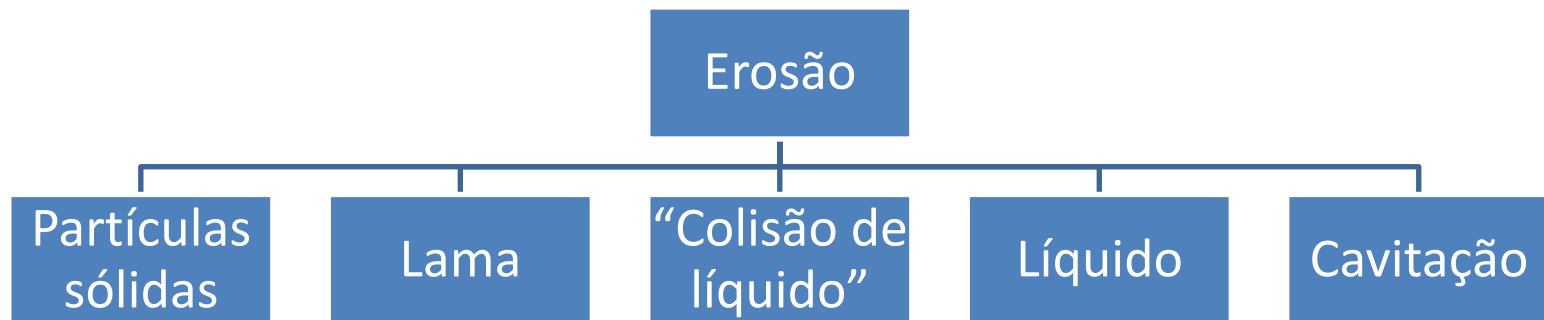
Tipos de desgaste/erosão

- Desgaste e erosão pode se dar por diferentes mecanismos (~13 tipos de desgaste e ~5 tipos de erosão)



Tipos de desgaste/erosão

- Desgaste e erosão pode se dar por diferentes mecanismos (~13 tipos de desgaste e ~5 tipos de erosão)



Tipos de erosão

- Por partícula sólida:
Causada pela colisão de partículas sólidas carregadas por um gás (ensaio ASTM G 76)

Ocorre por exemplo em ciclones, ventiladores, pás de turbina...

Depende da massa da partícula (M), sua velocidade (V), ângulo de impacto (r) e da forma da partícula (sharpness) (P)

$$\text{Erosion (particle)} = \alpha MV^2(r)(P)$$

$\alpha = \text{constant for the system}$

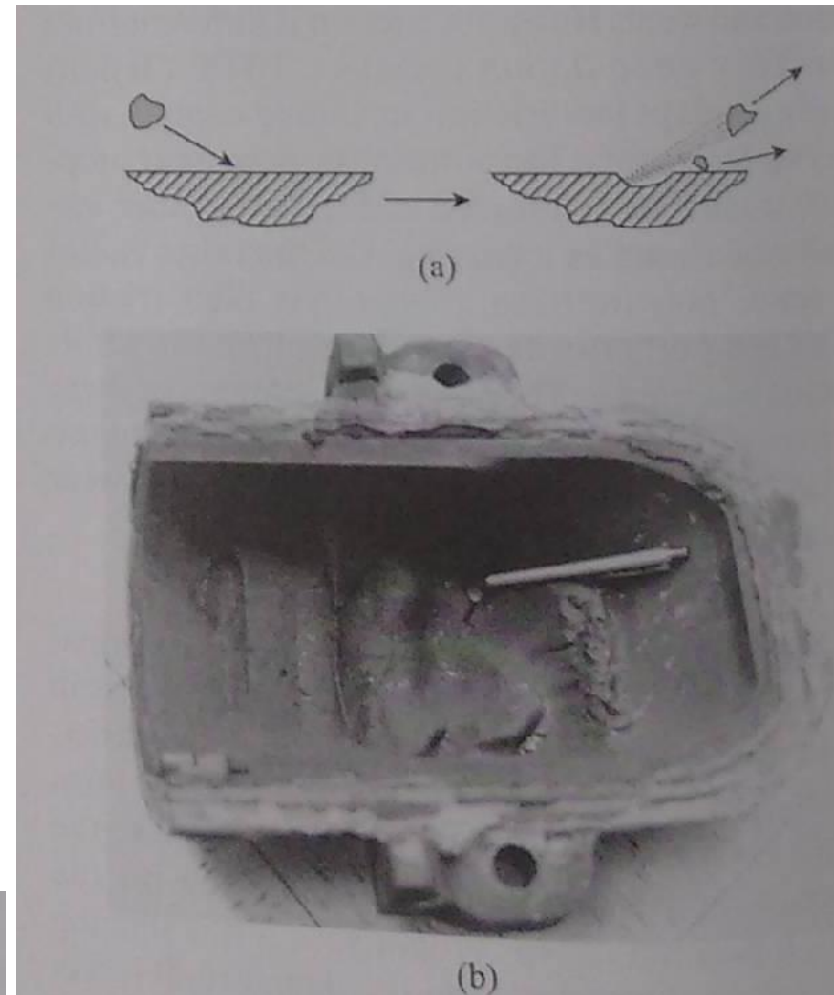


Figure 5-16

(a) Schematic of solid particle erosion; (b) erosion of a wearback from a pipe carrying fly ash. Note hole and wavy surface.

Tipos de erosão

- Por partícula sólida
 - O efeito do ângulo depende do sistema -> Materiais frágeis apresentam maior erosão com impacto à 90°, já materiais dúcteis apresentam máxima erosão para ângulos entre 20 e 30°
 - O mecanismo de remoção de material pode variar de deslocamento até corte em materiais dúcteis.

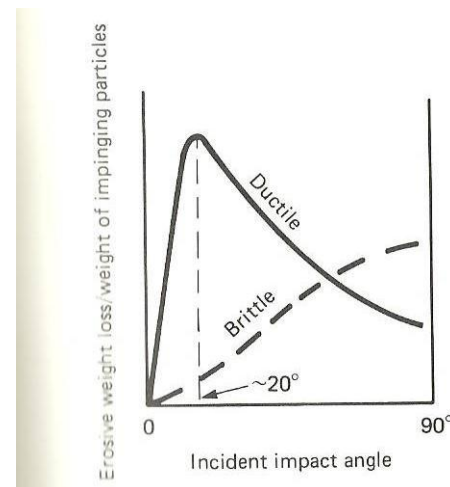


Figure 12.1 Effect of impact angle on erosive wear in ductile and brittle materials.

Tipos de erosão

- Por lama:
 - Causada pelo movimento de uma lama sobre uma superfície (ensaio ASTM G 75 – Teste do número de Miller)

Ocorre por exemplo em bombas e tubulações que transportam lama (ex. na mineração)...

Comportamento e mecanismos similares à erosão por partículas sólidas, entretanto aqui as partículas tendem a mover-se paralelamente à superfície, se assemelhado ao mecanismo de riscamento. Adicionalmente pode ter corrosão pelo fluido.

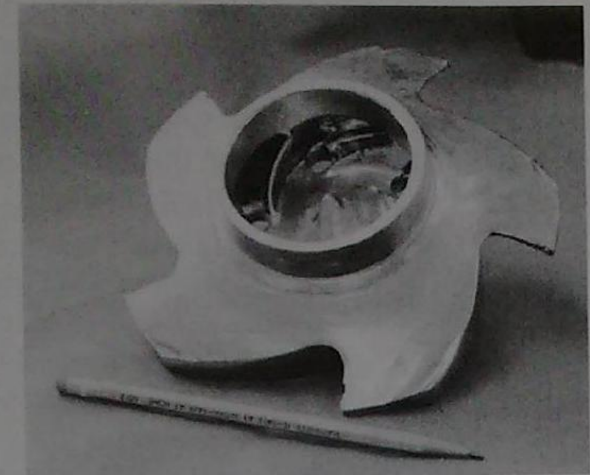
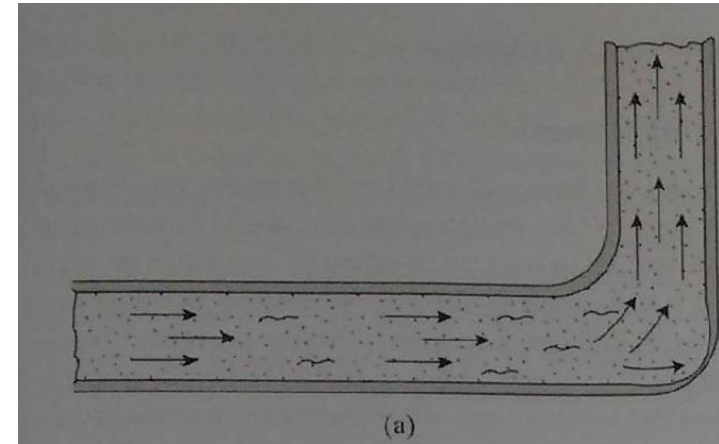


Figure 5-17

(a) Schematic of slurry erosion; (b) pump impeller showing erosion damage from pumping a slurry of silica and water

Tipos de erosão

- Por “colisão de líquido”:

Causados pela colisão de gotículas de líquido na superfícies de um sólido(ensaio ASTM G 73)

Ocorre por exemplo quando um avião entra em uma região chuvosa e em turbinas a vapor (quando condensados estão presentes no vapor)

Tipos de erosão

- Por líquido:

Caracterizado pela remoção de material pela ação de um líquido

Normalmente encontrada em tubulações, especialmente aquelas feitas em materiais resistentes a corrosão que dependem da camada passiva

A ação mecânica do líquido remove a camada passiva, que se reforma e é novamente retiradas

Existe uma velocidade crítica abaixo da qual este tipo de erosão não ocorre

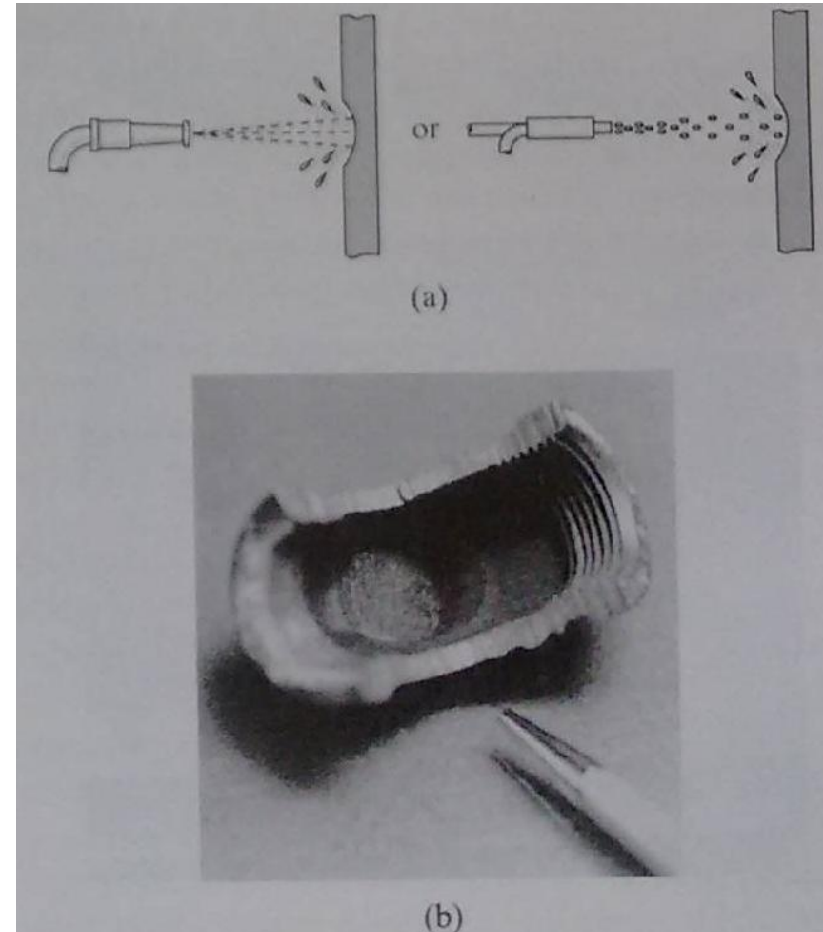


Figure 5-18

(a) Schematic of liquid impingement erosion; (b) pipe elbow perforated by impingement from high-velocity fluid in a pipeline

Tipos de erosão

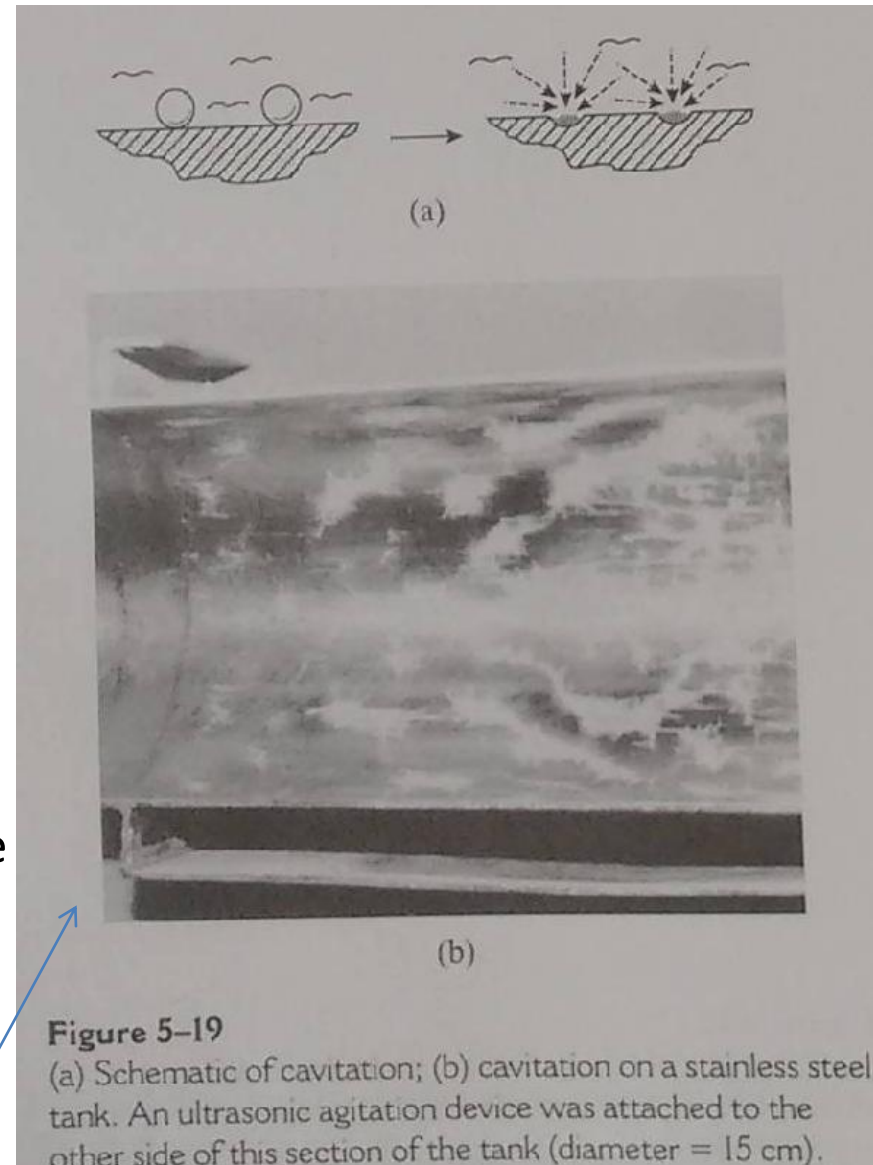
- Por cavitação:

Causada pela implosão de bolas na proximidade da superfície. Com o colapso da bolha o líquido é acelerado, formando um jato, e sua interação com a superfície pode causar deformação plástica

(ensaios normalizados também existem)

Ocorre normalmente em bombas, turbinas hidráulicas e propulsores de barcos

Ex. Tanques de ultrassom





Tipos de desgaste

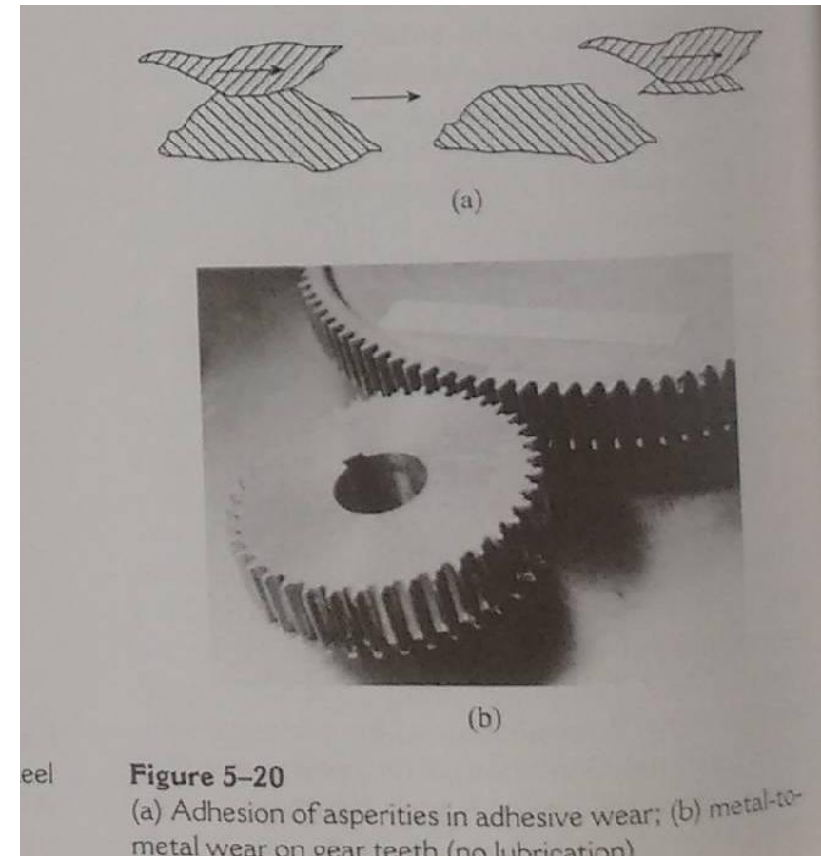
- Desgaste adesivo

Desgaste devido à ligações localizado entre superfícies sólidas em contato levando a transferência ou perda de material em ambas superfícies

Todo material está sujeito a este tipo de desgaste e os fatores que o controlam estão descritos na equação de Archard:

$$W = k \frac{dF}{h}$$

where W = wear volume (mm^3)
 k = a proportionality constant for the system (dimensionless)
 d = sliding distance (m)
 F = normal force (N)
 h = hardness of the softer member (kg/mm^2)

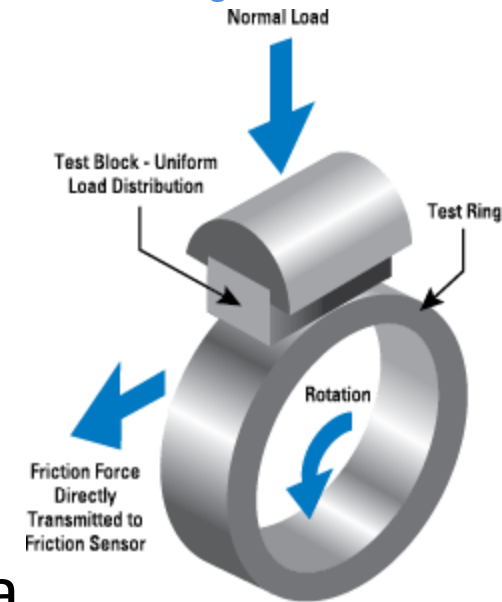


A equação de Archard não prevê mudança de regime (k)



Tipos de desgaste

- Desgaste adesivo
 - Normalmente medido por ensaios block-on-ring (ASTM G 77) para obter k
 - Difícil de prever (variação superiores a 50% em ensaios)
 - Existem dados de k da literatura, mas devem ser usados com cuidado (desgaste é dependente do sistema)



$$W = k \frac{dF}{h}$$

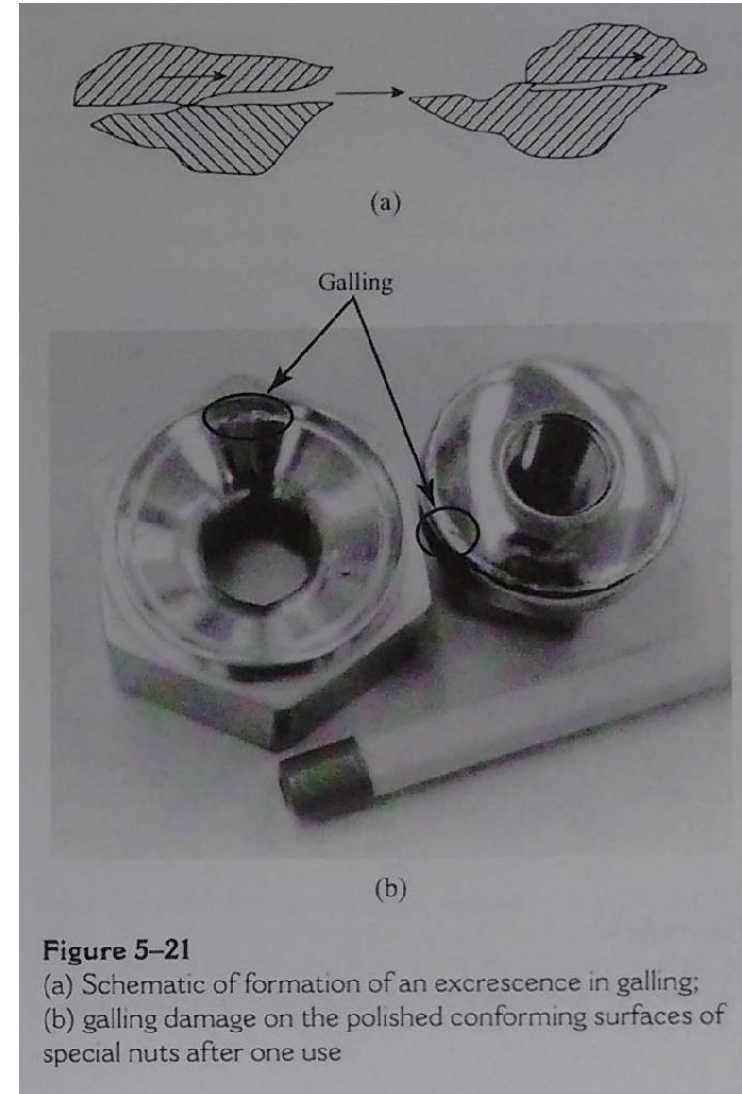
Clean, unlubricated soft metals self-mated	1 to 3×10^{-3}
Clean, unlubricated hard metals self-mated	2 to 5×10^{-5}
Clean, unlubricated hard metal to plastic	1 to 3×10^{-6}
Clean, unlubricated plastic to plastic	1×10^{-3} to 3×10^{-6}
Well-lubricated hard metals self-mated	1 to 3×10^{-7}



Tipos de desgaste

- *Galling*

- Quando o desgaste adesivo se torna severo ele leva ao *Galling*. Caracterizado pela formação de marcas macroscópicas.
- Pode levar ao travamento de sistemas (*Seizure*)
- Materiais macios e monofásicos provavelmente sofrerão *galling* (ex. aço inoxidável)

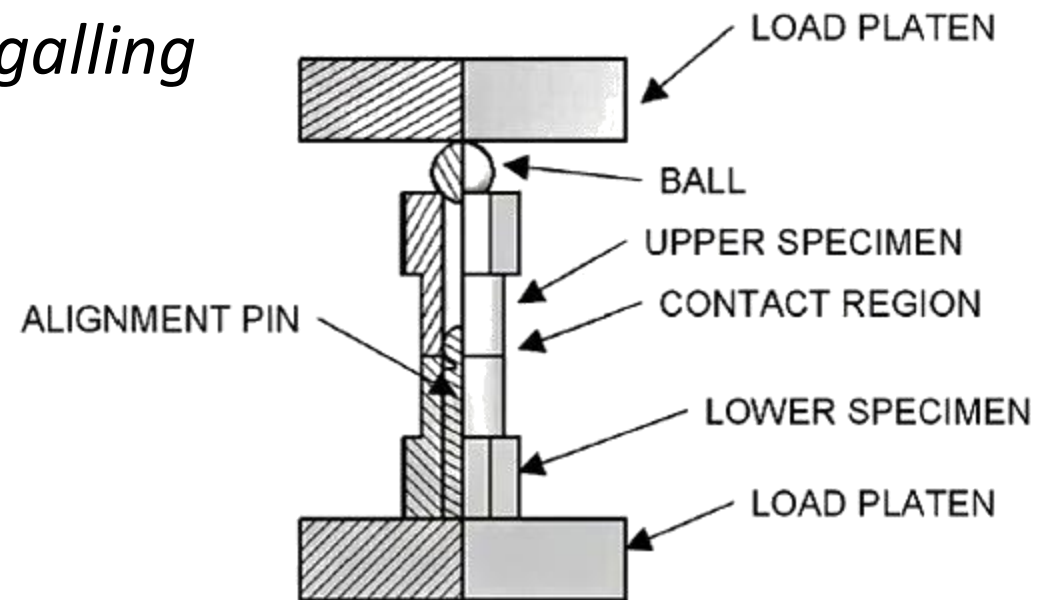




Tipos de desgaste

- *Galling*

- Ensaio de *galling* (ASTM G 98)-
carga crítica para *galling*
- Aumenta-se a carga
gradativamente até o *galling*
ocorrer



Uma revolução

Figure 2: Diagram of G196 Galling Test Configuration



Tipos de desgaste

- *Scuffing e Scoring*

- Formas moderadas de desgaste adesivo, com marcas microscópicas alinhada à direção do movimento.
- *Scoring* é associado a aumento de rugosidade e ocasiona maiores taxas de desgaste

Tipos de desgaste

- *Desgaste oxidativo*
 - Menos severo que o adesivo
 - Inicia-se por um desgaste adesivo. As partículas produzidas reagem com o ambiente e formam óxidos (aparência de ferrugem)
 - Típico de pares tribológicos duros
 - Oxidação devido ao desgaste e não somente ao ambiente (como água e químicos)

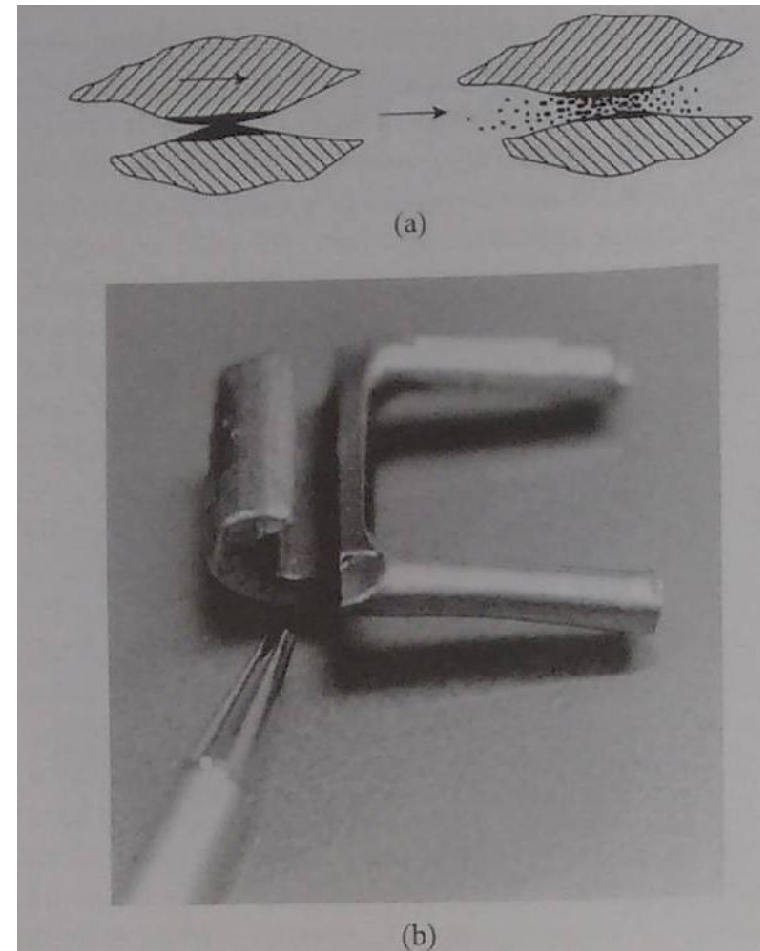


Figure 5-22

(a) Schematic of oxidative wear; (b) oxidative wear occurred from low-speed moving with a mating chain link (dark area)



Tipos de desgaste

• *Fretting*

- Movimento oscilatório de baixa amplitude -> causando “*fretting wear*” (sem oxidação) e “*fretting corrosion*” (com oxidação)
- Caracterizado por uma superfície de desgaste de aparência granulada ou com *pittings*
- Inicia-se pela adesão, seguida da formação de partículas (“*fretting wear*”), que podem se oxidar reagindo com o meio (“*fretting corrosion*”)

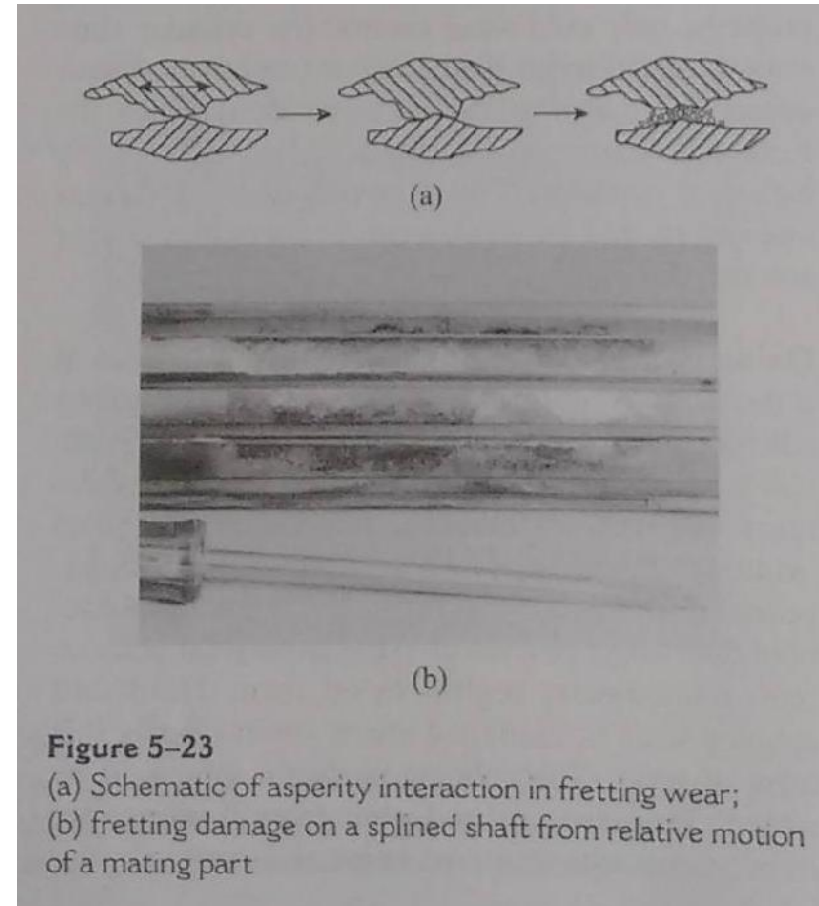


Figure 5-23

(a) Schematic of asperity interaction in fretting wear;
 (b) fretting damage on a splined shaft from relative motion of a mating part

O desgaste se comporta segundo a equação de Archard -> aumenta com a carga e o tempo e diminui com a dureza



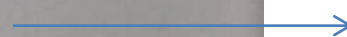
Tipos de desgaste

• *Abrasão*

- Desgaste não intencional ocasionado por partículas “afiadas” ou protuberâncias “pressionadas” contra uma superfícies mais mole.
- A partícula pode ser fixa (desgaste abrasivo a dois corpos) ou livre (desgaste abrasivo a três corpos)
- Usualmente a abrasão a dois corpos é mais severa
- Desgaste usual da sola de sapatos (dois e três corpos)
- Não existe concordância no modelo de desgaste, mas tribologistas adaptaram a equação de Archard, usando um fator B para levar em conta a forma do abrasivo

$$W = \frac{kdF}{h} B$$

$$B = 2 \cot \theta / \pi$$



Qualitativo

Ângulo incluído na indentação



Tipos de desgaste

- *Abrasão a baixa tensão*
 - Apresenta finos riscos na superfície desgastada
 - Ex. desgaste em enxada de mexer concreto, papel, calha de carvão...
 - Um dos mecanismos de remoção de material é a formação de cavaco, mas a interação pode formar sulcos sem remoção de material (def. plástica) -> similar ao lixamento

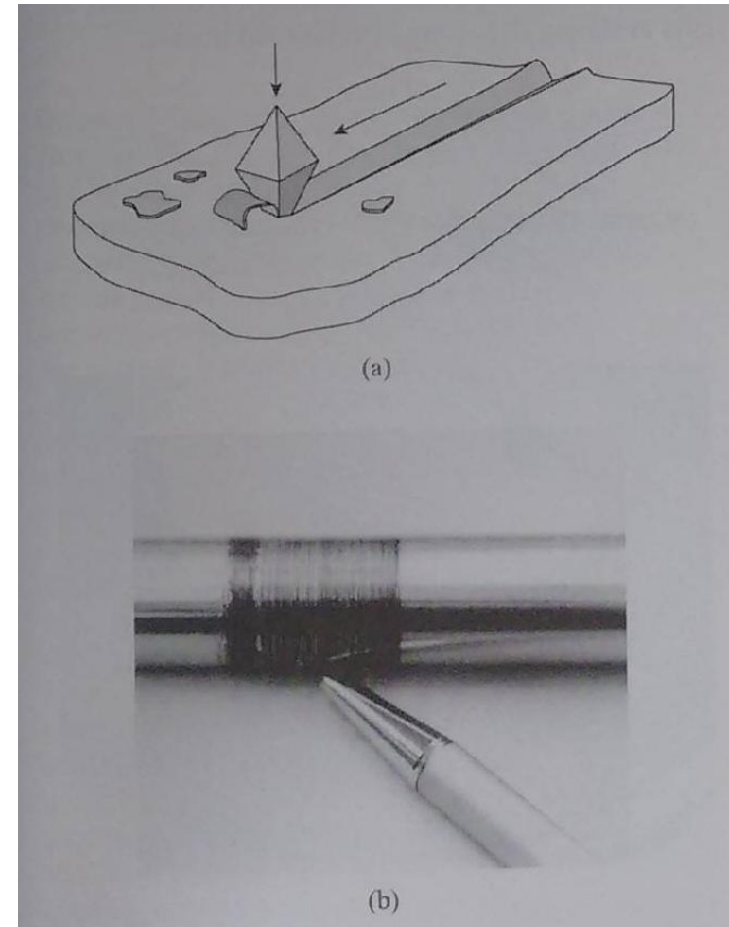


Figure 5-24

(a) Schematic of low-stress abrasion; (b) low-stress abrasion of a shaft from hard contaminants in a plastic bushing

Desgaste

Adesão

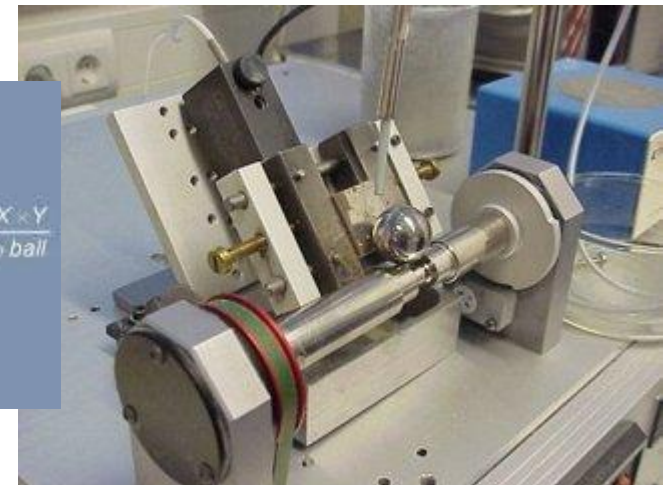
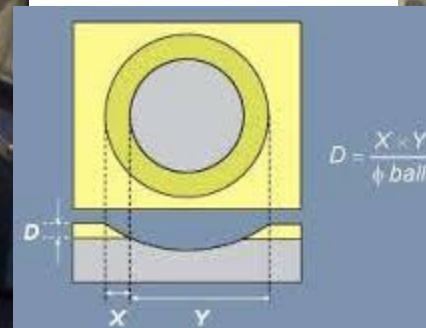
Abrasão

Fadiga de
superfície

Tipos de desgaste

• *Abrasão a baixa tensão*

- Ensaio ASTM G 65 (roda de borracha com areia) -> desgaste a três corpos
 - Mede-se a perda de massa
- Calowear – desgaste micro-abrasivo
 - Mede-se o volume da cratera



Desgaste

Adesão

Abrasão

Fadiga de superfície

Tese C.J. Scheuer

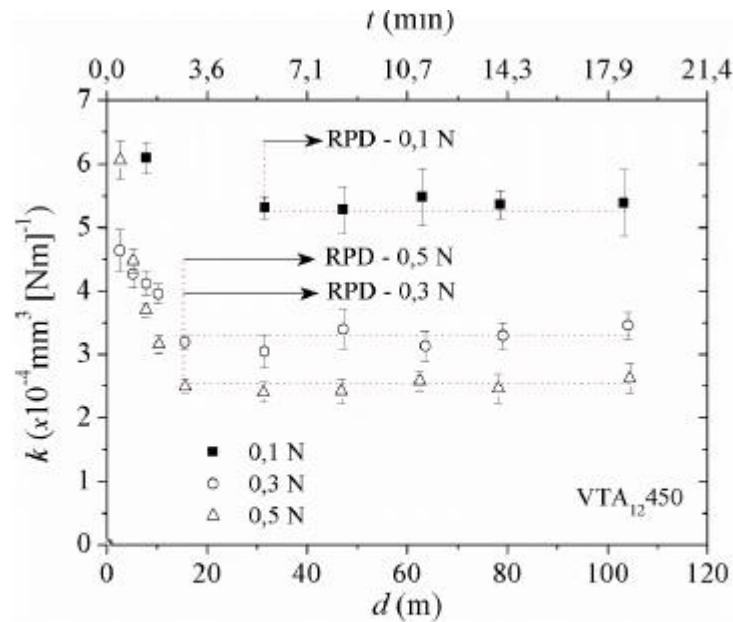


Figura 149. Evolução do coeficiente de desgaste em função da distância de rolamento. Amostra cementada a 450 °C por 12 h. Ensaio micro-abrasivo realizado utilizando uma suspensão abrasiva de Al_2O_3 com tamanho 1 μm , esfera de *ALST* 52100 com diâmetro de 25,4 mm, apoiado sobre eixo rotacionando a 120 rpm.

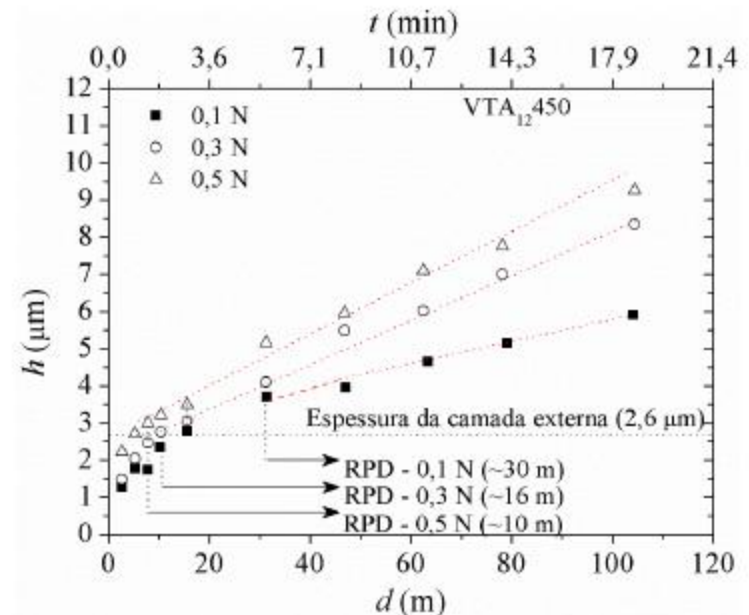


Figura 150. Variação da profundidade da cratera de desgaste em função da distância de rolamento. Amostra cementada a 450 °C por 12 h. Ensaio micro-abrasivo realizado utilizando uma suspensão abrasiva com tamanho 1 μm , esfera de *ALST* 52100 com diâmetro de 25,4 mm, apoiado sobre eixo rotacionando a 120 rpm.



Tese C.J. Scheuer

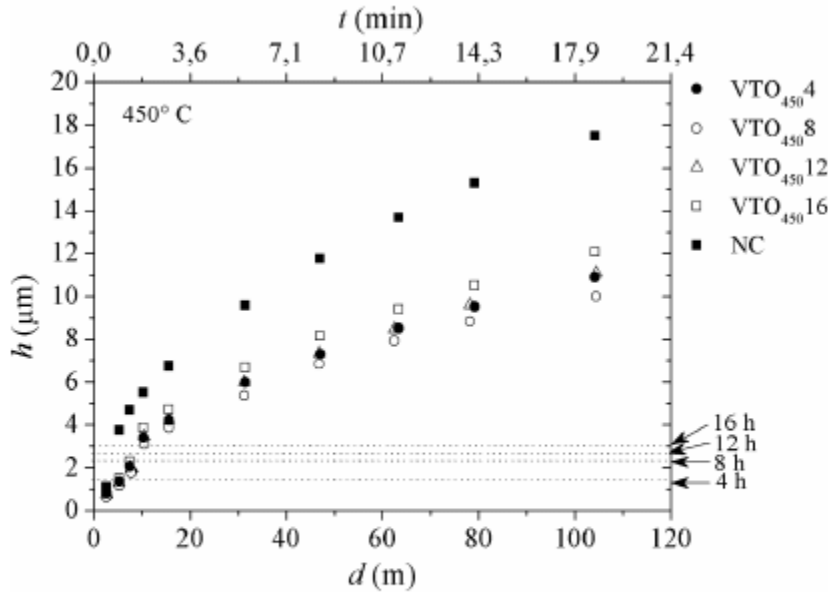


Figura 145. Profundidade da cratera de desgaste em função da distância de rolamento para as amostras não tratada e cementadas a 450° C por 4, 8, 12, e 16 h. Ensaio micro-abrasivo realizado usando uma suspensão de Al_2O_3 com tamanho 1 μm como abrasivo, esfera de *AlSi* 52100 com diâmetro de 25,4 mm, apoiado sobre eixo rotacionando a 80 rpm, aplicando-se carga de 0,5 N.

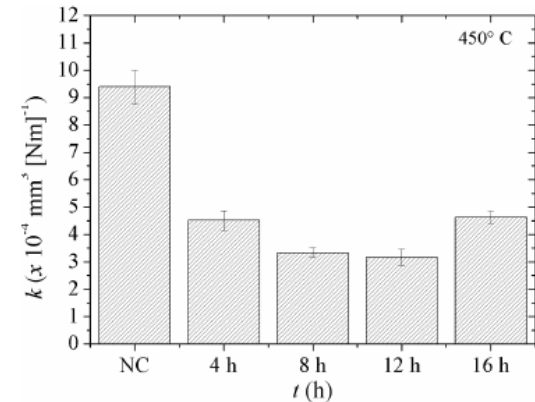
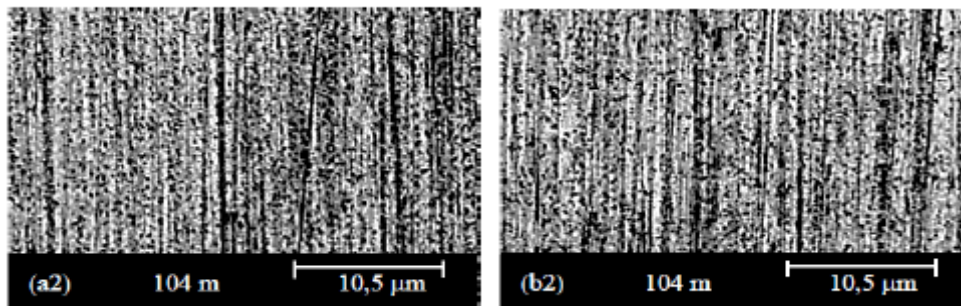


Figura 146. Variação da taxa e coeficiente de desgaste em função da distância de rolamento para as amostras não tratada e cementadas a 450° C por 4, 8, 12, e 16 h. Ensaio micro-abrasivo realizado usando uma suspensão de Al_2O_3 com tamanho 1 μm como abrasivo, esfera de *AlSi* 52100 com diâmetro de 25,4 mm, apoiado sobre eixo rotacionando a 80 rpm, aplicando-se carga de 0,5 N.

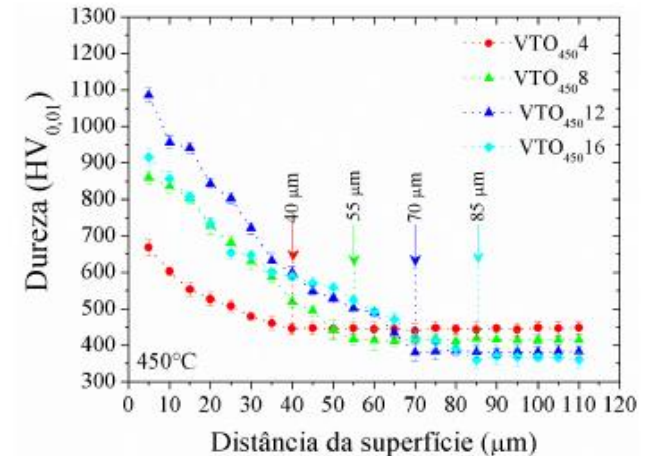


Figura 131. Perfil de dureza na escala Wickers das amostras do aço *AlSi* 420 cementadas por plasma na temperatura de 450 C durante 4, 8, 12 e 16 h. Tratamentos realizados empregando-se uma mistura gasosa composta por 99,5% (80% H_2 +20% Ar)+0,5% CH_4 , a um fluxo de $1,67 \times 10^{-6} \text{ Nm}^2 \text{ s}^{-1}$, e pressão de 400 Pa.

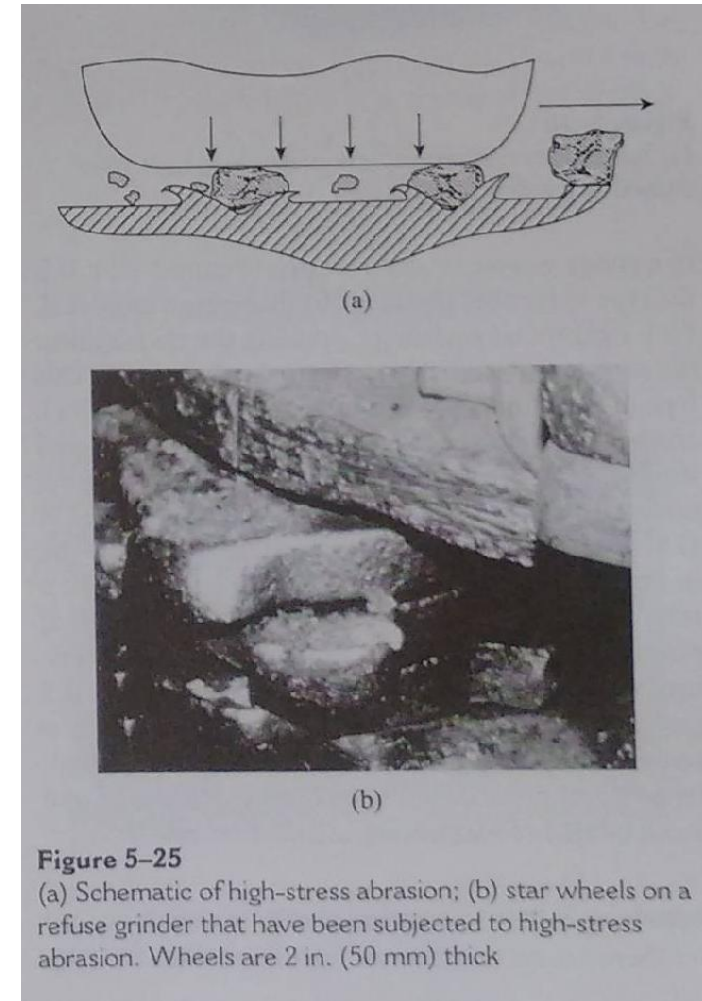
Desgaste

Adesão

AbrasãoFadiga de
superfície

Tipos de desgaste

- *Abrasão a alta tensão*
 - Modo mais severo de abrasão onde o esforço aplicado é suficiente para deformar ou fraturar o abrasivo
 - Ex. retifica, onde os grãos do rebolo são fraturados, equipamentos de movimentação de terra (mineração agricultura terraplanagem)
 - Ensaio de laboratório utiliza um metal macio, ex. Cu, incrustado com partículas abrasivas



Desgaste

Adesão

AbrasãoFadiga de
superfície

Tipos de desgaste

- *Abrasão gouging*

- Caracterizado por deformação plástica macroscópica proveniente de um impacto simples
- Ocorre em britadores de grande equipamentos de mineração/remoção de terra
- Ensaio ASTM G 81 -> mede-se perda de massa após teste

Grande importância econômica pois está na mineração e obras de infraestrutura

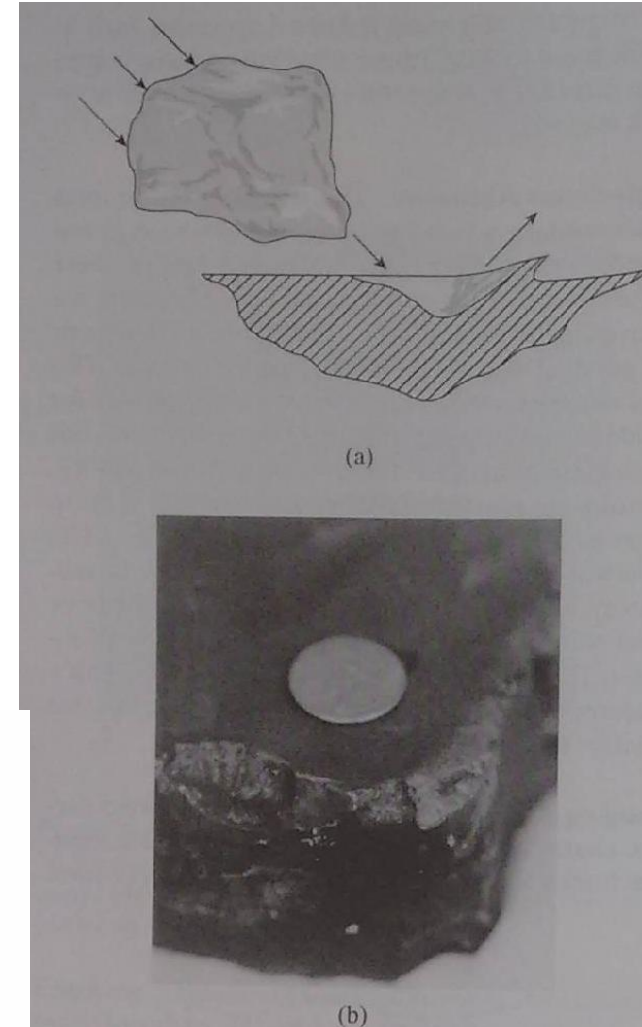
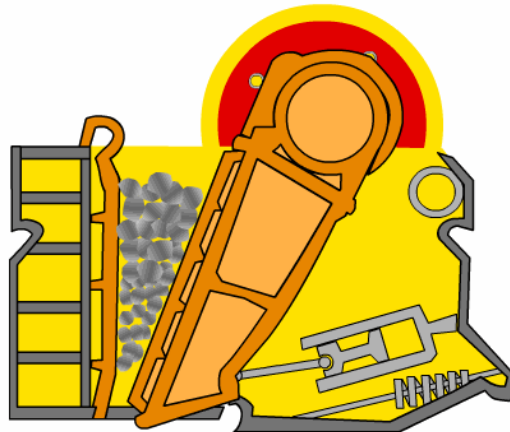


Figure 5–26

(a) Schematic of gouging abrasion; (b) gouging damage caused by grinding of rocks



Tipos de desgaste

- *Polimento*

- Produzido por abrasivos finos “sem produzir riscos ou sulcos”
- Ex. polimento de metais em geral usando alumina ou diamante
- Não risca superfície, mas sim retira os riscos.
- Mecanismo: Remoção de óxidos pelo abrasivo e oxidação pelo fluido de polimento (ex. Ti pode usar H_2O_2)

Desgaste

Adesão

Abrasão

Fadiga de
superfície

Fadiga de superfícies

- *Pitting*

- Uma das formas mais comuns de fadiga de superfícies -> formação de cavidade pelo lascamento da tribosuperfície
- Trinca iniciam na subsuperfície e se propagam até “ejeção” de um fragmento
- Após formação do primeiro *pitting* o processo continua e é acelerado
- Ex. rolamentos e trilhos

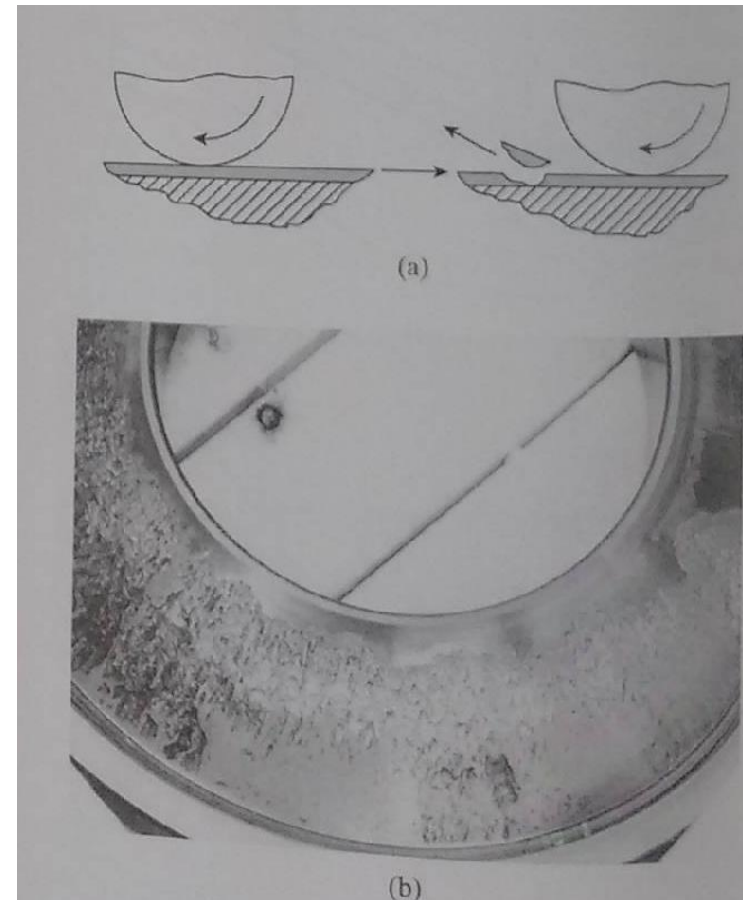


Figure 5-27

(a) Schematic of pitting due to surface fatigue; (b) pitting of a large roller thrust bearing race due to surface fatigue

Desgaste

Adesão

Abrasão

Fadiga de
superfície

Fadiga de superfícies

- Desgaste por impacto
 - Superfícies submetidas a impactos repetitivos
 - Ex. Formão, martelos...
 - Mecanismo: deformação , formação de trincas e lascamento

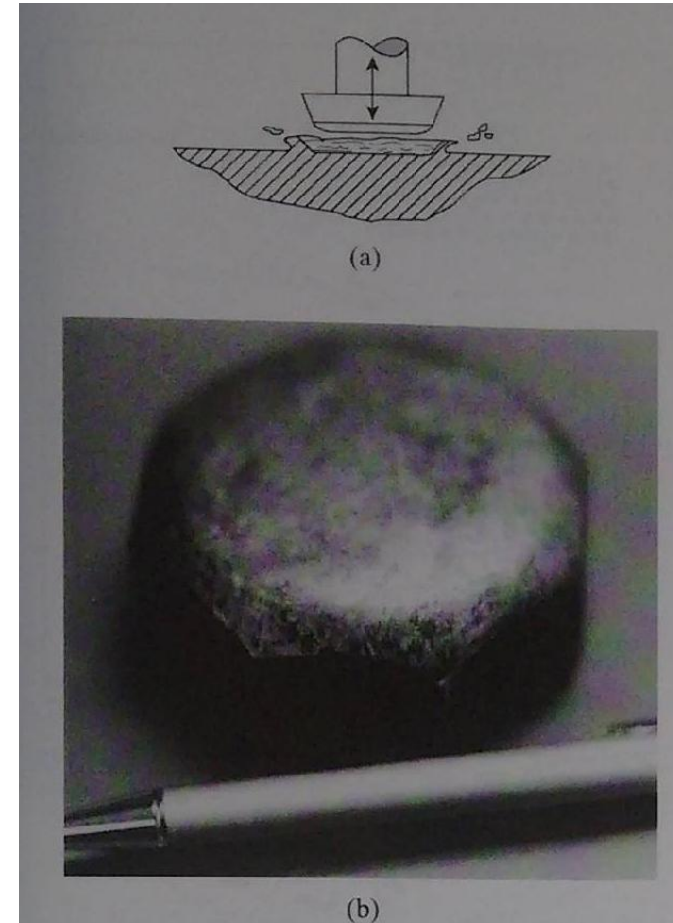


Figure 5-28

(a) Schematic of impact wear; (b) impact wear on the striking face of a battering tool

Desgaste

Adesão

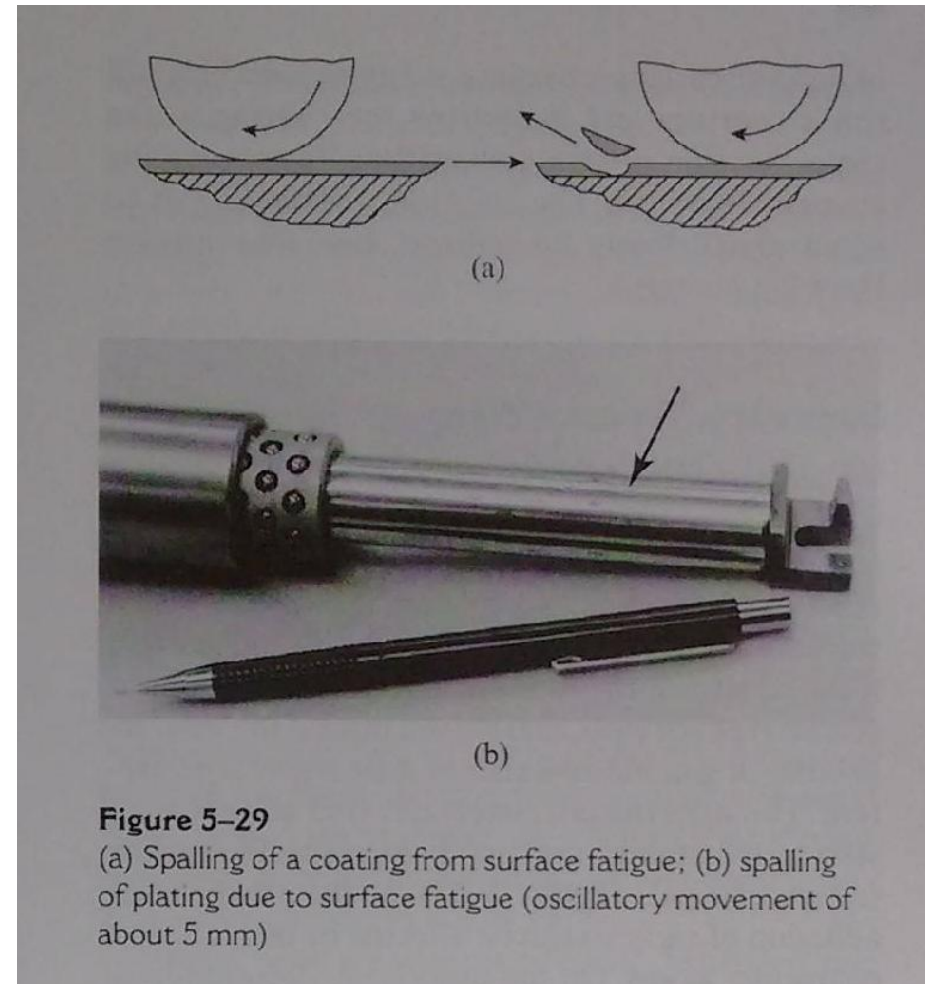
Abrasão

Fadiga de
superfície

Fadiga de superfícies

- Desplacamento

- Similar a *pitting* em superfícies recobertas
- Camada dura em substrato mole
- Tensões de Hertz
- Ex. de solução -> multicamada ou camada com variação contínua de propriedades, em especial dureza

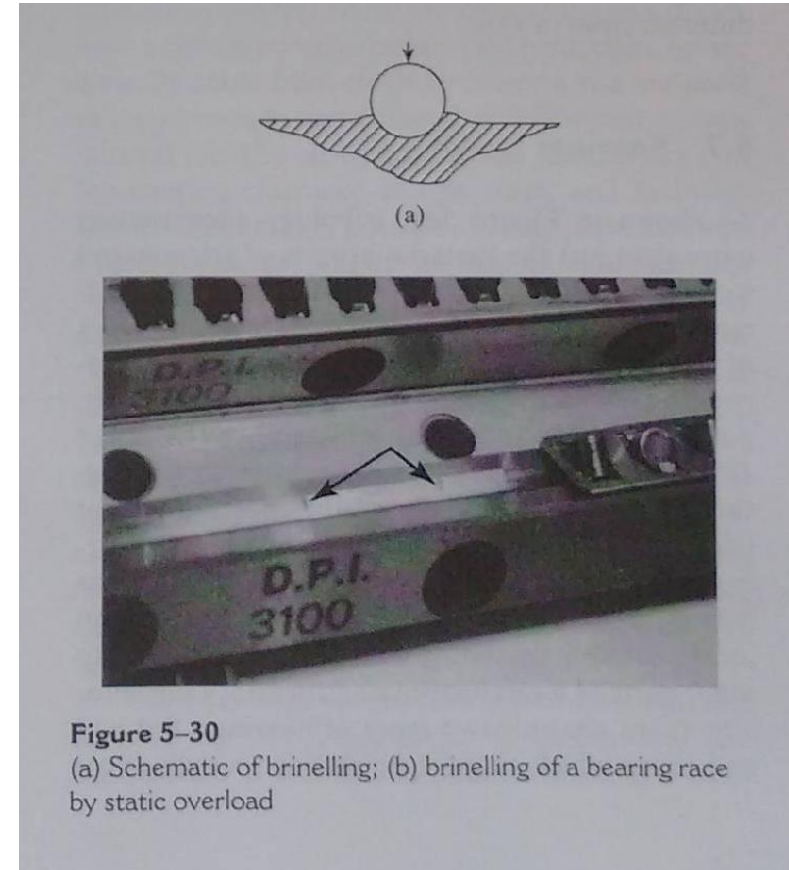




Fadiga de superfícies

- Brinelling

- Não é uma forma de desgaste com perda de material, mas sim a indentação da superfície por esferas ou rolos -> excesso de carga
- Pode causar *pitting* e deslocamento

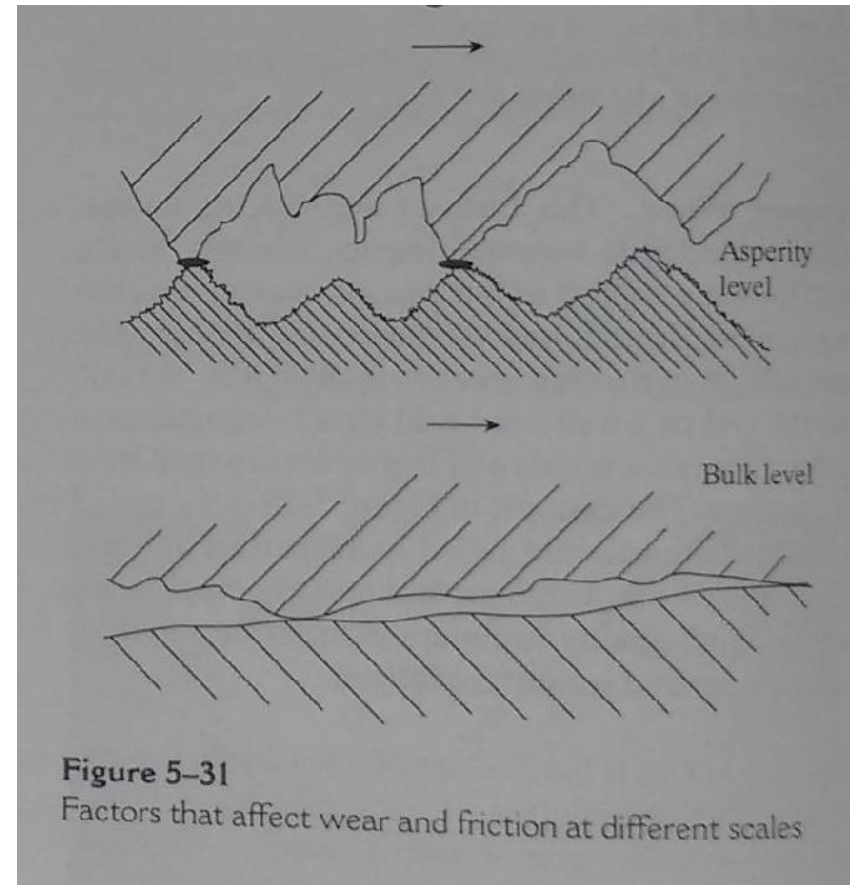
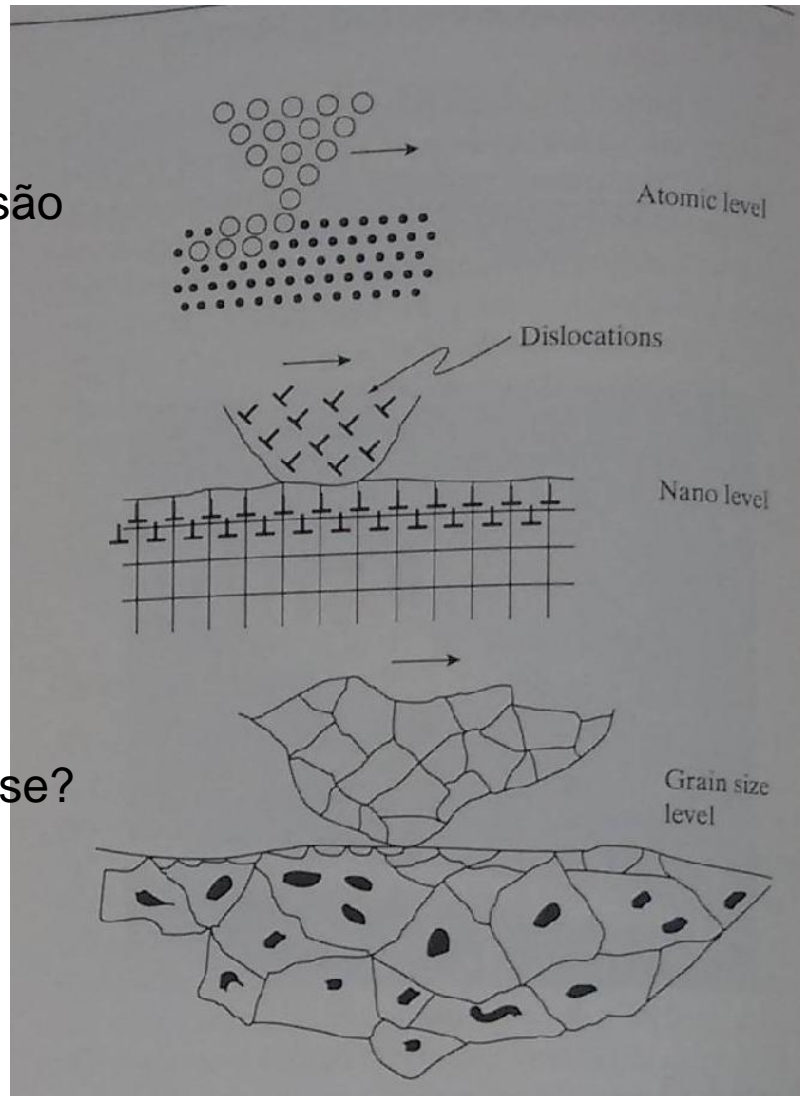


Resumo sobre tipos de desgaste

- Cada tipo de desgaste tem exigências diferentes
- Nenhum material está imune ao desgaste
- O controle do desgaste envolve características deste o nível atômico até sua topografia (engenharia de superfície)

Resumo sobre tipos de desgaste

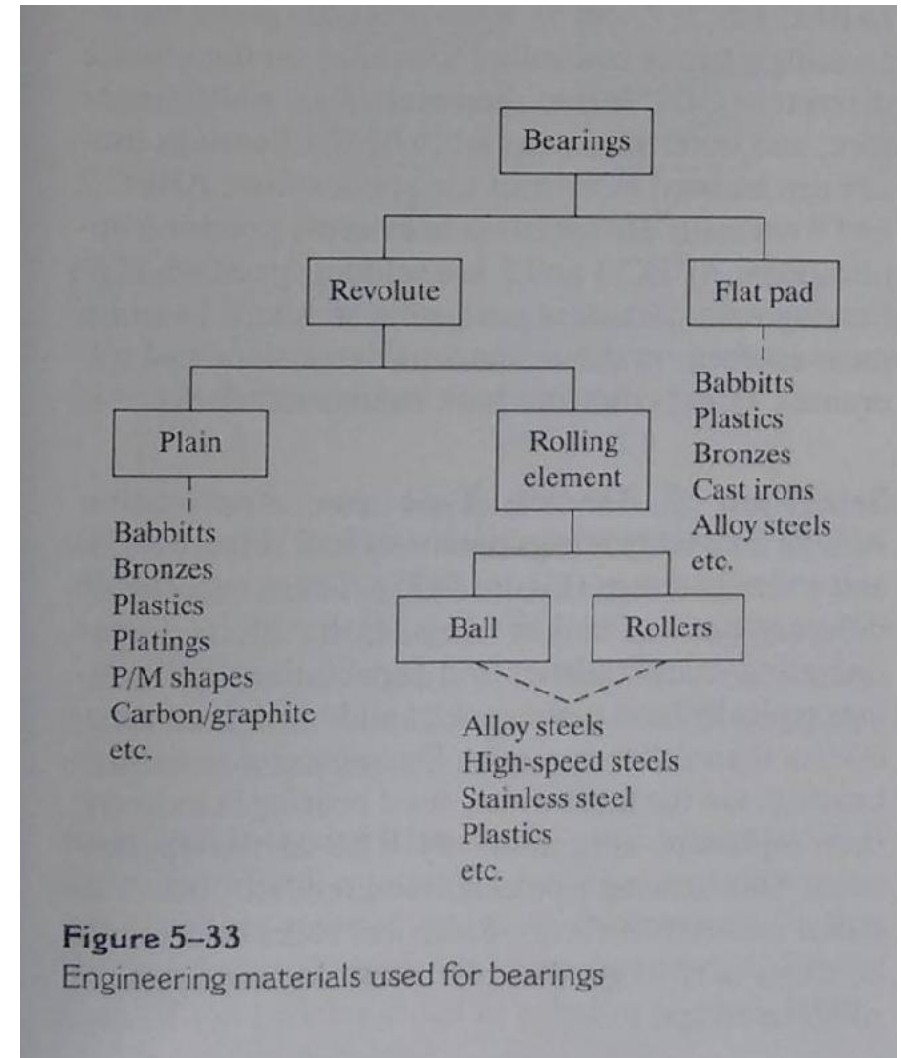
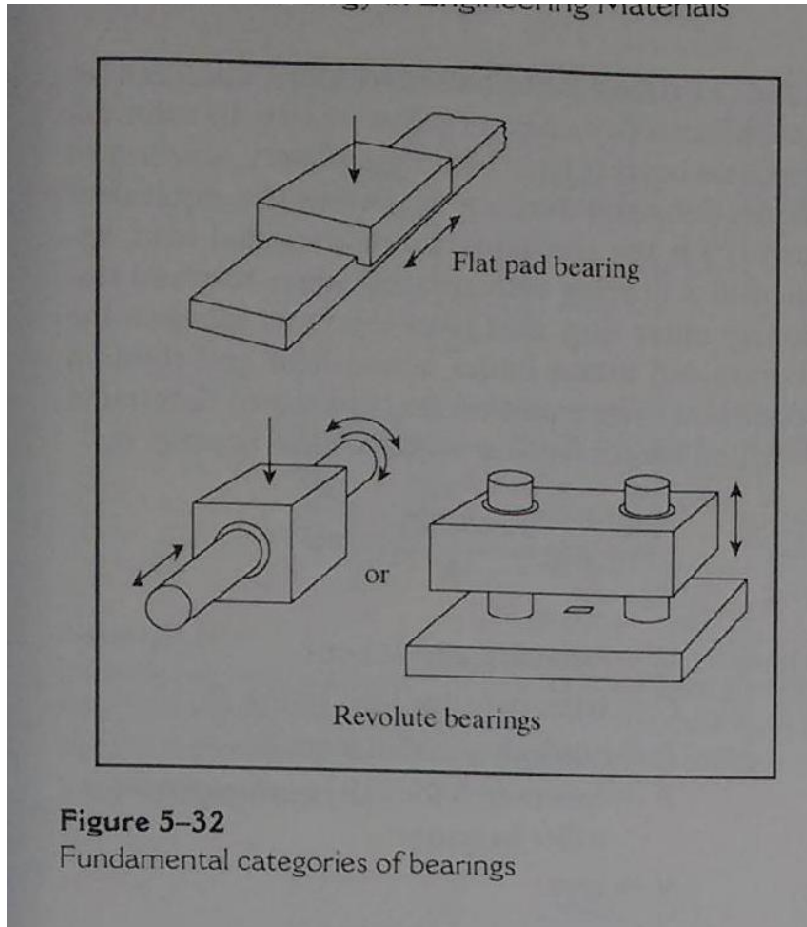
Adesão



Mancais

- Como visto na introdução a tribologia vai além dos aspectos de atrito e desgaste, envolvendo também lubrificação
- Mancais estão entre as tecnologias mais importantes tratadas pela tribologia e por isso serão brevemente discutidos
 - Mancais são dispositivos que suportam carga em elementos rotativos ou deslizantes
 - Tipos: cilíndricos e planos
- Frequentemente mancais impõem limites a projetos
- Parcialmente ligado à eng. de superfícies

Mancais



Mancais de deslizamento

- Apresentam contato conforme entre superfícies (superfícies com a mesma geometria) -> oposto aos mancais de rolamento (“3-corpos”)
- Normalmente operam sob lubrificação hidrodinâmica e o desgaste só ocorre no início e fim de operação (exceto lubrificação forçada - hidrostática)
 - Outros ex. mancal auto lubrificante (PM tipicamente bronze ou aço), plástico (com ou sem lubrificante sólido)

Mancais de deslizamento

- Mancais de deslizamento costumam ser a solução mais barata.
- Se comparado a rolamentos:

Cost	Lower than rolling element
Precision	Not as good; require a running clearance
Friction	Not as low, rolling friction is usually lower than sliding friction
Speed	Limited to lower speed than rolling element
Load capacity	Can be better than rolling element (large contact area)



Mancais de rolamento

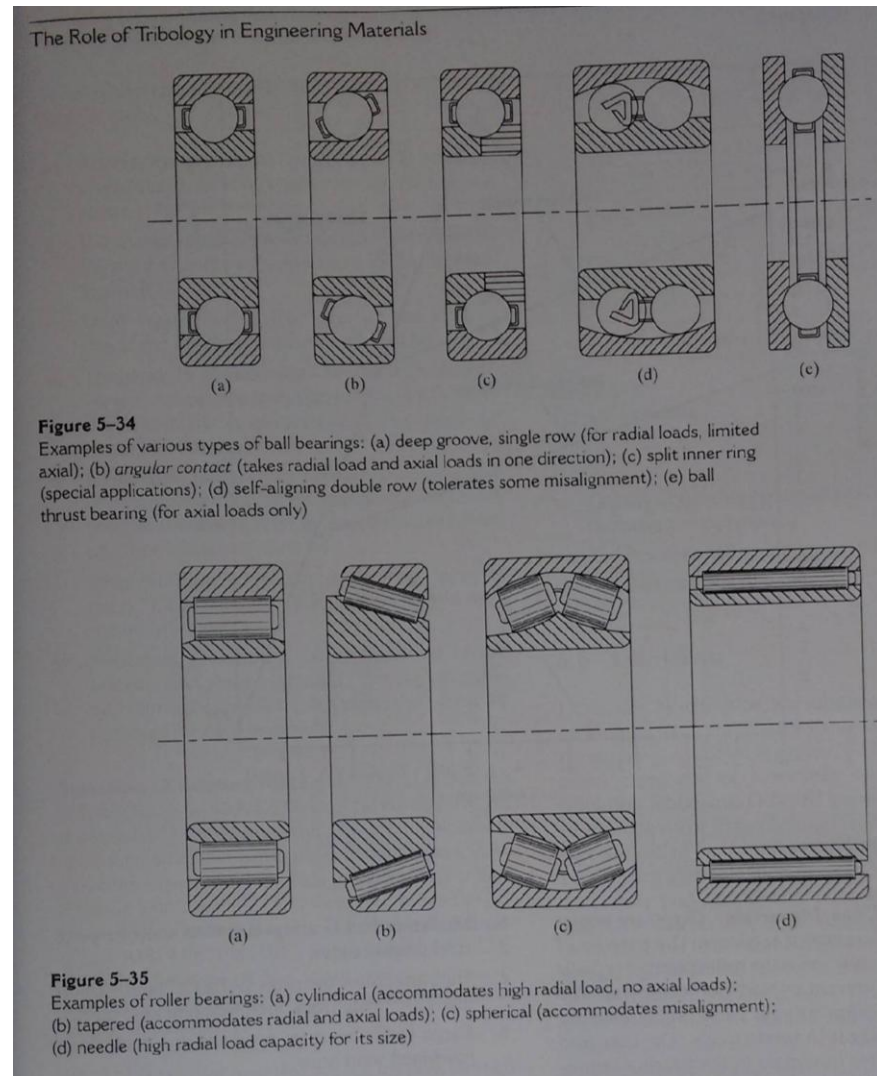
- Usados em máquinas que devem operar por longo tempo
 - Tempo de Vida
 - Se bem montado, lubrificado, mantido -> deve falhar por fadiga -> número de revoluções
 - Seleção (fora do escopo desta disciplina)
 - Precisão
 - Tipo
 - Folga interna
 - Gaiola
 - Pistas



Mancais rolamento

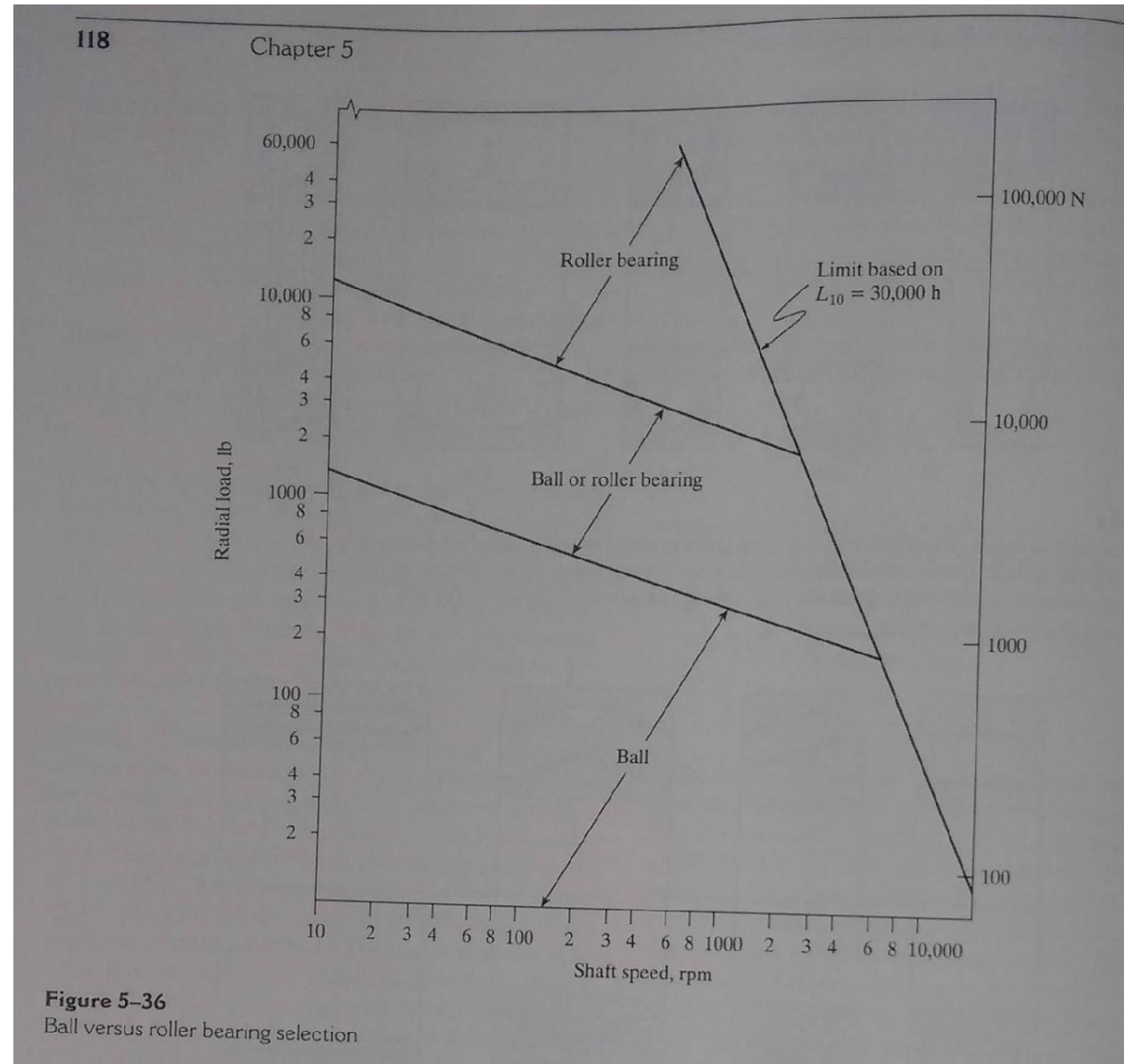
- Tipos (+ de 40)
 - De Esperas
 - De Rolos

- Pode ter tratamento de superfícies



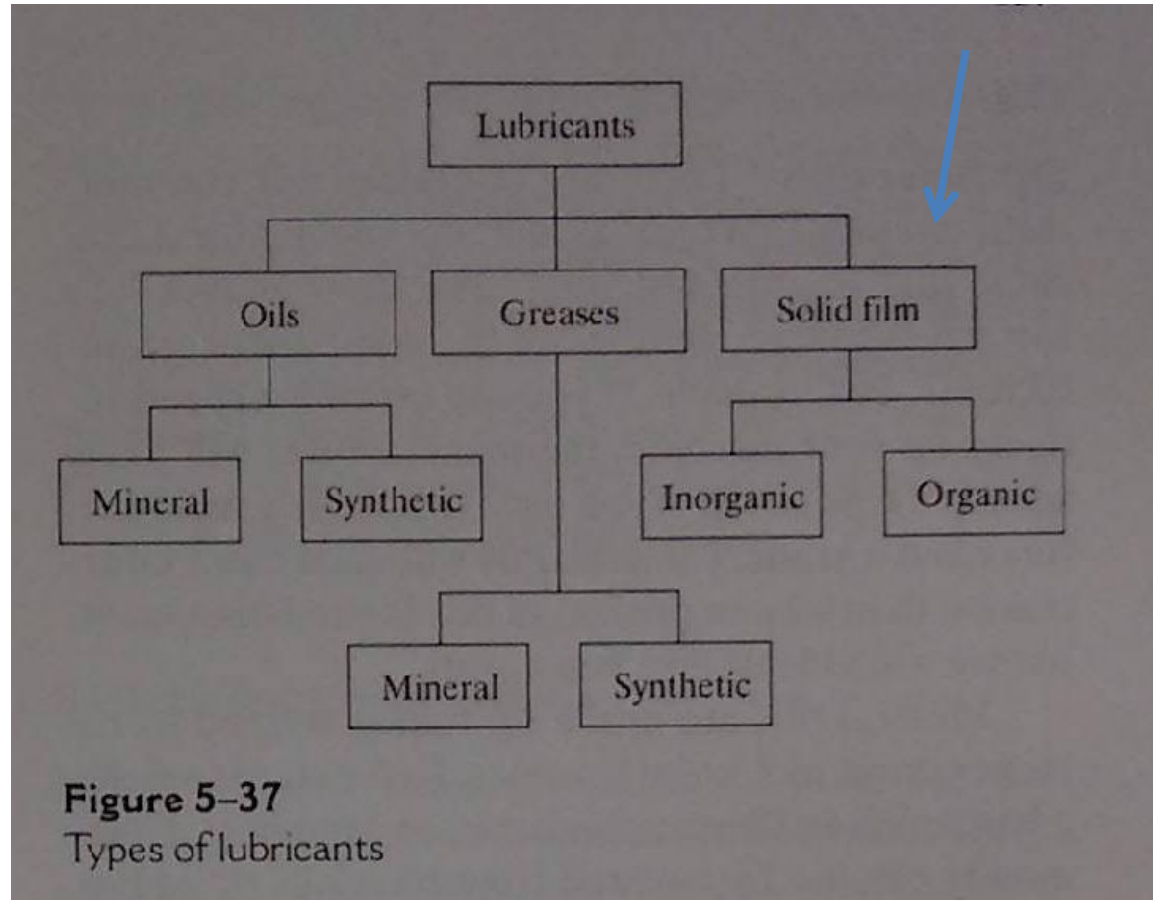
Mancais rolamento

- Tipos
 - Guia para seleção



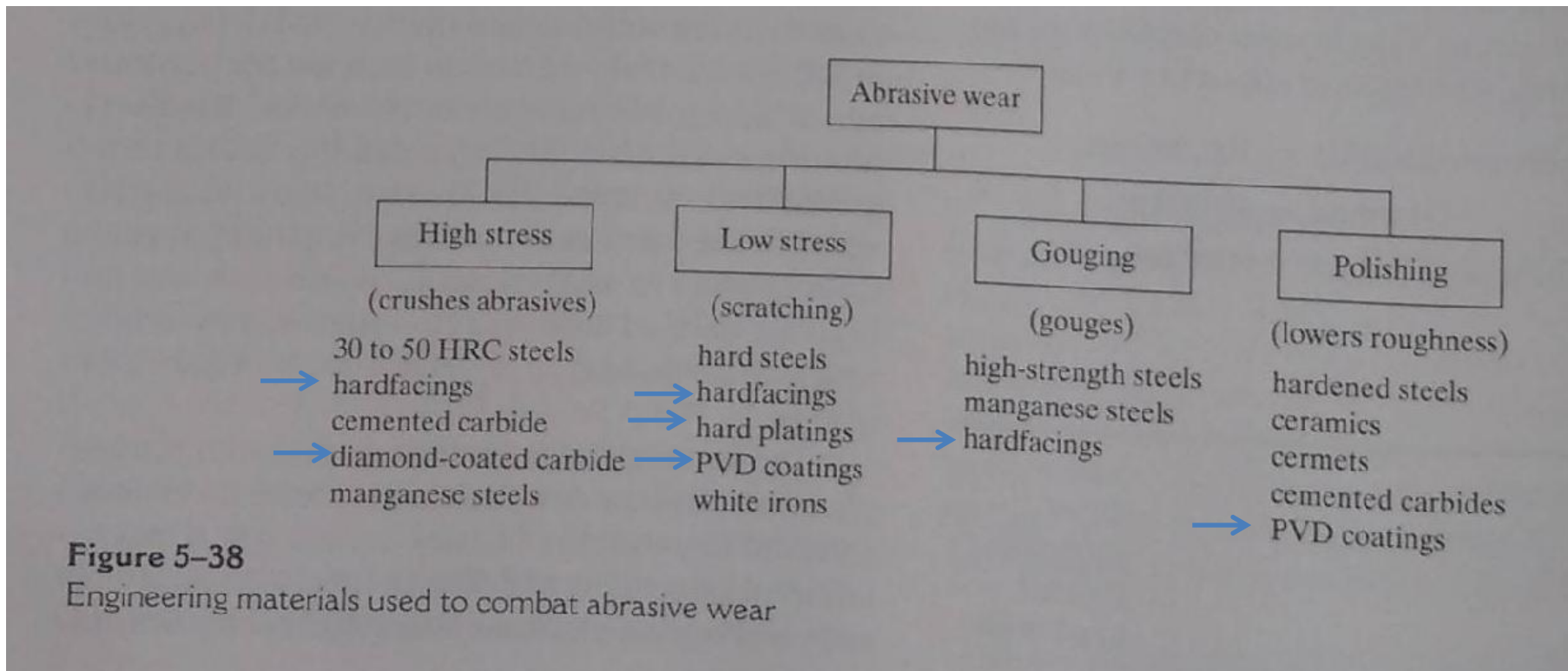
Lubrificantes

- Substancia que separam superfícies em movimento.
- 3 Classes principais
- Fora do escopo da disciplina



Materiais para tribo-sistemas

- Ex. de materiais usados para desgaste abrasivo



Materiais para tribo-sistemas

- Ex. de materiais usados para desgaste não abrasivo

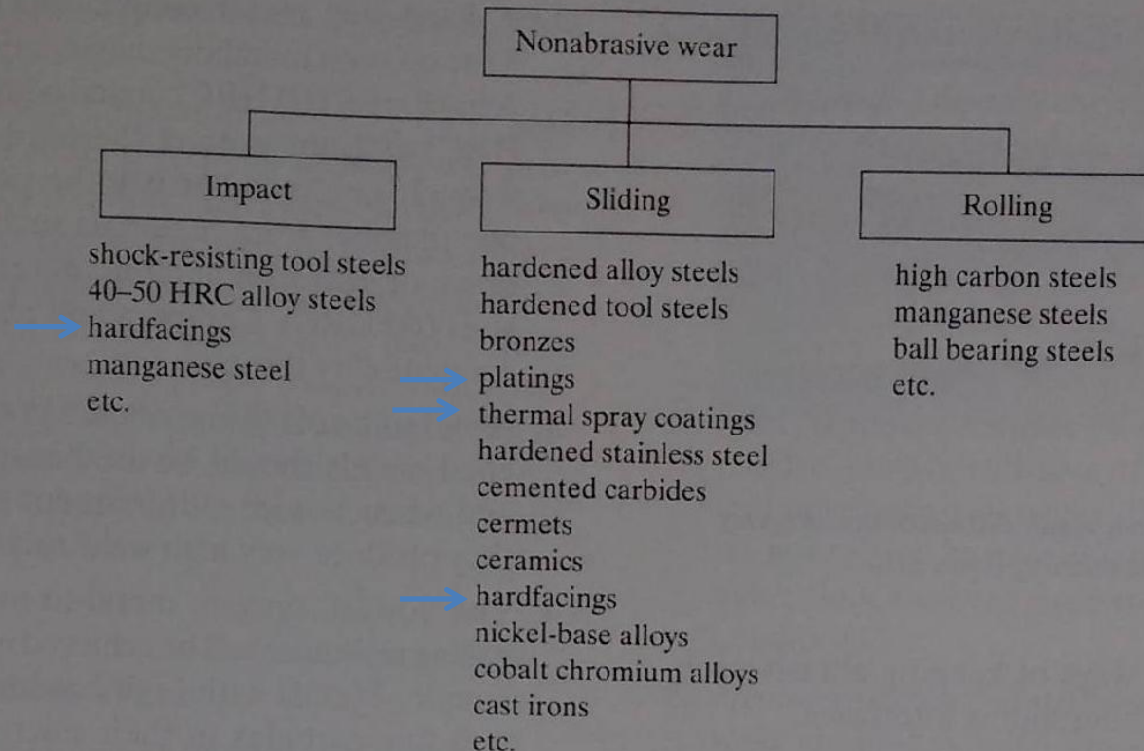


Figure 5-39

Engineering materials used for nonabrasive wear situations

Materiais para tribo-sistemas

- Ex. de aplicações

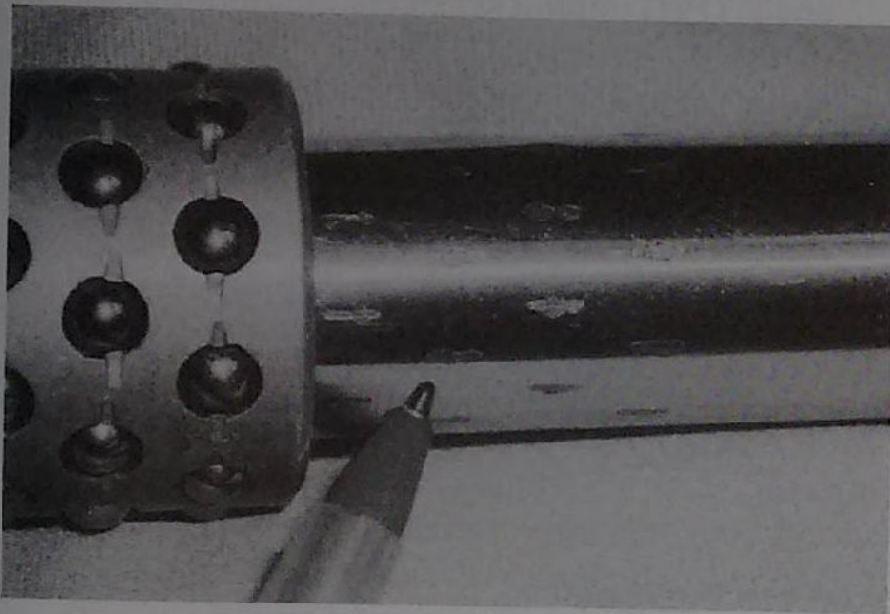


Figure 5-40

Spalling of chromium plate on a hardened steel guidepost, produced by surface fatigue from reciprocating ball contact

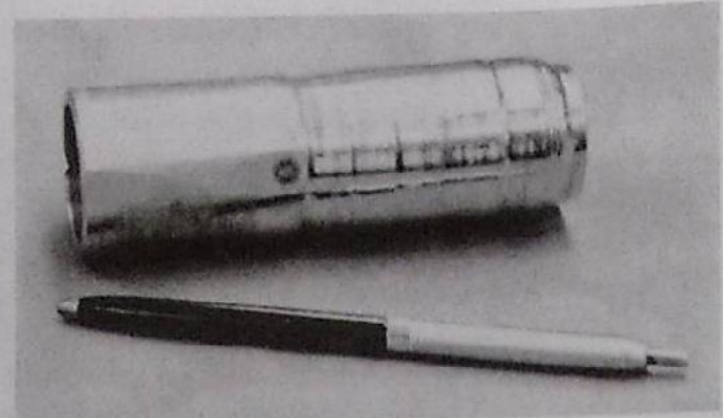


Figure 5-41

Part failure due to abrasive wear. Asbestos packing ran against this stainless steel bushing (type 316).

Evitando falhas por desgaste

- Não é possível eliminar desgaste quando superfícies sólidas estão em contato e em movimento relativo
- Alguns fatores podem ser levados em conta para minimizar o desgaste e trazê-lo para limites toleráveis -> mas isso depende do modo de desgaste

Evitando falhas por desgaste

- Abrasão a baixa tensão
 - Eliminar o abrasivo
 - Proteger dos abrasivos (“*shield*”)
 - Tornar superfície mais dura que o abrasivo (troca de material, tratamento, deposição)
 - Reduzir a carga

Evitando falhas por desgaste

- Desgaste Metal-Metal
 - Lubrificar (óleo ou autolubrificante)
 - Dar preferência a pares “duro-duro”
 - Evitar pares “mole-mole”

Evitando falhas por desgaste

- Fadiga de superfícies
 - Usar materiais de elevada dureza e resistência à compressão
 - Tratamentos e deposição de baixa espessura tentem a deslocar (tensões de Hertz)
 - Selecionar lubrificante cuidadosamente -> lubrificantes sólidos e óleos com aditivo podem piorar a fadiga (elevada pressão localizada)
 - Evitar abrasivos

Evitando falhas por desgaste

- Desgastes por deslizamento em não metálicos
 - Evitar compósitos poliméricos com vidro e minerais -> abrasivos
 - Lubrificar se possível (ver compatibilidade)
 - Prestar atenção aos limites de carga e velocidade
 - Em geral cerâmicas causa forte desgaste em metais

Evitando falhas por desgaste

- Desgaste corrosivo / erosão
 - Cavitação:
 - Materiais de elevada resistência mecânica e a corrosão
 - Erosão por líquido:
 - Manter a velocidade do fluido abaixo do limite para o metal utilizado (limite para perda da camada passiva)
 - Se possível usar polímeros ou cerâmicas que não sofrem deste problema
 - *Fretting*:
 - Prevenir o movimento de *fretting*
 - Se não for possível, separa superfícies (lubrificação ou deposição de filme de metal macio)

Evitando falhas por desgaste

- Erosão por partículas sólidas
 - Evitar ângulos desfavoráveis
 - $\sim 20^\circ$ para materiais moles e 90° para materiais frágeis
 - Usar elastômeros se possível
 - Cermets para erosão por areia
 - Usualmente partes substituíveis de aços de elevada resistência são a solução mais barata

Importante lembrar

- Linhas gerais:
 - Maior carga e velocidade tende a aumentar o desgaste
 - Projeto de tribosistemas ainda depende de testes empíricos (seguir normas de ensaios)
 - Atrito e desgaste são dependentes do sistema e não **somente** das propriedades dos materiais
 - Para projetos envolvendo desgaste, se preocupar com o modo de desgaste
 - Usar lubrificantes sempre que possível

Case History

SURFACE TREATMENT SOLVES TRIBOLOGY PROBLEM ON TUBING CONNECTORS

A manufacturer of stainless steel and corrosion-resistant alloy tubing connectors was troubled by customer complaints about leaking fittings. Tubes to be joined are slipped into the connector. A nut on each side is turned one-and-one-quarter turns, and this action forces a stainless steel ferrule to indent into the tube (like a collet) and lock the tube in place. Most customer returns were due to improper tube insertion (not enough) and insufficient tightening.

A project was conducted to investigate low-temperature diffusion hardening of the ferrule as a way to reduce galling tendencies as the ferrule is squeezed by the stainless steel nut. The treatment produced a hardened layer about 25 μm deep and with a hardness increase from about 200 HV to 1000 HV.

The hard surface reduced the galling and friction such that it was much easier to get the one-and-one-quarter turns, and the hardened ferrule bit fit into the tube better, and preventing vibration leaks. Customer returns essentially ceased. A tribology material innovation greatly improved a product.

