

# TMEC034

## Seleção de Materiais

Seleção de materiais atendendo a  
requisitos da superfície:  
Resistência ao Desgaste

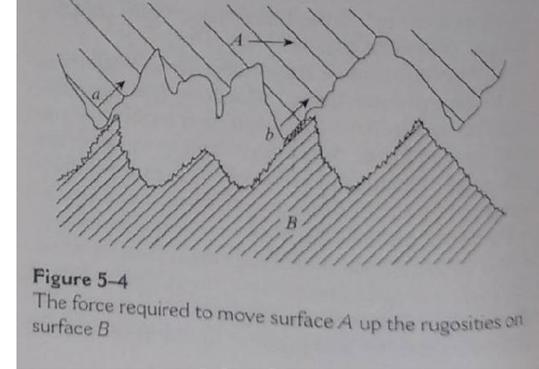
*Prof. Rodrigo Perito Cardoso*



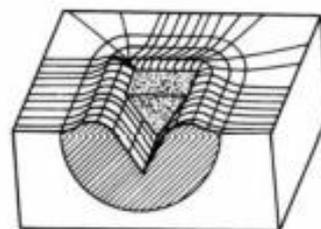
Favor desligar o celular ou passá-lo para o modo silencioso

Em caso de ligação favor não atender durante a aula

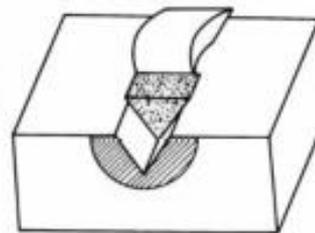
# Introdução



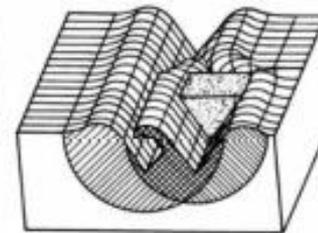
- Associada a movimento relativo entre superfícies (corpos e/ou partículas – relacionado ao atrito)
- Como resultado de forças interfaciais pode ocorrer:
  - Deslocamento de material na superfície com mudança de forma e dimensões
  - Remoção de material formando resíduos -> pode ser medido pela variação de massa
  - Normalmente ocorre a combinação dos dois mecanismos anterior



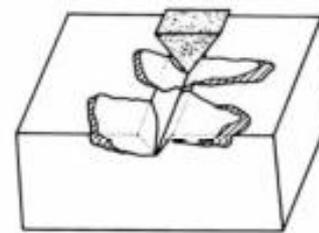
Microsulcamento



Microcorte



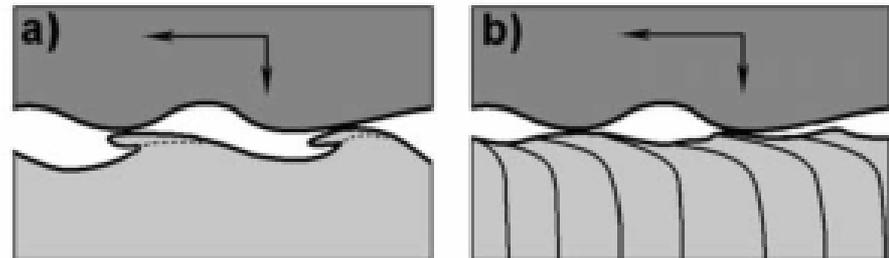
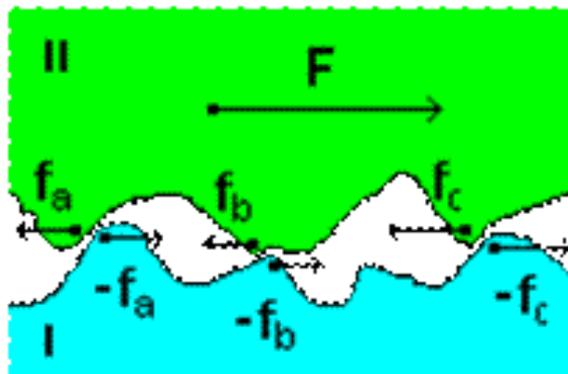
Microfadiga



Microlascamento

# Introdução

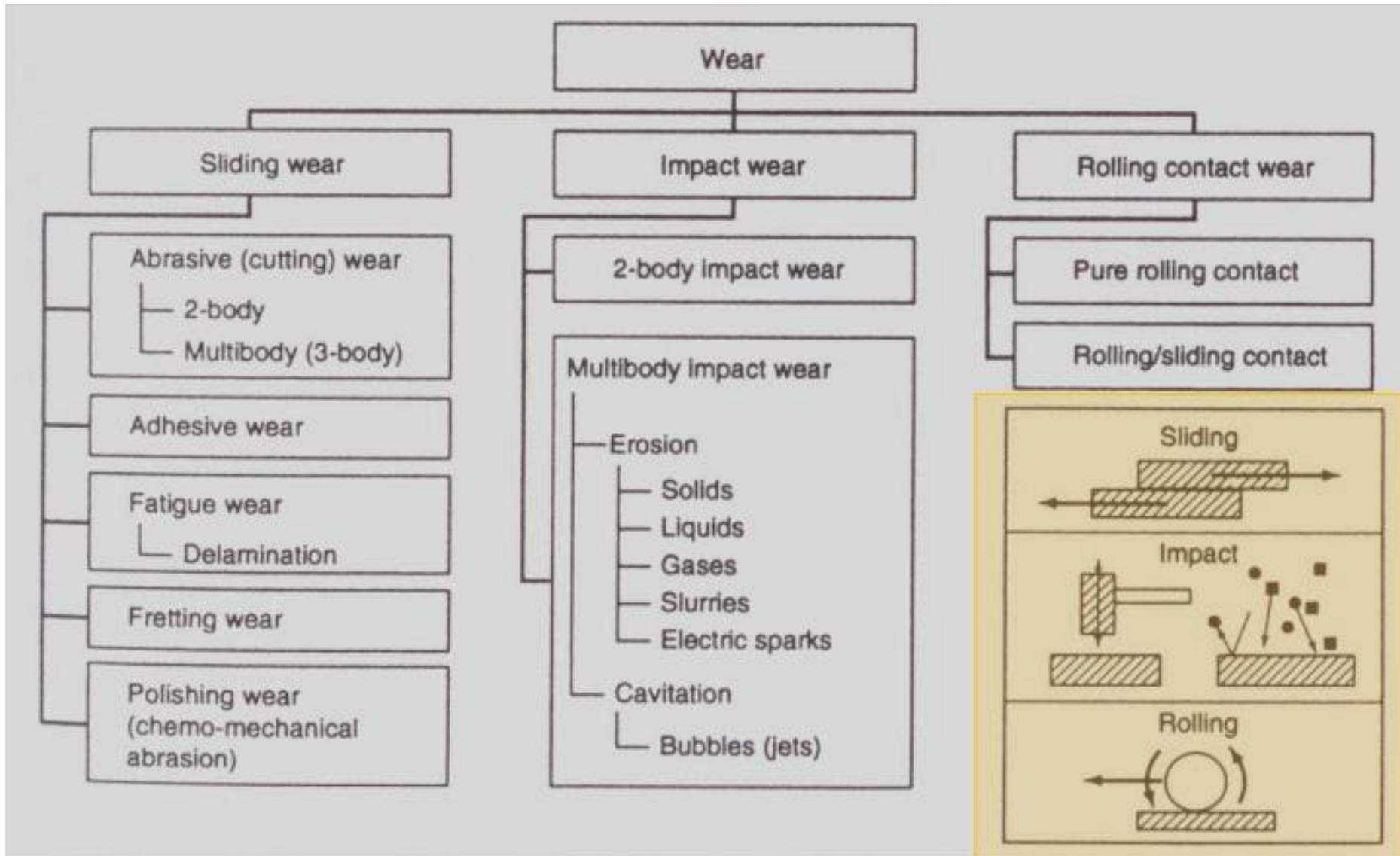
- Superfícies reais em engenharia não são planas:
  - Microscopicamente apresentam asperidades e depressões  
-> arranjadas de forma ordenada ou aleatória dependendo da técnica de fabricação
  - Quanto melhor o acabamento menor será a rugosidade
- Ao colocar-se duas superfícies em contato somente uma fração da área estará em contato



# Introdução

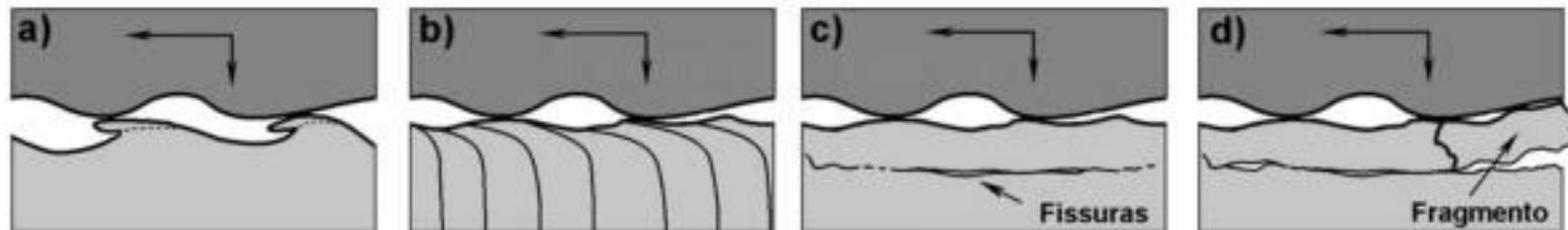
- O comportamento será ditado pelas propriedades dos materiais e da carga aplicada -> Comportamento **depende do par tribológico** (coeficiente de fricção e desgaste não são propriedades do material)
- Forças de fricção aparecem se a força de deslizamento for suficiente para “romper” as ligações formadas nos pontos de contato
- A lubrificação busca evitar o contato entre as superfícies pela presença de um filme lubrificante, minimizando o número de pontos de contato e reduzir a energia de ligação dos pontos de contato que existirem

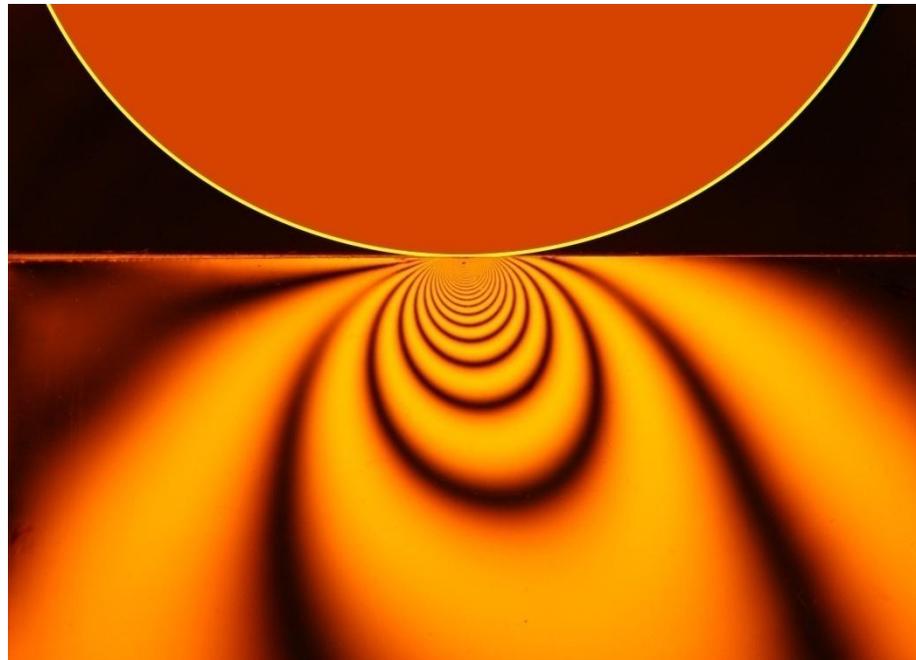
# Mecanismos de desgaste



# Mecanismos de desgaste

- A forma dos resíduos podem trazer informação sobre os mecanismos de desgaste
- Máxima tensão encontra-se sob a superfície e trinca nucleiam neste ponto causando delaminação (trinca nucleia normalmente em partículas de segunda fase)





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

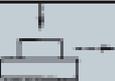
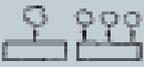
# Mecanismos de desgaste

- Fadiga -> Espera-se partículas arredondadas e partículas aprisionadas ou aglomeração de partículas mais finas
- Fitas, similares a cavacos-> atribuídas a desgaste abrasivo por partículas presas ou asperidades (Mais duras e rígidas que o contra corpo)
  - aço para ferramenta de corte
  - associada a contaminantes não metálicos (inclusões, partículas oxidadas)
- Segunda fase dura (ex. Carbonetos) em matriz “mole” podem agir como asperidade e causar desgaste abrasivo (ex. aços resistentes x ferramenta de corte) – Importância de analisar o par tribológico

# Mecanismos de desgaste

- Desgaste adesivo -> partículas irregulares
  - Asperidades em contato e sob carga + fluxo plástico geram “solda fria” (depende da natureza das superfícies e do grau de oxidação)
    - Para materiais similar a adesão é facilitada e as asperidades deformarão igualmente nos dois corpos
    - O rompimento das ligações pela continuidade do movimento irá gerar fragmentos e o transporte de material entre as superfícies
    - Para minimizar o desgaste adesivo deve-se reduzir a área de contato entre as asperidades (reduzir carga, aumentar tensão limite de escoamento/dureza)

**Table 1:** Subdivision of the wear area, based on the former standard DIN 50320 <sup>1)</sup>

System structure	Tribological cause of wear (Symbols)	Type of wear	Acting mechanisms (singly or combined)			
			Adhesion	Abrasion	Surface destruction	Tribo-chemi- cal reactions
- Solids - Accompanying secondary (complete separation of substances) - Solids	Sliding Rolling Impact 	-	-	-	■	□
- Solids - Solids (solid friction, boundary friction, mixed friction)	Sliding 	Slide abrasion	■	□	□	■
	Rolling 	Rolling wear	□	□	■	□
	Oscillation 	Oscillation wear	■	■	■	■
	Impact 	Impact wear	□	□	■	□
- Solids - Particles		Abrasive Impact wear	-	■	■	□
	Sliding 	Abrasive sliding wear	-	■	-	□

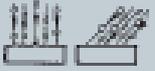
■ Mainly active

□ Sometimes active

<sup>1)</sup> Reproduced by permission of DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

The definitive version for the implementation of this standard is the edition bearing the most recent date of issue, obtainable from Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Germany. Translated by DILLINGER HÜTTE GTS. This translation has not been checked by DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

**Table 1:** Subdivision of the wear area, based on the former standard DIN 50320 <sup>1)</sup>

System structure	Tribological cause of wear (Symbols)	Type of wear	Acting mechanisms (singly or combined)			
			Adhesion	Abrasion	Surface destruction	Tribo-chemi- cal reactions
- Solids - Particles - Liquid	Flowing 	Hydro-abrasive wear	-	■	■	□
- Solids - Particles (gas)	Flowing 	Jet blasting wear	□	■	■	□
	Flowing Impact 	Impact wear Oblique blasting wear	□	■	■	□
- Solids - Liquids	Flowing Oscillating 	Cavitation-erosion	-	-	■	□
	Impact 	Erosion by impingement	-	-	■	□
	Flowing 	Liquid-erosion	-	-	□	■
- Solids - Gas	Flowing 	Gas erosion	-	-	-	■

■ Mainly active

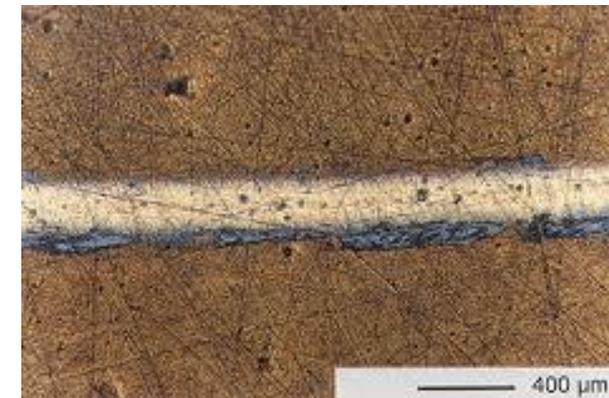
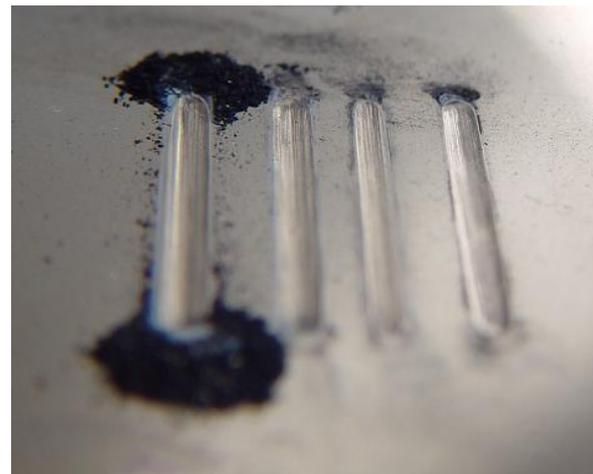
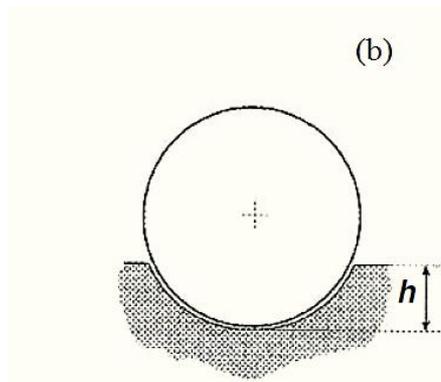
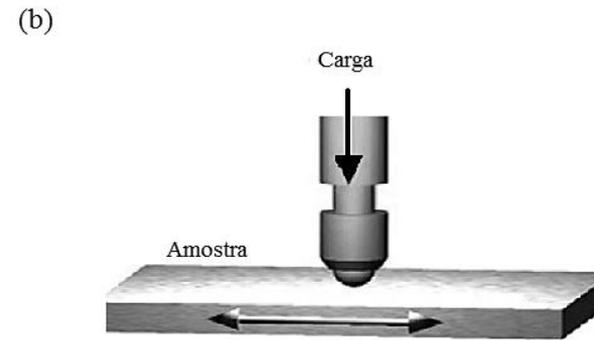
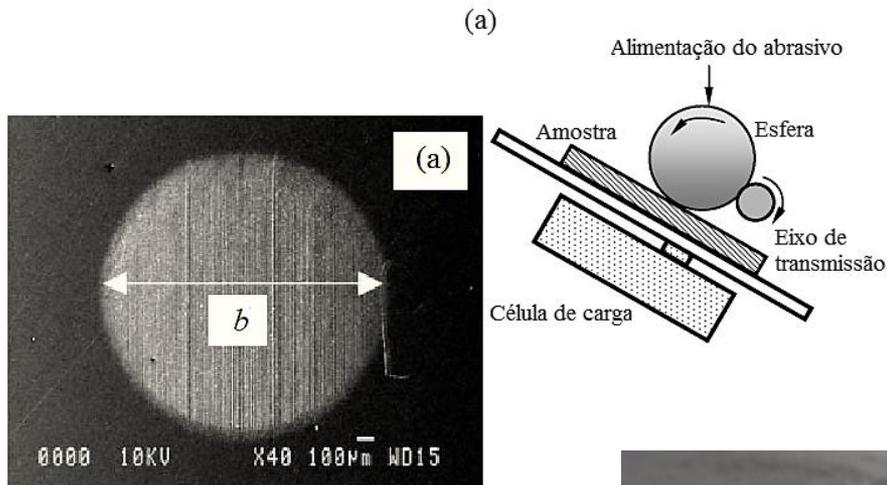
□ Sometimes active

<sup>1)</sup> Reproduced by permission of DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

The definitive version for the implementation of this standard is the edition bearing the most recent date of issue, obtainable from Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Germany. Translated by DILLINGER HÜTTE GTS. This translation has not been checked by DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

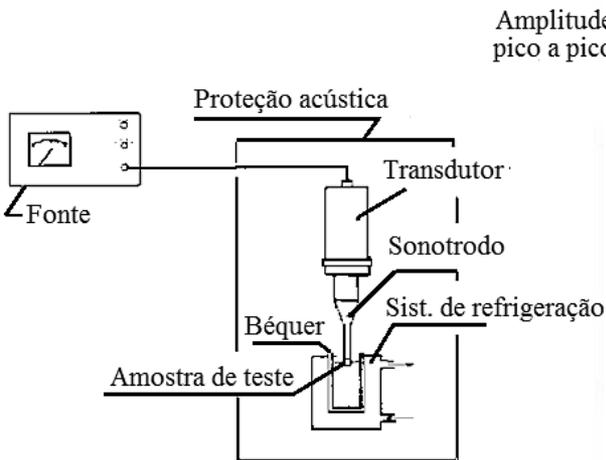
# Ensaio de desgaste

- Deslizamento

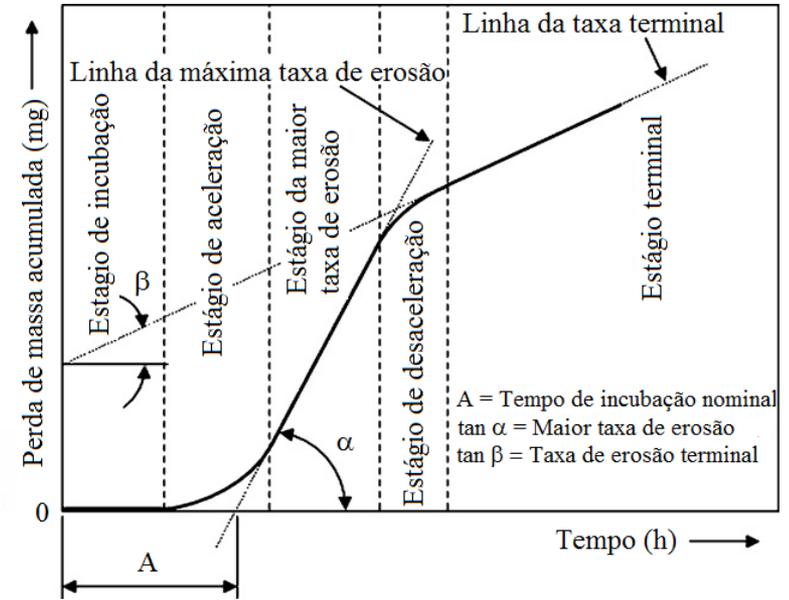
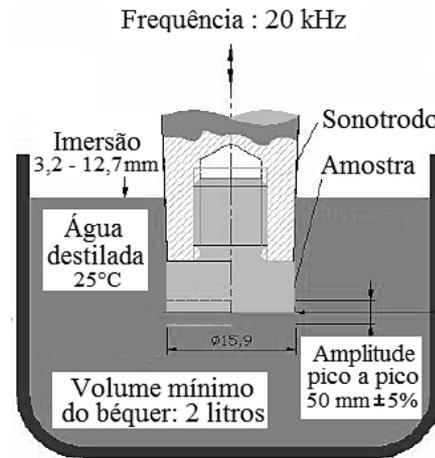


# Ensaio de desgaste

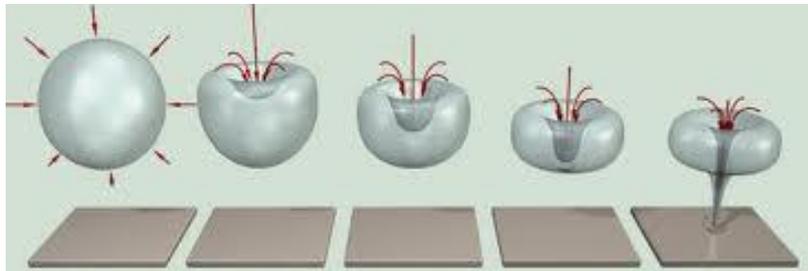
- Cavitação



Amplitude  
pico a pico



Rugosidade  
superficial  
0,8  $\mu$ m r.m.s



# Dados da tese de C.J. Scheuer

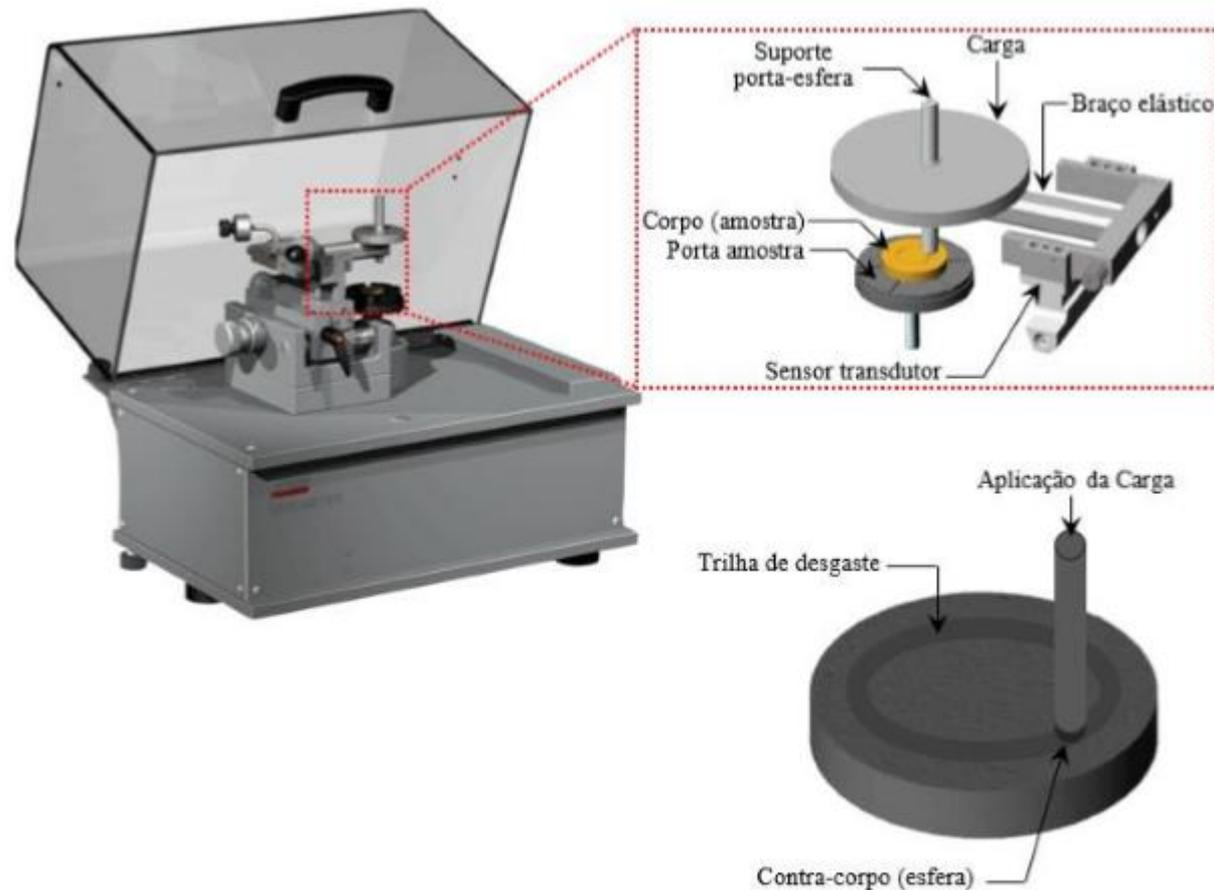


Figura 97. Equipamento de ensaio de desgaste por deslizamento na configuração esfera sobre disco marca CSM.

# Dados da tese de C.J. Scheuer

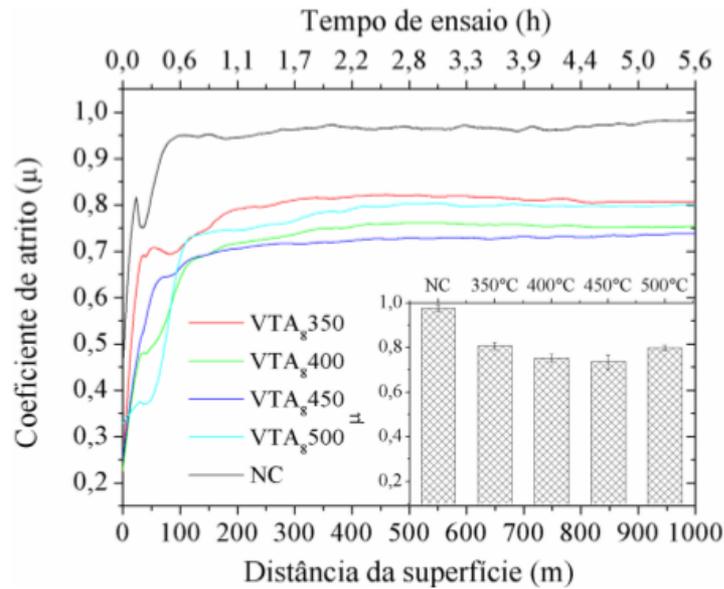


Figura 116. Evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento e tempo de ensaio para as amostras não tratada e cementadas por 8 h a 350, 400, 450 e 500°C. Ensaios tribológicos realizados em condições ambiente, utilizando uma esfera de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 6 mm de diâmetro, aplicando-se uma carga de 5 N para uma distância de deslizamento de 1000 m.

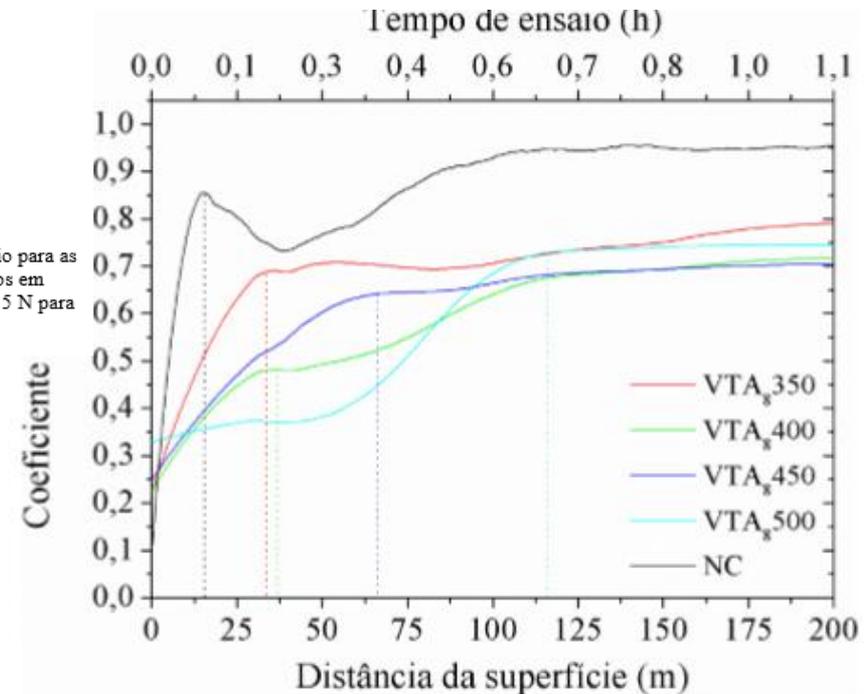
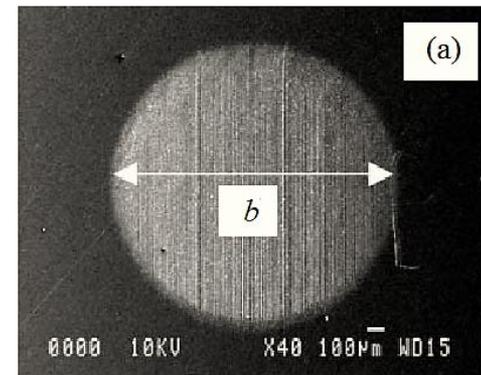
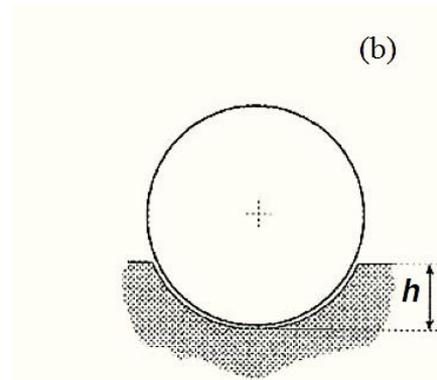
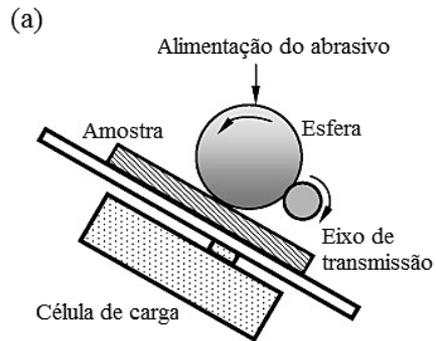
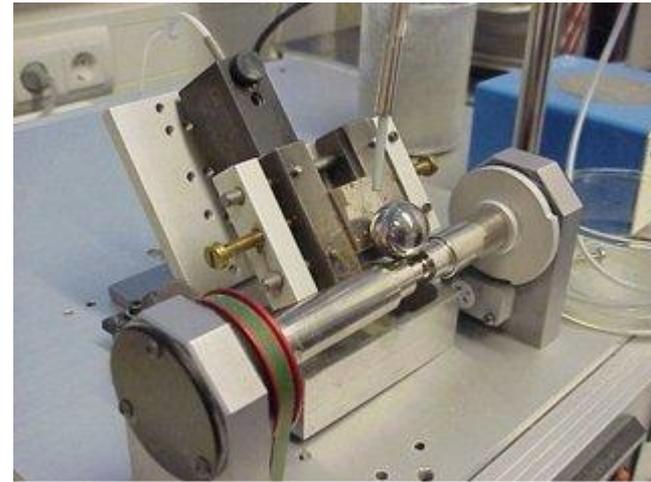


Figura 117. Ampliação da curva coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento apresentada na Figura 116.



# Tese C.J. Scheuer

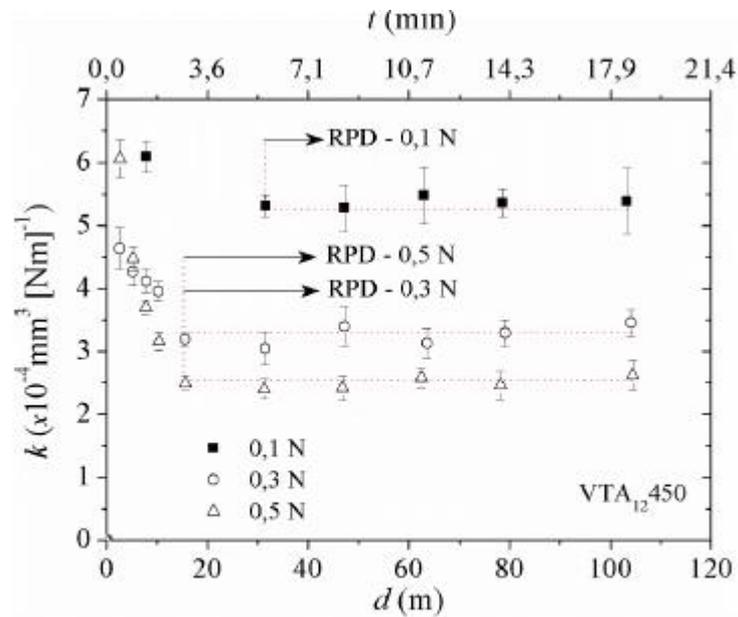


Figura 149. Evolução do coeficiente de desgaste em função da distância de rolamento. Amostra cementada a 450 °C por 12 h. Ensaio micro-abrasivo realizado utilizando uma suspensão abrasiva de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com tamanho 1  $\mu\text{m}$ , esfera de *ALST* 52100 com diâmetro de 25,4 mm, apoiado sobre eixo rotacionando a 120 rpm.

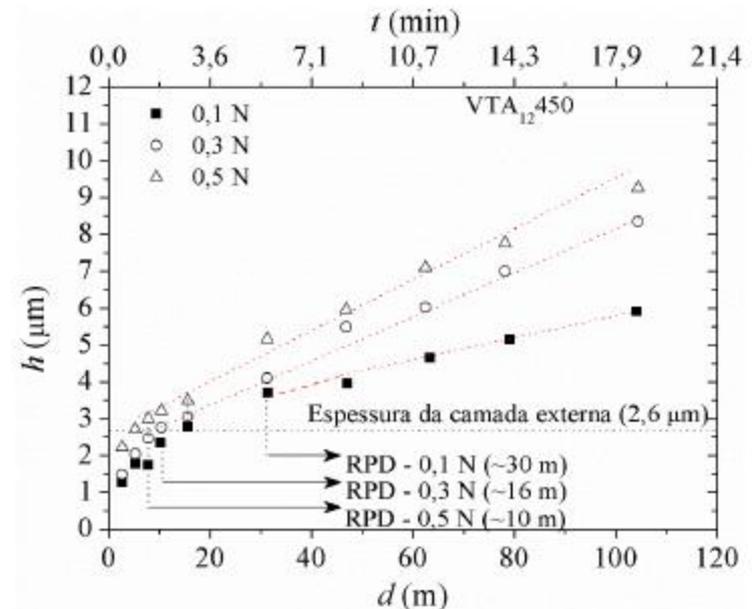


Figura 150. Variação da profundidade da cratera de desgaste em função da distância de rolamento. Amostra cementada a 450 °C por 12 h. Ensaio micro-abrasivo realizado utilizando uma suspensão abrasiva com tamanho 1  $\mu\text{m}$ , esfera de *ALST* 52100 com diâmetro de 25,4 mm, apoiado sobre eixo rotacionando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

# Tese C.J. Scheuer

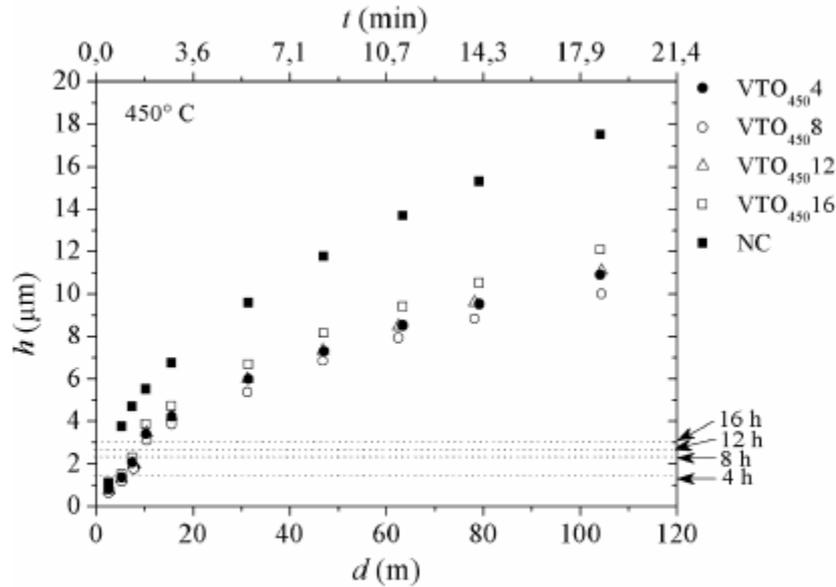


Figura 145. Profundidade da cratera de desgaste em função da distância de rolamento para as amostras não tratada e cementadas a  $450^\circ\text{C}$  por 4, 8, 12, e 16 h. Ensaio micro-abrasivo realizado usando uma suspensão de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com tamanho  $1\ \mu\text{m}$  como abrasivo, esfera de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  S2100 com diâmetro de  $25,4\ \text{mm}$ , apoiado sobre eixo rotacionando a  $80\ \text{rpm}$ , aplicando-se carga de  $0,5\ \text{N}$ .

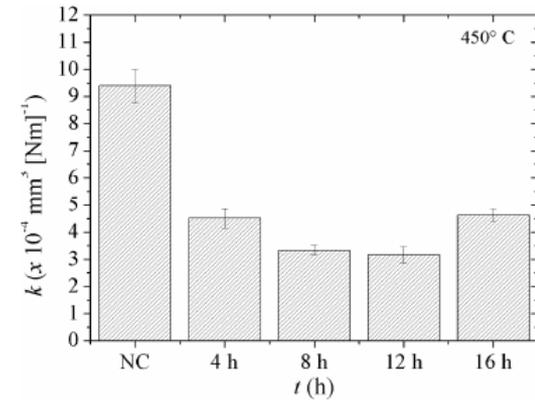
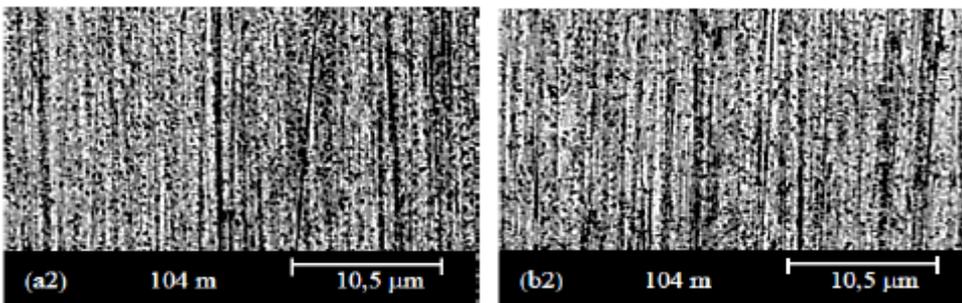


Figura 146. Variação da taxa e coeficiente de desgaste em função da distância de rolamento para as amostras não tratada e cementadas a  $450^\circ\text{C}$  por 4, 8, 12, e 16 h. Ensaio micro-abrasivo realizado usando uma suspensão de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com tamanho  $1\ \mu\text{m}$  como abrasivo, esfera de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  S2100 com diâmetro de  $25,4\ \text{mm}$ , apoiado sobre eixo rotacionando a  $80\ \text{rpm}$ , aplicando-se carga de  $0,5\ \text{N}$ .

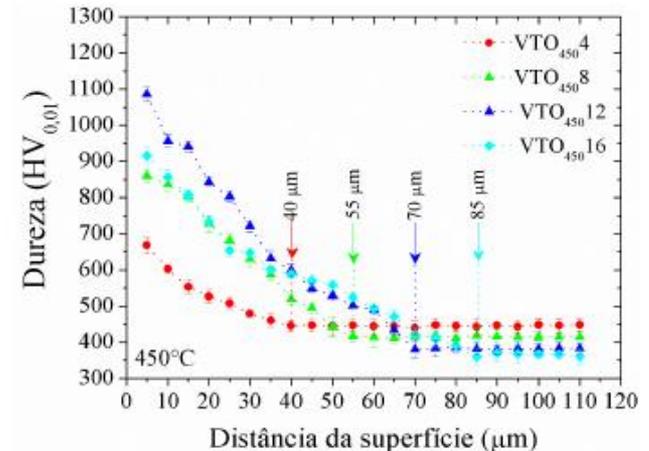


Figura 131. Perfil de dureza na escala Wickers das amostras do aço AISI420 cementadas por plasma na temperatura de  $450^\circ\text{C}$  durante 4, 8, 12 e 16 h. Tratamentos realizados empregando-se uma mistura gasosa composta por  $99,5\%$  ( $80\% \text{H}_2 + 20\% \text{Ar}$ ) +  $0,5\% \text{CH}_4$ , a um fluxo de  $1,67 \times 10^{-6}\ \text{Nm}^2\ \text{s}^{-1}$ , e pressão de  $400\ \text{Pa}$ .

# Mecanismos de desgaste

- Minimização de desgaste:
  - Minimizar carga
  - Boa lubrificação
  - Materiais resistentes e tenazes
  - Microestrutura refinada
  - Para desbaste abrasivo-> dureza elevada
  - Casos de delaminação -> similar a fadiga

# Efeito do ambiente no desgaste

- Para sistemas não lubrificados o efeito do meio é importante:
  - Formação de óxidos pode reduzir o atrito e o desgaste (tribocamada)
  - Meios não oxidantes podem aumentar o desgaste (Vácuo/espaço)
  - Aumento de Temperatura (aumenta a área de contato e tendência à adesão)
- Em meios aquosos:
  - Combinação corrosão desgaste (asperidades são facilmente atacadas)
  - A dependência com o meio é similar aos casos de corrosão sob tensão e corrosão-fadiga

# Tratamentos de superfície para redução de desgaste

- Como no caso da corrosão, tratamentos para desgaste podem ser localizados (sem modificar as propriedades globais do componente e sem custos exagerados)
- Estratégias dos tratamentos:
  - Produzir camadas duras (resistente à deformação)
  - Produzir camadas levemente lubrificantes (reduz adesão)
- Algumas técnicas:
  - *Surface alloying* e Tratamento térmico/termoquímico superficial
  - Deposição de filmes

# Tratamentos de superfície para redução de desgaste

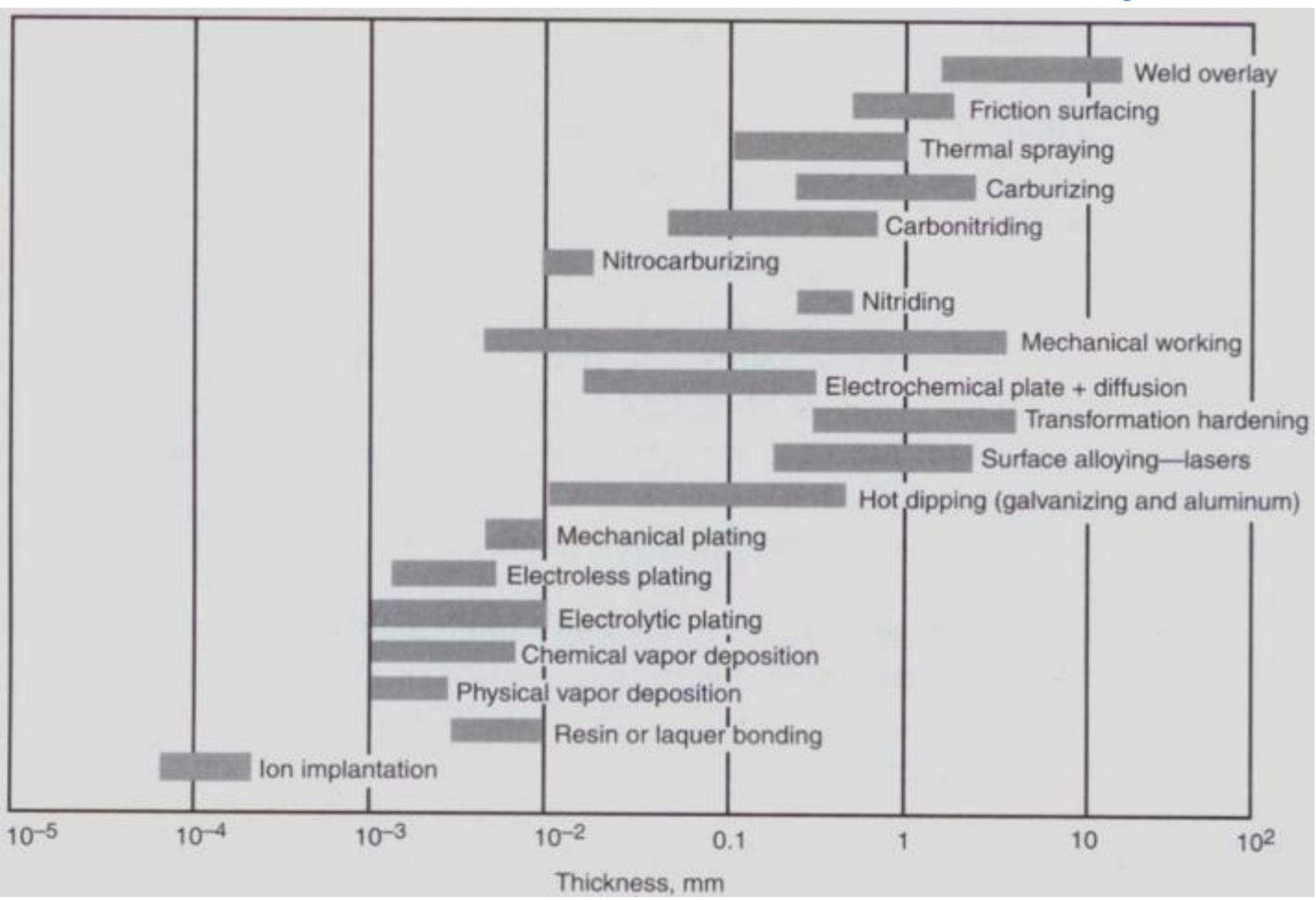
- *Surface alloying* e tratamento térmico/termoquímico
  - Comum em aços -> cementação e nitretação
    - Líquido, Gás ([baixa pressão](#) ou não), [Plasma](#)
  - Outros -> Introdução de boro (Boretção), Cromo, Vanádio, Alumínio (tratamento difusivos a alta temperatura) -> elevar dureza
  - Tratamento térmico superficial (se o teor de C for suficiente) -> Chama, Indução (Vídeo [1](#), [2](#))
  - Tratamento Laser -> tempera ou refusão com possibilidade de introdução de elementos de liga ([vídeo](#))

# Tratamentos de superfície para redução de desgaste

- Deposição de filmes
  - Necessidade de dureza extrema ou impossibilidade de outros tratamentos (ex. não ferrosos)
    - Deposição eletroquímica (cromo duro), plasma spray, CVD (com ou sem plasma), PVD (com ou sem plasma)
  - Necessidade de adesão (desplacamento do filme pode ser grave)-> normalmente camadas espessas deslocam mais facilmente ( $\sim 10\mu\text{m}$  suficiente):
    - só precisam ser levadas em conta no projeto se as tolerâncias forem apertadas
  - Para cargas localizadas a falha pode ocorrer por deformação do substrato e o tratamento não será eficiente (vale para qualquer tratamento de superfície)

# Tratamentos de superfície para redução de desgaste

- Filmes lubrificantes
  - PTFE, bissulfeto de molibdênio, grafite, chumbo, índio -> objetivo é reduzir atrito
  - Grafite e bissulfeto de molibdênio tem planos de fácil deslização (camada deve ser aderente, manter sua integridade e ser espessa o suficiente para suportar asperidades do contra corpo) -> comportamento depende do meio
  - Pb e Grafite podem estar no material também como partículas isoladas -> bronze, ferro fundido, aços
  - Teflon (PTFE) -> baixa energia de superfície
  - DLC e Materiais autolubrificantes (metalurgia do pó)

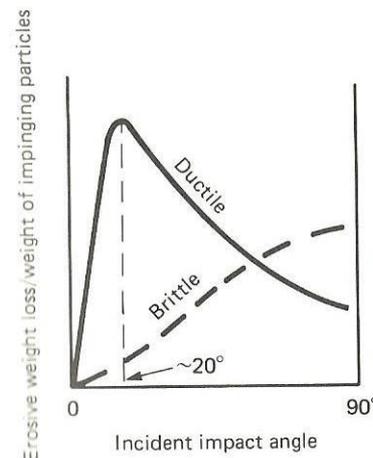


# Desgaste erosivo

- Movimento de “partículas de solo” é importante em vários casos (turbinas, plantas, equipamentos para movimentação de solo) -> até mesmo pedras sofrem este efeito em regiões arenosas
- Depende da velocidade e ângulo das partículas impactando a superfície

$$E = kV^n f(\theta)$$

O ângulo de maior erosão depende do mecanismo envolvido que depende do material



Deformação plástica  
(desprendimento das  
bordas deformadas)

Contato elástico (trinca  
cônica)

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

# Seleção para resistência à erosão

- Desgaste abrasivo (por partículas duras) depende pouco das propriedades do material
- É mais sensível ao ângulo de impacto das partículas (Materiais Dúcteis x Duros)
- Bons resultados são obtidos se a superfície tiver dureza significativamente superior às partículas
  - Pouco a se fazer para metais
  - Trabalhar camadas e outros materiais como cerâmicas

# É importante lembrar

- Tipos de desgaste
- Influências das propriedades do material sobre o desgaste
- Medidas para reduzir o desgaste
  - Projeto
  - Tratamentos de superfície