ATRITO E DESGASTE

Material base para a aula

Tese de doutorado de **Mário Vitor Leite**

Escola Politécnica da USP – Depto. de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Amilton Sinatora

2010

ATRITO

- Define-se atrito como a resistência ao movimento

- Associado ao desgaste, por decorrer dos mesmos mecanismos e também estar associado às configurações e à cinemática do sistema.

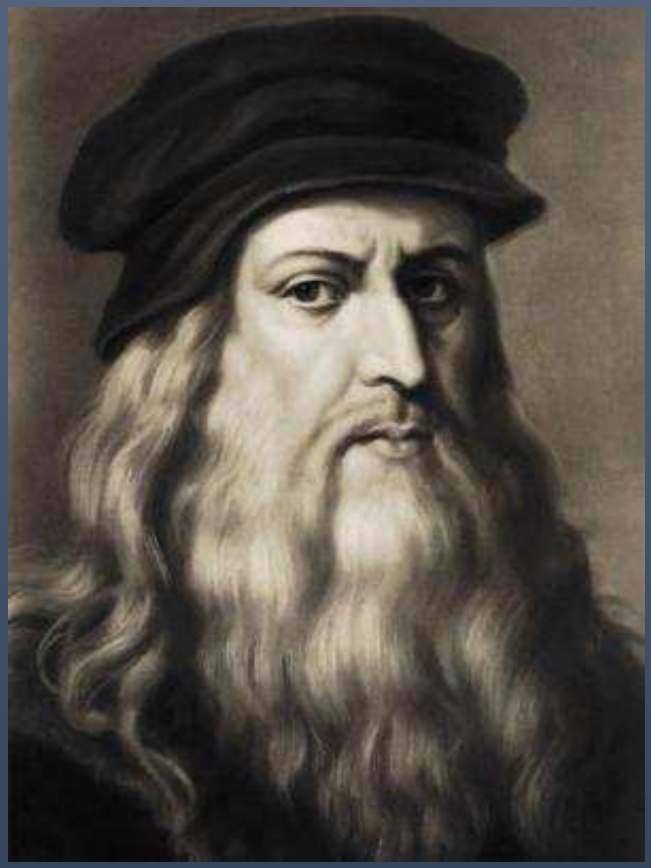
ATRITO

"Força resistente tangencial à interface que surge entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se movimenta ou tende a se movimentar em relação à superfície do outro."

Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrications: tribology

Histórico

- Atrito e fenômenos correlatos são conhecidos desde a antigüidade.
- Primeiros estudos sistemáticos sobre atrito foram feitos por Leonardo da Vinci a partir de 1495
- Da Vinci utilizava o termo "esfregamento"



Modelos de atrito

- Os modelos são dependentes do tribossistema.
- Tribossistema: Corpos em contato, meio na interface, meio circundante
- Em sistemas não lubrificados, a resistência ao movimento está fortemente ligada aos mecanismos de adesão e ruptura das junções

Leis do atrito

1ª Lei: A força de resistência ao movimento é proporcional à força normal P:

$$F_{resistência} = \mu.P$$

Leis do atrito

2ª Lei: A força de resistência ao movimento é independente da área aparente de contato

Leis do atrito

3ª Lei: A força de resistência ao movimento independe da velocidade de deslizamento

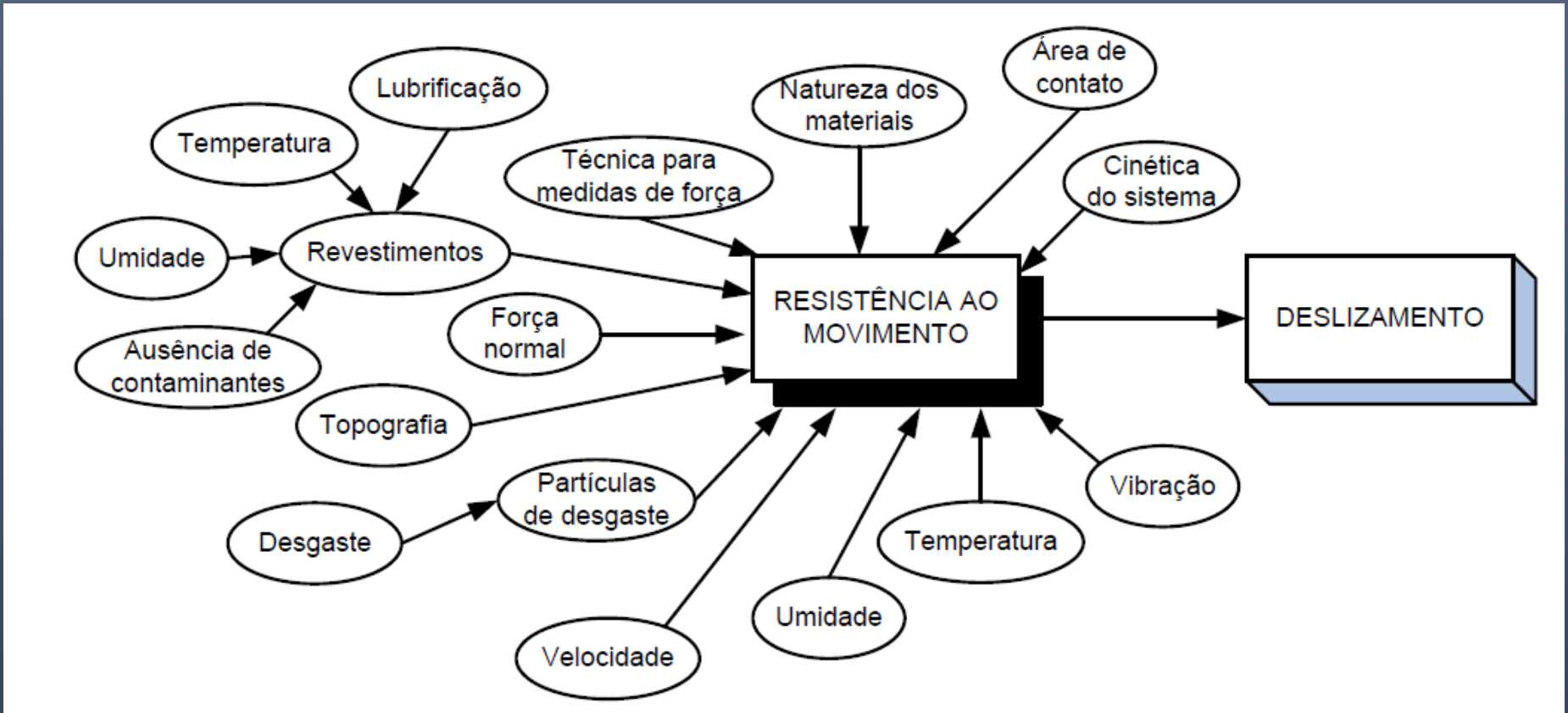
Outras variáveis

- Força de resistência depende da natureza dos materiais em contato
- Força de resistência depende do acabamento das superfícies em contato
- Força de resistência depende da presença de um fluido ou outro material entre as duas superfícies
- Força de resistência aumenta com a pressão aplicada por um corpo contra o outro

Exercício

- Como se explicam as 4 observações do slide anterior?

Variáveis que afetam o deslizamento



Atrito

- Resistência ao movimento que ocorre a seco é a resultante de uma força decorrente da adesão entre superfícies e uma força decorrente de deformação durante a formação de sulcos

$$F_{resistência} = F_{adesão} + F_{sulcamento}$$

Força de adesão

- A força de adesão é dada pela área real multiplicada pela resistência do material ao cisalhamento

$$F_{adesão} = A_{real} \times \tau$$

Força de sulcamento

- Força de deformação no sulcamento da aspereza de maior dureza depende da dureza desta, tamanho (dado pelo raio *a*) de uma única aspereza e profundidade de penetração (x)

$$F_{sulcamento} = H_{aspereza} ax$$

Força de resistência ao movimento

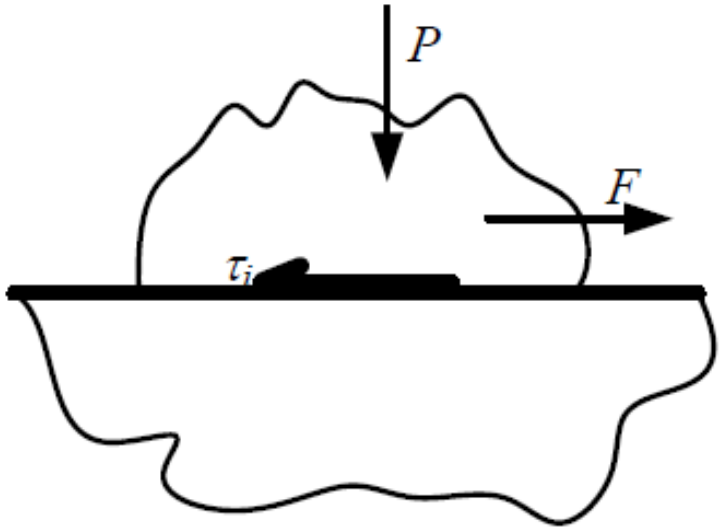
- Ao descrever a conformação mecânica, normalmente se assume que a parcela devida ao sulcamento não existe
- A força de resistência ao movimento é totalmente ditada pela adesão

$$\mu = \frac{F_{resistência}}{P} = \frac{\tau_i}{p}$$

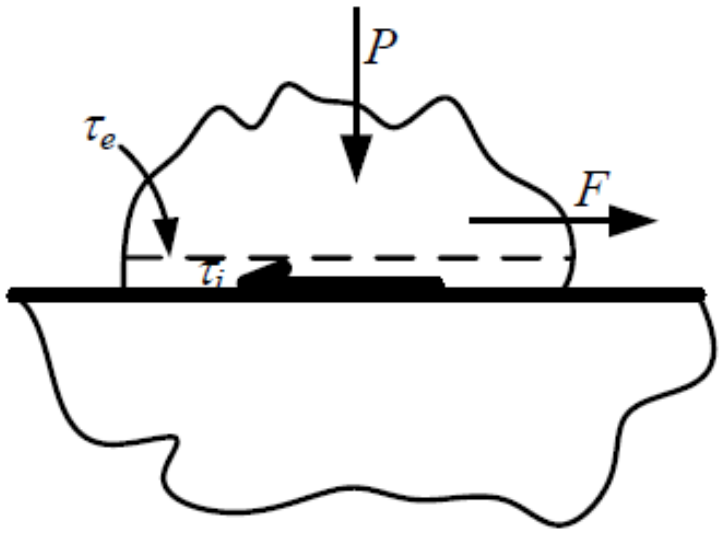
Força de resistência ao movimento

- Enquanto τi aumenta proporcionalmente a p, a relação se sustenta
- Quanto τi ultrapassa a tensão de escoamento em cisalhamento (τe), o material cisalha em uma região interna, deslocada da interface uma determinada distância
- Quando $\tau i > \tau e$, não ocorre deslizamento. A condição é determinada colamento

Força de resistência ao movimento



a) condição de deslizamento ($\tau_i < \tau_e$)



b) condição de colamento ($\tau_i > \tau_e$)

Força de resistência ao movimento

- De acordo com o critério de von Mises:

$$\tau_e = 0{,}577\sigma_e$$

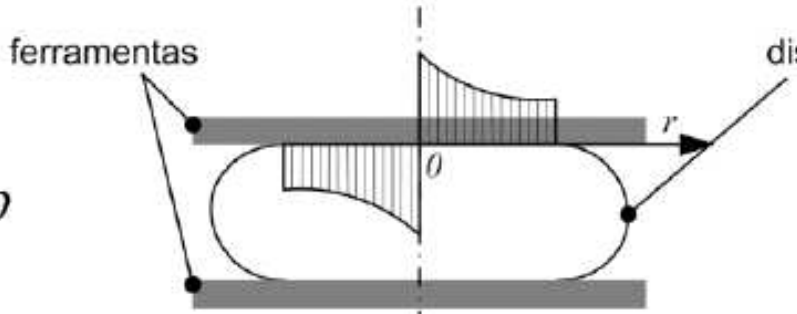
- σ_e é a tensão de escoamento em tração;
- Na conformação, considera-se normalmente que $p=\sigma_e$.
- $\tau_e=0{,}577p$ de onde se extrai que $\mu=0{,}577$
- Para valores de μ acima de 0,577, ocorre colamento.

Força de resistência ao movimento

- Na maioria dos processos de conformação, p atinge valores múltiplos de se, e te permanece constante com o aumento de p
- ti também pode ser descrito como
- ti=mte
- M é o fator de cisalhamento em atrito, que varia de 0 (interface livre de atrito) a 1 (condição de colamento)

Modelos para a distribuição de tensão interfacial na conformação

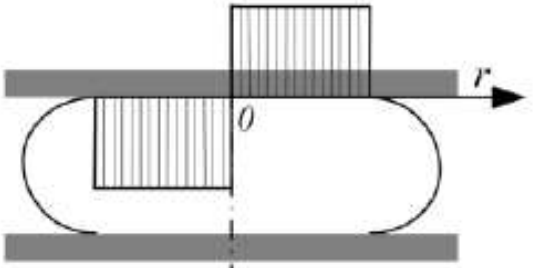
$\tau_i = \mu p$



Deslizamento a seco em toda a interface. τ_i é diretamente proporcional a pressão de contato.

von Karman, 1925; Kunogi, 1954; Kudo, 1960

$\tau_i = m\tau_e$



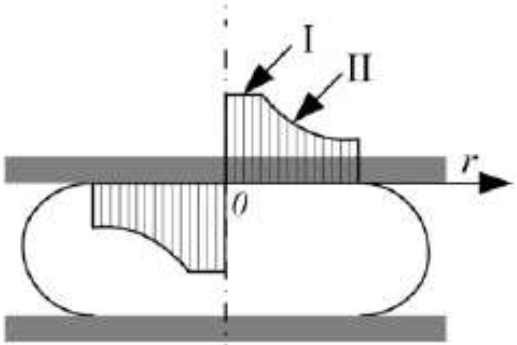
Condição de colamento em toda a interface. Usado em conformação a frio, a seco de metais com baixa dureza.

Siebel, 1930; Orowan, 1946; Sims, 1954; Alexander, 1955

Modelos para a distribuição de tensão interfacial na conformação

I- $\tau_i = m\tau_e$

II- $\tau_i = \mu p$



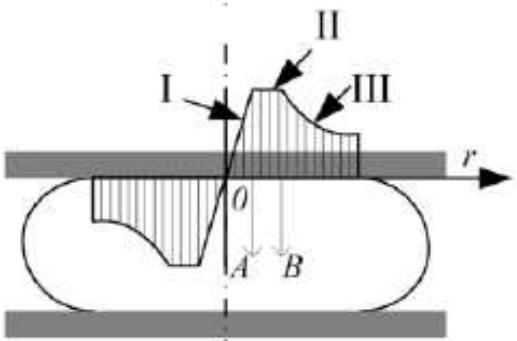
A superfície do disco é dividada e duas regiões: I – colamento, próxima a zona neutra, II- deslizamento.

Orowan, 1943

I- $\tau_i = m\tau_e \frac{r}{\overline{0A}}$

II- $\tau_i = m\tau_e$

III- $\tau_i = \mu p$



A superfície do disco é dividada e três regiões: I e II – colamento, tendendo a zero no centro, III- deslizamento.

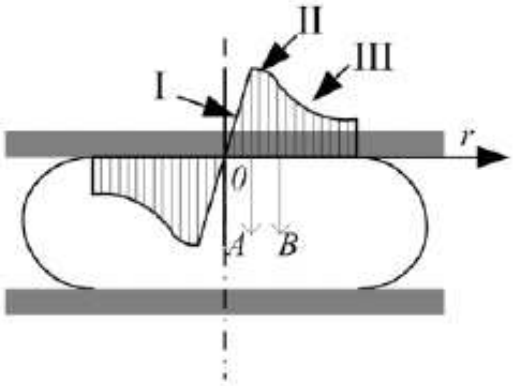
Tselikov, 1958; Unksov, 1961

Modelos para a distribuição de tensão interfacial na conformação

I- $\tau_i = m\,\tau_e \dfrac{r}{0\,A}$

II- $\tau_i = m\,\alpha\,\tau_e$

III- $\tau_i = \mu p$



A superfície do disco é dividada e três regiões: I colamento, tendendo a zero no centro,II e III- deslizamento.

Bay e Gerved, 1984

Desgaste

- Modificação da forma original de um corpo por ação do tempo ou freqüência de contato com outro corpo

- Exemplo: Desgaste de escadas de mármore em edifícios antigos (POLI de Santos!)

Desgaste

- Combinação do tempo com outras variáveis como a força de contato pode resultar em aumento do desgaste observado

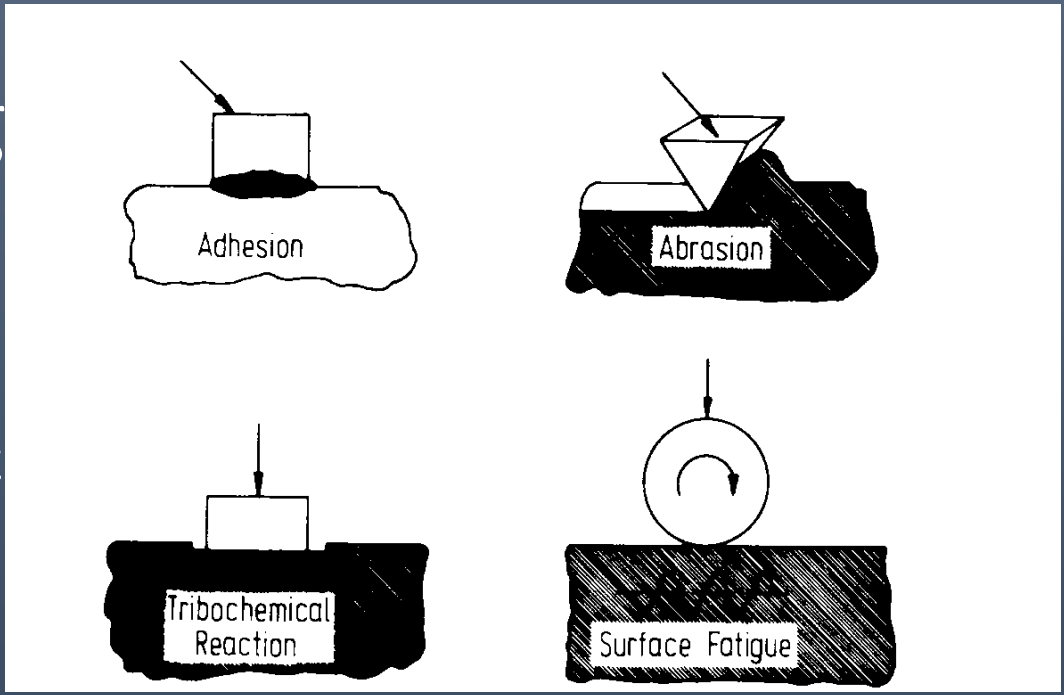
- Intensidade do desgaste depende dos materiais em contato e de como eles interagem

Desgaste

- Tipos de movimento que causam desgaste:
  - Deslizamento
  - Rolamento
  - Movimento oscilatório
  - Impacto
  - Movimento erosivo

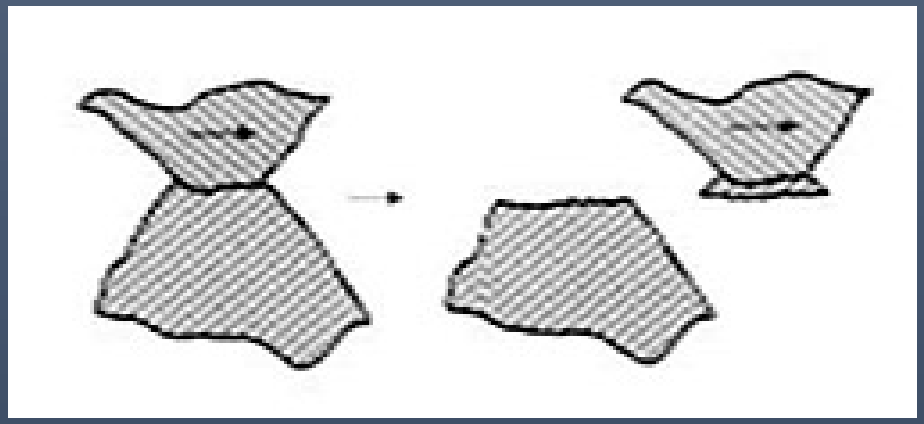
Desgaste

- Mecanismos de desg
  - Adesão
  - Abrasão
  - Reações triboquímic
  - Fadiga superficial



Desgaste por adesão

- 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.

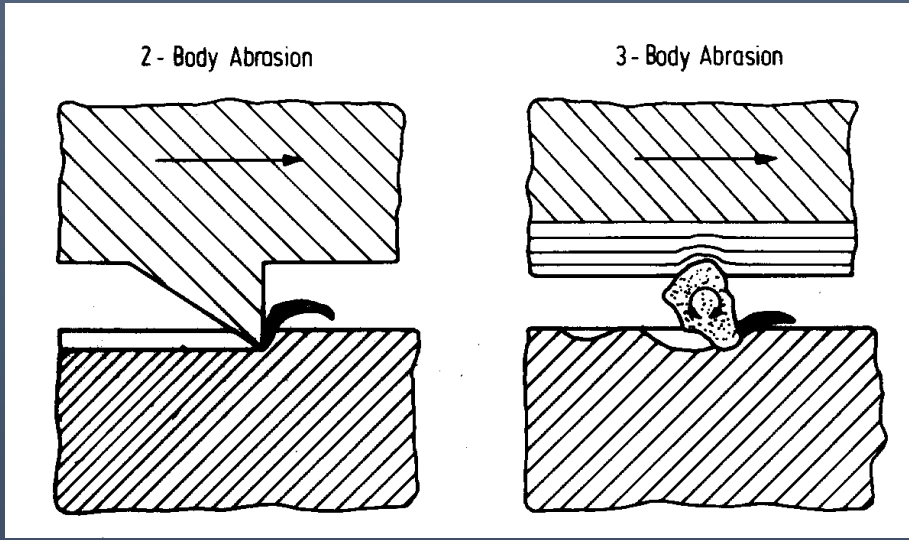


Desgaste por abrasão

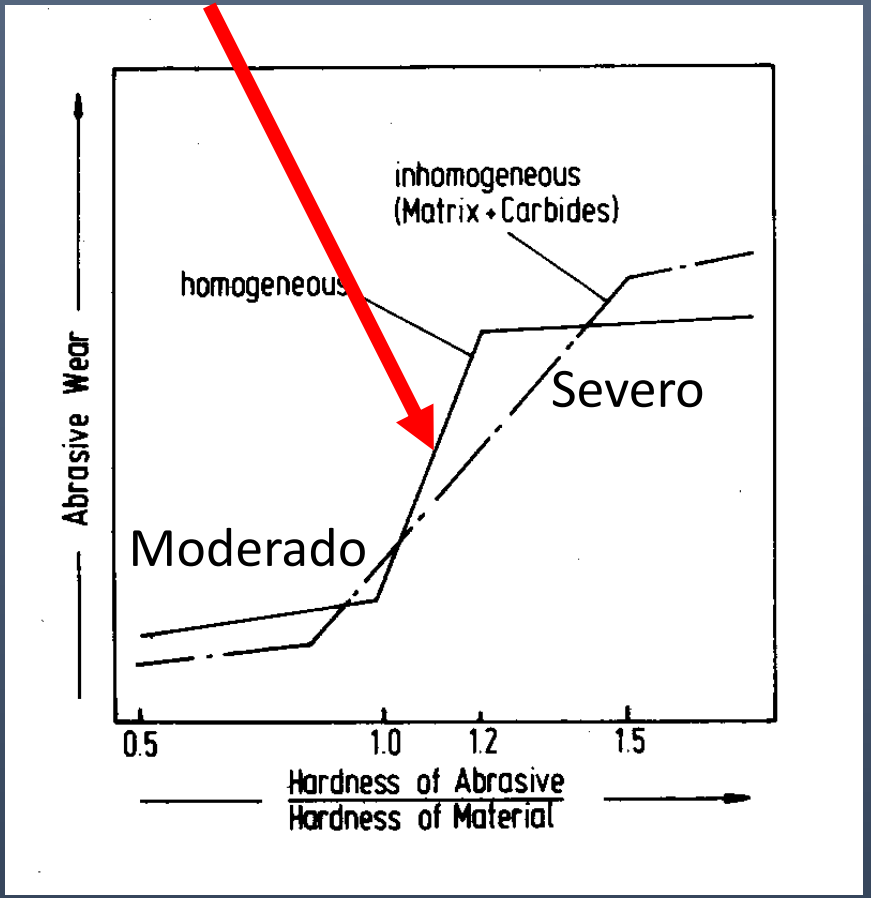
- ocorre quando há deslocamento de material provocado por partículas de alta dureza existentes entre as duas superfícies em movimento ou embebidas em uma ou nas duas superfícies em movimento.

- 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.

Desgaste por abrasão



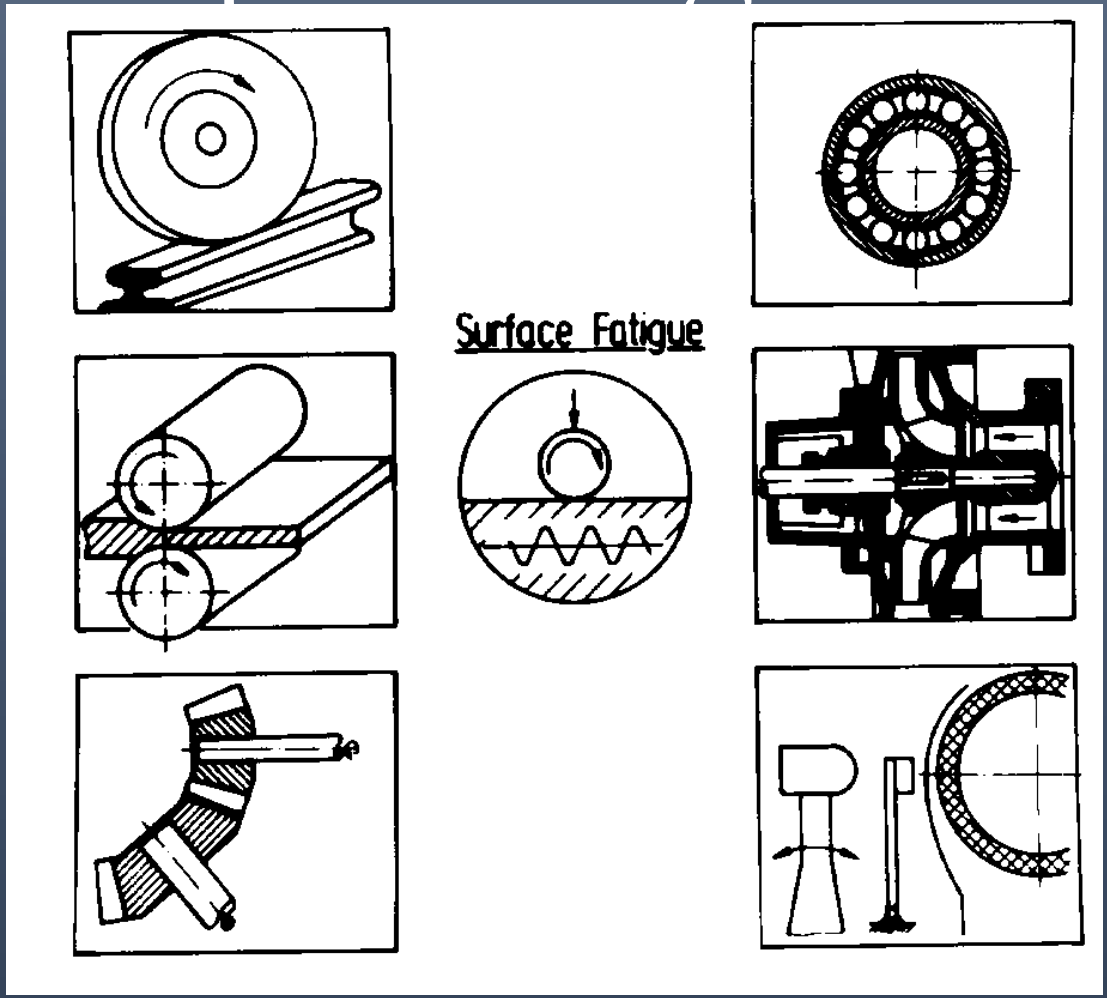
Abrasão a dois corpos e a três corpos



Desgaste por fadiga

- Ocorre pela formação de trincas superficiais ou sub-superficiais devido a aplicação de cargas alternadas repetidas e lascamento do material
- Sequência do fenômeno: deformação elástica, seguida de deformação plástica, encruamento, nucleação de trinca e propagação da trinca.

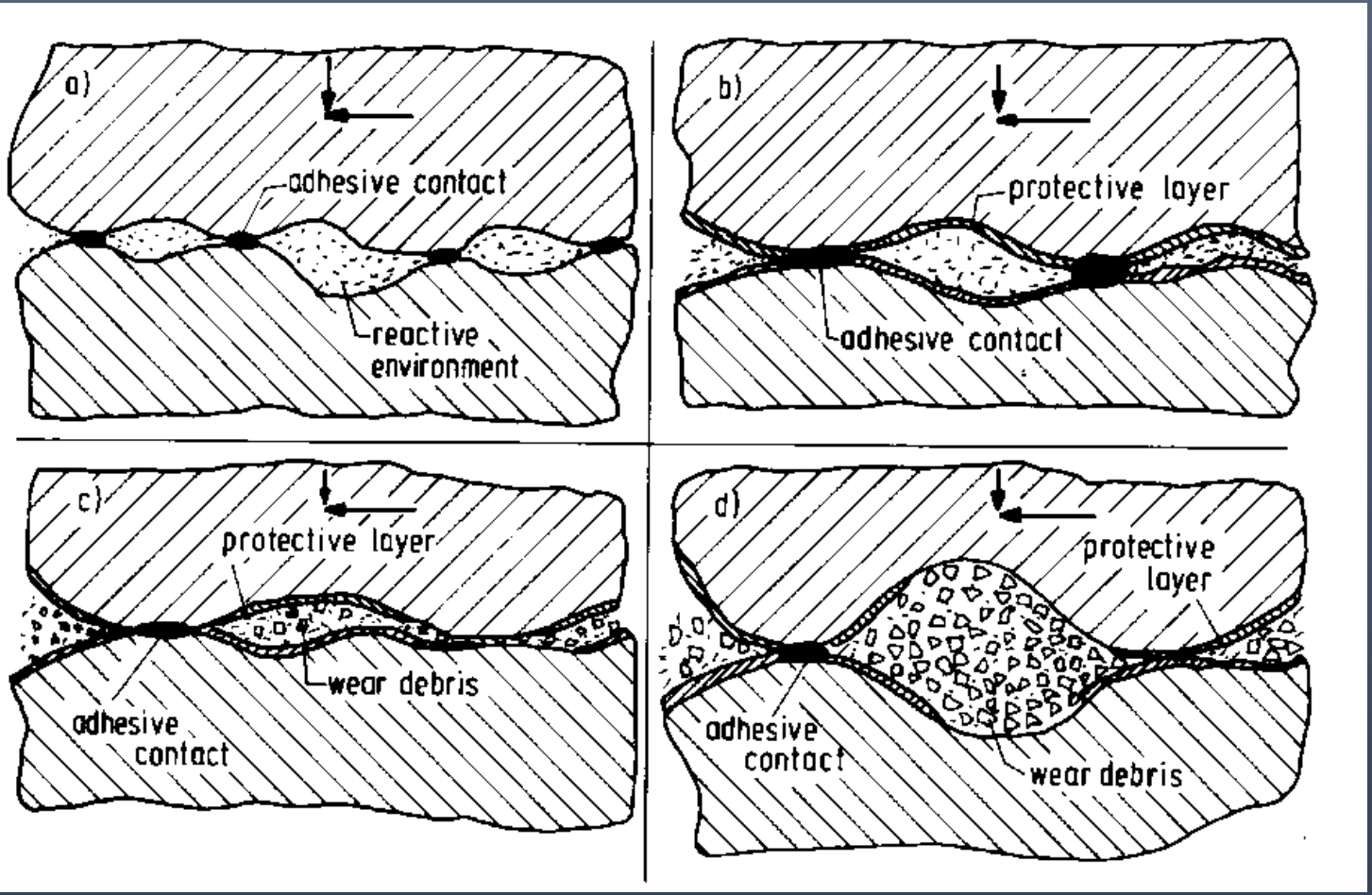
Desgaste por fadiga



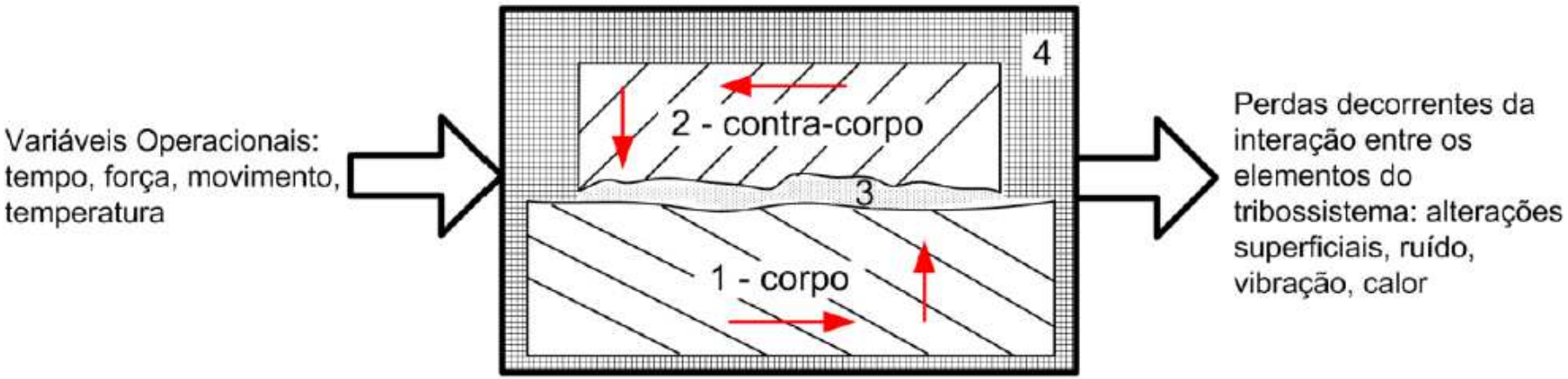
Desgaste por reação triboquímica

- Pode ser caracterizado como sendo decorrente do contato de duas superfícies em movimento 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 triboquímica



Tribossistema



Elementos do tribossistema:
1 - Corpo
2 - Contra-corpo
3 - Meio-Interfacial
4 - Meio Circunvizinho

Desgaste por deslizamento

- Principal mecanismo: adesão

- Os outros mecanismos também podem agir

Desgaste por adesão

- Elevadas pressões que resultam em deformação plástica de alguns picos da aspereza de contato, seguidas de adesão e formação de junção
- Deslizamento causa deformação plástica da junção, podendo resultar em ruptura, causando transferência de massa entre os corpos

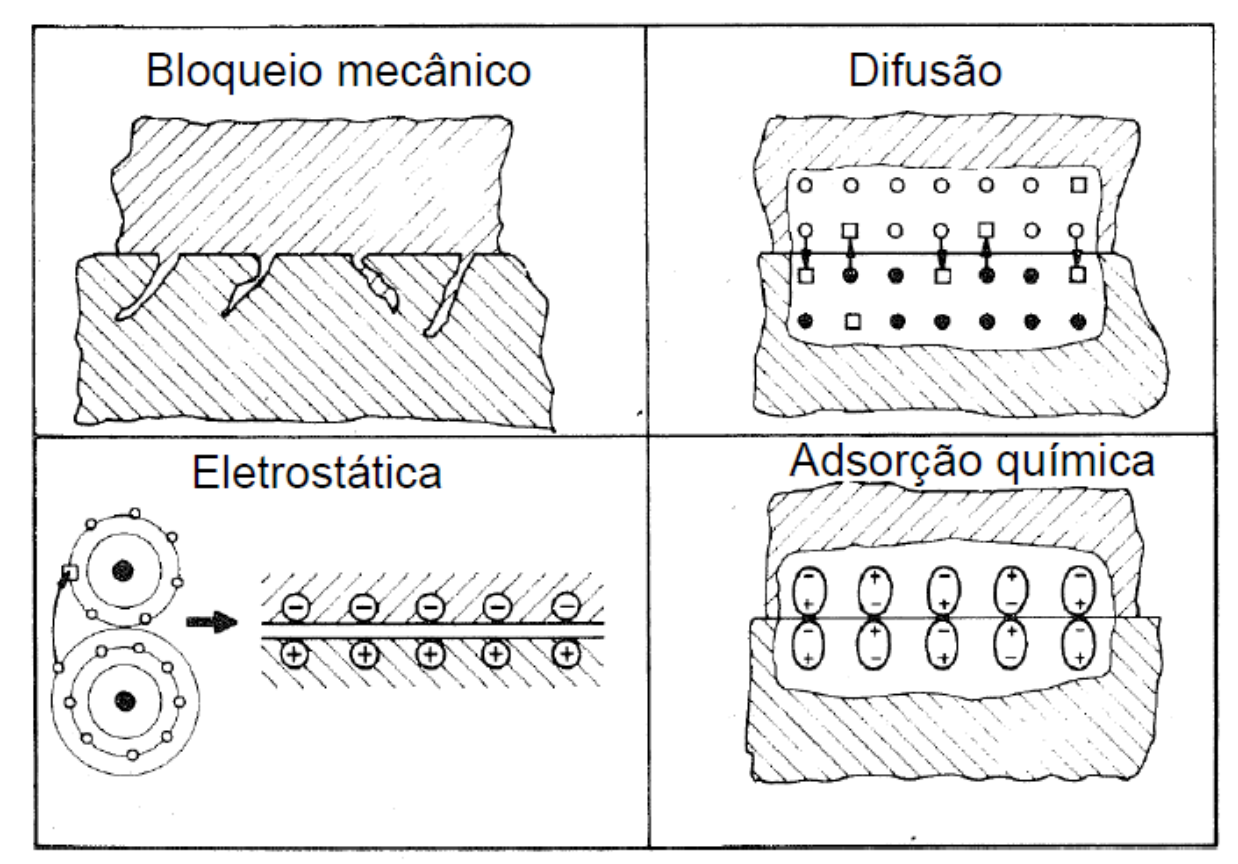
Desgaste por adesão

- Transferência de material depende da intensidade da adesão

- Se a tensão para separação da junção for maior do que a tensão para cisalhar um dos materiais, o cisalhamento ocorre fora da junção, resultando em transferência de massa.

Desgaste por adesão

- Mecanismos de adesão:
  - Bloqueio mecânico
  - Difusão
  - Forças eletrostáticas
  - Adsorção química



Desgaste por adesão

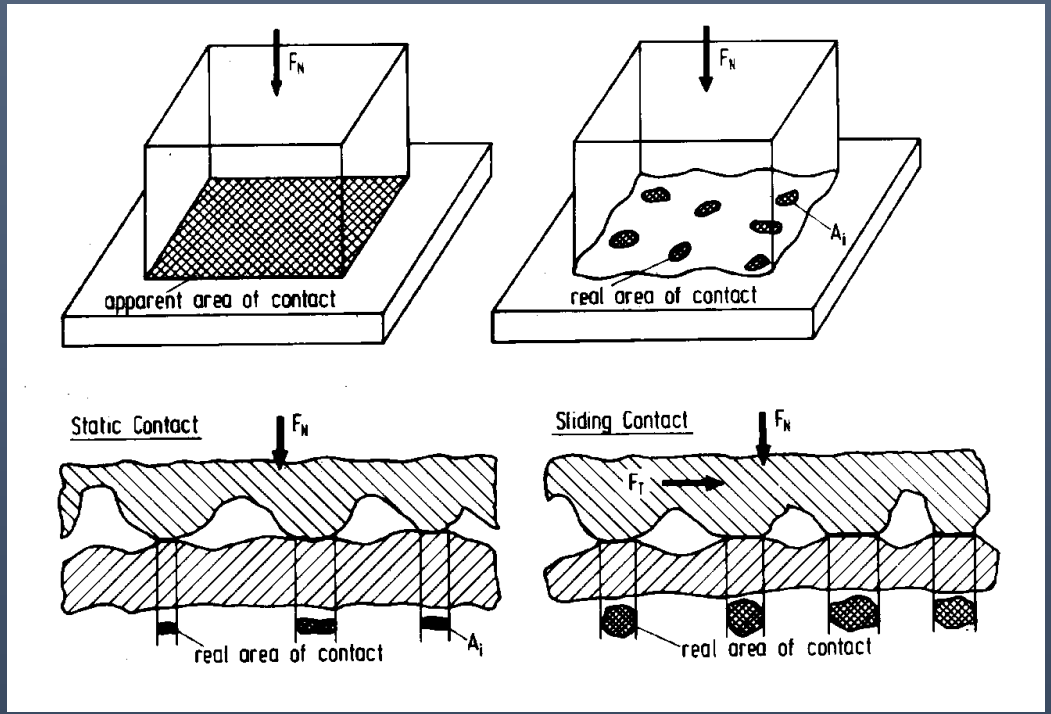
- Quanto menor for a presença de meio interfacial, mais efetivas serão as forças de adesão

- Adesão ocorrerá quando as superfícies se aproximarem com distâncias nanométricas

Desgaste por adesão

Área real de contato:

- Adesão só ocorrerá nas regiões de efetivo contato
- Determinação da área real de contato é um grande desafio, devido à aleatoriedade da estrutura da superfície



Desgaste por adesão

- Papel da área real de contato é ser a origem da transferência de material
- Região com transferência de material é apenas uma fração da área aparente

Desgaste por adesão

- A pequena porção de material transferido é suficiente para modificar as condições de contato, podendo inclusive ativar outros mecanismos de desgaste
- Partículas oriundas da junção rompida têm elevada dureza devido ao intenso encruamento, e ativam mecanismos de desgaste por abrasão
- Conseqüência é o sulcamento do material de menor dureza

Desgaste por adesão

- Devido à evolução do comportamento do processo de desgaste, observam-se variações nas medidas com relação ao número de ciclos (ou progresso temporal) de contato deslizante:
  - Formação de área real de contato
  - Desgaste em regime estacionário
  - Desgaste catastrófico

Desgaste por adesão

- Adesão pode causar danos catastróficos, com intensa transferência de material
- Quando há formação de saliências e vales significativos nos corpos (no popular: riscos cabulosos), chama-se o processo de desgaste de *galling* ou esfolamento
- Medidas deste tipo de desgaste podem ser feitas por medidas de massa ou de topografia.

Continua na quinta-feira, independente de não ser 12h50min

Afinal, todos nós estamos com fome...