

## **Mecanismos de Desgaste**

O desgaste é um processo de degradação de um material quando em serviço. Está presente em diferentes situações, onde ocorre a perda progressiva de material a partir da superfície, por contato ou movimento relativo de um sólido, em relação a outro sólido, líquido ou gás. Assim, equipamentos com partes móveis, como mancais de deslizamento, rotores de bombas, válvulas tipo esféricas e, sofrem desgaste. Como resultado, as empresas gastam um enorme montante de dinheiro com a recuperação de peças, recuperação de equipamentos e perdas de produção

A causa e os mecanismos que provocam o desgaste em materiais são muito variados, e devem ser abordados dentro de uma maior complexidade, definida pelo sistema tribológico. O sistema tribológico engloba a superfície que sofre o desgaste, o agente de desgaste e o meio em que as partes envolvidas estão atuando. O balanço de energia na interface de contato é provavelmente a mais importante informação, e tem considerável influência no tipo de mecanismo de desgaste. Para determinados mecanismos, dureza e tenacidade à fratura são propriedades consideradas as mais importantes para fazer frente a solicitações que provocam desgaste.

Para desenvolver uma solução que elimine ou reduza o nível de desgaste de uma superfície é necessário ter o conhecimento dos mecanismos de desgaste que estão atuando. O objetivo desse artigo é apresentar como atuam os mecanismos de desgaste e como eles agem sobre as superfícies de peças e equipamentos.

### **Desgaste**

Desgaste é o dano gerado a uma superfície sólida, usualmente envolvendo perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre aquela superfície e uma substância contatante ou substancias. Segundo Zum Ghar, “existem somente dois modos

de remover material de uma superfície: o material pode ser dissolvido da superfície como em uma reação química ou material pode ser fraturado da superfície. As peças de máquinas e equipamentos não desgastam-se simplesmente. Elas se desgastam em vários modos que são diferentes em:

- aparência;
- mecanismo;
- solução

Antes de propor uma solução para um problema de desgaste é necessário identificar-se o tipo ou modo de desgaste causando o problema. O desconhecimento do que está ocasionando o desgaste de superfícies pode fazer com que uma empresa perca tempo em dinheiro em soluções que não vão resolver o problema.

O objetivo é:

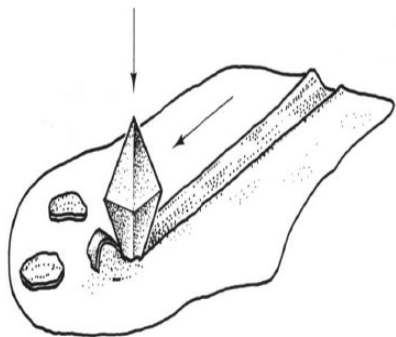
- definir os modos de desgaste mais importantes;
- mostrar suas manifestações;
- resumir o que se sabe sobre os mecanismos que controlam estes modos de desgaste.

Na literatura técnica é comum se encontrar diversos termos para definir os mesmos mecanismos de desgaste, o que pode causar certa confusão de entendimento dos modos de desgaste para a proposição de uma solução. Pode-se afirmar que os desgastes são classificados em 4 categorias: desgaste por abrasão, desgaste por erosão, desgaste por adesão e desgaste por fadiga superficial. A seguir vai ser dada uma explicação de cada uma delas.

## 1 – Desgaste por abrasão

Desgaste produzido por partículas duras ou protuberâncias forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida. O termo duro significa que a substância produzindo o desgaste é realmente mais dura que a superfície sendo danificada por desgaste. Um qualificador adicional é que as partículas que causam o desgaste usualmente têm cantos agudos para produzir um corte ou ação cisalhante no sólido que está sendo submetido ao desgaste. O desgaste por abrasão pode ainda ser dividido em duas categorias: desgaste por abrasão em alta e em baixa tensão.

**1.1 Desgaste por abrasão em baixa tensão:** A superfície apresenta-se ranhurada (como arada). Partículas duras e agudas ou uma outra superfície aguda e dura como que fresa (ou ara) material para formar canais profundos. Neste tipo de desgaste pode-se estabelecer o critério que as forças devem ser baixas o suficiente para não causar a trituração do abrasivo. Exemplos desse tipo de desgaste por abrasão são os mancais de deslizamento quando atuam em ambientes sujos, roscas transportadoras, equipamentos de mineração, equipamentos da indústria de cimento, peças de máquinas agrícolas, etc.



### **Características da abrasão à baixas tensões:**

1. Taxas de abrasão aumentam com o aumento da agudeza do abrasivo.
2. Taxas de abrasão diminuem a medida que a dureza da superfície submetida a abrasão aumenta.
3. Taxas de abrasão diminuem com a redução do tamanho do abrasivo. Abaixo de um tamanho de partícula de  $3\mu\text{m}$ , cessa o desgaste abrasivo; desgaste por polimento começa e não ocorre mais a formação de micro-junções.
4. A taxa de abrasão é diretamente proporcional a distância de deslizamento e à carga sobre as partículas ou protuberâncias.
5. Taxas de abrasão aumentam muito se a dureza do abrasivo for mais de duas vezes a dureza da superfície sofrendo abrasão.
6. A microestrutura dos metais afeta a abrasão, a presença de micro constituinte duros diminui a abrasão.
7. Abrasivos fixos produzem maior abrasão do que em sistema de três corpos (lapidação) onde as partículas duras podem rolar.
8. Elastômeros têm maior resistência a abrasão à baixas tensões que metais, pois deformam-se elasticamente.
9. Cerâmicos e cermets (metais duros) podem ter resistência efetiva a abrasão à baixas tensões se a cerâmica é mais dura que o abrasivo e se a fração das fases duras no cermet é significativa.

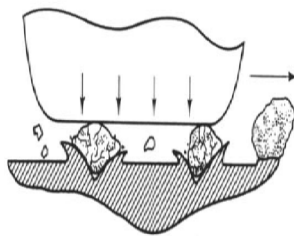
## 1.2 Abrasão à altas tensões

O desgaste por abrasão com altas tensões caracteriza-se pelo arranhamento, deformação plástica e crateras (buracos ou „pits“) marcados na superfície. Normalmente esse tipo de desgaste é mais severo e produz deformações plásticas e ranhuras profundas na direção do movimento.

### Características:

Similares as da Abrasão à baixas tensões. Porém a resistência a compressão da superfície se torna mais importante. Para resistir a este tipo de desgaste a resistência a compressão da superfície deve ser maior do que aquela do abrasivo.

Exemplos: Fresamento de minerais, rolos ou esferas rolando sobre pistas de rolamento sujo, equipamento de movimentação de terra, utilização de implementos agrícolas em solos duros, sistemas de deslizamento de metais contra metais com carga elevada ocorrendo em ambientes sujos.

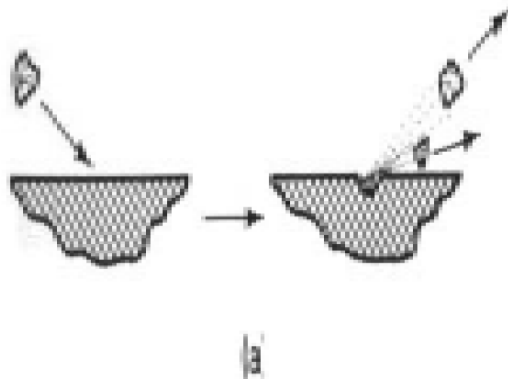


## 2. Erosão

2.1 Erosão por Choque de sólido (Solid Particle impingement) Continua sucessão de impactos de partículas sólidas sobre uma superfície. As partículas impactantes são muito menores do que a superfície submetida a erosão.

O exemplo mais severo desse tipo de desgaste é o jateamento erosivo.

Esse mecanismo de desgaste pode envolver simplesmente deformação plástica com cada partícula formando uma cratera ou pode haver remoção de cavaco. No jateamento abrasivo a cratera produzida poderá reproduzir o formato do fluxo com a formação de uma cratera de mesmo tamanho e bordas arredondadas.



Alguns fatores que devem ser considerados quando existe impacto repetido:

- A taxa de remoção de material ( $w$ ) é proporcional ao tipo de partícula, tamanho, ( $m$ , massa), velocidade ( $v$ ), fluxo de partículas, e fluência, e é inversamente proporcional a dureza da superfície submetida à erosão:

$W=(mv^2/H)*k$ , onde “ $k$ ” é uma função do ângulo de incidência e da natureza das partículas, (algumas vezes é aplicado um expoente ao termo de dureza).

- Partículas duras e agudas produzem as taxas mais altas
- Materiais dúcteis como metais moles mostram uma taxa de erosão máxima com um ângulo de incidência de 15 a 30 graus.
- Cerâmicas e aços ferramentas com alta dureza: 90°.

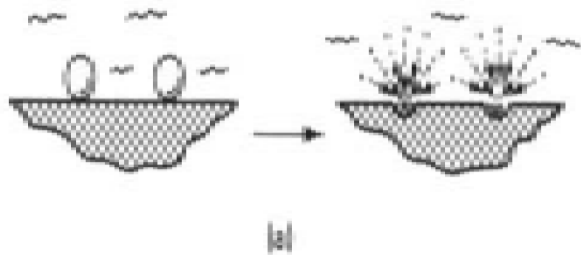
Quando a remoção é por fratura.

- O expoente da velocidade pode variar até 6.
- O grau de erosão diminui com o tamanho das partículas (menor que 1µm quase não há erosão)

## 2.2 Cavitação

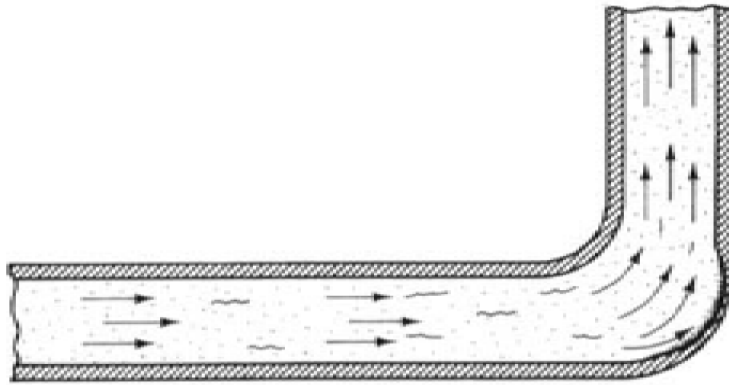
Cavitação é a perda progressiva de material de um sólido devido a ação de bolhas em um líquido colapsando próximo a superfície deste sólido. Cria jatos de líquidos muito pequenos para preencher o espaço vazio. Pode causar a remoção de camadas passivas levando a um mecanismo combinado de corrosão. Existe um período de incubação e após um regime estável. Metais que tem um alto limite de resistência e uma camada passiva tenaz são os mais resistentes.

Exemplos. Qualquer sistema de bombeamento ou propulsor. Propulsores de navios, tubulações, sistemas de mistura, agitadores ultra sônicos.



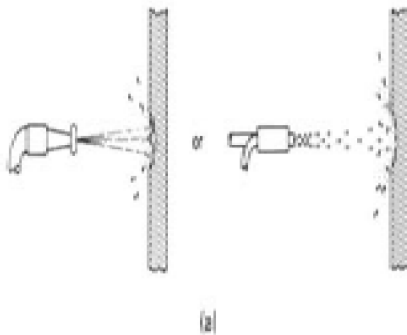
## 2.3 Erosão por lodo (slurry erosion)

Ação de uma mistura de partículas sólidas em um líquido (lodo) em movimento com respeito a superfícies sólidas. A corrosão, se presente, gera partículas abrasivas e mais corrosão pela abrasão de filmes protetores. As partículas devem estar em suspensão. Normalmente seus tamanhos variam entre 10µm até vários milímetros. Muitas vezes é necessário se utilizar partes substituíveis em curvas. Exemplos: tubulações de bombeamento, bombas, sistemas de flotação mineral, agitadores, equipamento de manuseio com cimento.



## 2.4 Jatos Líquidos

Remoção de material progressiva pela ação de impacto de um fluido contra uma superfície. Mecanismo similar à erosão sólida. Dependem do tamanho das gotas, velocidade, ângulo e fluxo. Se o fluxo é de baixa velocidade o mecanismo principal pode ser somente corrosão, mas quando a velocidade aumenta há efeito erosivo com remoção de possíveis camadas passivas protetoras. Materiais resilientes são adequados (elastômeros, principalmente borracha natural). Para metais é desejável camada passiva tenaz e resistência a compressão alta. Exemplo: Gotas de chuva contra aeronaves, ventiladores para exaustão de gotas líquidas, dispositivos hipersônicos guiando líquidos, palhetas de turbina.





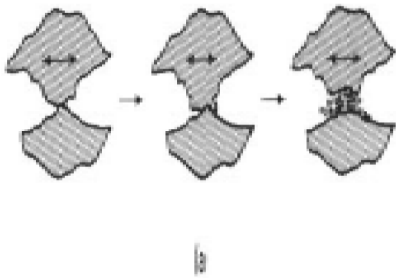
### 3. Adesão

#### 3.1 Fretting Fatigue

Movimento oscilatório de pequena amplitude entre duas superfícies. É usualmente tangencial e não intencional. Geralmente ocorre entre peças para as quais não há previsão de movimento relativo. O desgaste inicia-se por adesão microscópica. Uma vez que a superfície é piorada o desgaste progride por formação de “pitting”. Geralmente é desconsiderado, mas torna-se importante quando o pitting gera uma falha por fadiga.

#### 3.2 Fretting corrosion:

As junções fraturadas reagem com o oxigênio ou ambiente para formar óxidos ou outros compostos, aumentando taxas de desgaste.



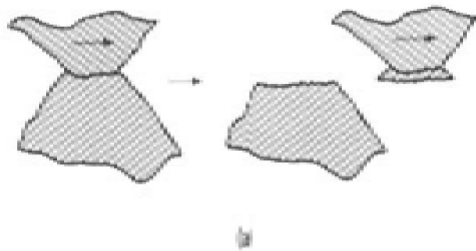
#### Fatores a serem considerados:

1. Metais ferrosos com Fretting corrosion ao ar, oxidam de ferro (alfa) com dureza de aprox. 500Hv é produzido.
2. Efeito da carga não é diretamente proporcional
3. Amplitude de movimento de 10 a 300 $\mu$ m. Dano aumenta com a amplitude.
4. Aumenta com altas freqüência, mas somente devido ao aumento de percurso total.
5. Ambiente determina se ocorrerá Fretting fatigue ou Fretting Corrosion
6. Nenhum material é imune (metais, plásticos, cerâmicos e mesmo elastômeros).

Melhor maneira de evitar é evitar o movimento relativo. Exemplos: Engrenagens presas a eixos, rolamentos presos a eixos, peças de metal vibrando em trânsito.

### 3.3 Desgaste Adesivo

Devido a junção localizada entre superfícies sólidas em contato, levando a transferência de material entre as duas superfícies ou perda de uma delas. Sólidos têm a tendência de se unir. Na vida real, todas as superfícies perfeitamente limpas têm áreas nas suas superfícies que estão em íntimo contato de tal modo que há uma tendência a junção. A adesão ocorre nos contatos de asperezas. A área real de contato entre superfícies é aprox. 1/10.000 da área aparente. A pressão sobre as asperezas que suportam o contato pode ser extremamente alta. Deformação plástica pode ocorrer e algumas asperezas terão tal contato íntimo que a adesão pode ocorrer. O desgaste adesivo ocorre quando as junções formadas neste processo deformam-se plasticamente, transferem-se ou fraturam.



O desgaste adesivo é a fase de iniciação de quase todos os sistemas de desgaste de escorregamento à seco, mas a medida que o desgaste progride ele se torna de modo misto. Desde que outras formas de desgaste podem estar co-atuando com o desgaste adesivo, é preferível se referir a esta forma de desgaste em outros termos, como desgaste metal – metal, etc...

Equação básica de Archard:

$$W = kLP/H$$

W = taxas de desgaste (volume /tempo ou distância)

K = coeficiente para o sistema (sem dimensões)

P = força normal no membro deslizante

$H$  = Dureza do membro mais macio no par de materiais.

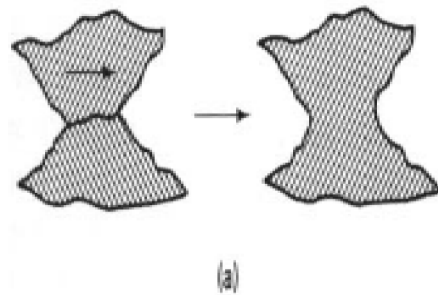
As taxas de desgaste podem ser reduzidas em várias ordens de grandeza através da utilização de lubrificação;

Também pode ser reduzida por uma ordem de grandeza usando-se materiais dissimilares. Em sistemas não lubrificados o desgaste pode ser reduzido em três ordens de grandeza num sistema metal em um não metal. Exemplos: Engrenagens, cames, pistões, parafusos, etc..

### 3.3 Emperramento (Seizure)

Soldagem local em estado sólido pode ser parte do mecanismo. A causa mais freqüente é a perda de folga para deslizamento por erro de projeto (dilatações) ou por crescimento de partícula de desgaste entre elas. A melhor solução é uso de folgas adequadas e lubrificação.

Exemplos, pistões em cilindros, válvulas, mecanismos deslizante que são usados muito raramente.

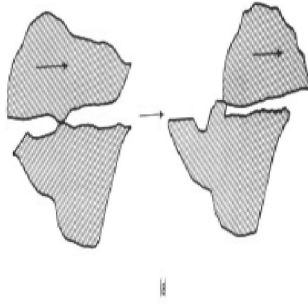


### 3.4 Galling

Na Europa é chamado Scuffing. Dano à um ou ambos membros em um sistema sólido – sólido, causado por deformação plástica macroscópica da área aparente de contato, levando a formação de excrescência por transferência ou adesão.

Se um par é propenso a galling, o dano pode ocorrer já após uma viagem.

Não há leis para prever ou maneiras de medir a resistência ao Galling. (somente teste). Exemplos: Peças deslizantes ajustadas, Válvulas plug, válvulas gaveta, membros de sistemas deslizantes não lubrificados altamente carregados.

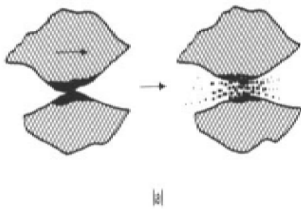


### 3.5 Desgaste Oxidativo

Superfícies deslizantes reagem com seu ambiente para formar filmes de óxidos que separam as superfícies e mantêm a taxa de desgaste baixa. Observado comumente entre aços num sistema não lubrificado e com baixa carga. Desgaste oxidativo inicia com adesão, e a taxa de remoção é relativamente alta. A medida que os filmes de óxido se formam, as taxas de desgaste diminuem Também chamado “mild wear“.

#### Lubrificação

Exemplos. Sistemas deslizantes secos, partes deslizantes em máquinas ferramenta, partes deslizantes em fornos, componentes difíceis de lubrificar, etc.

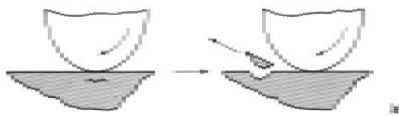


## 4. Fadiga Superficial

### 4.1 Desgaste por Cratera (pitting wear) Pitting

Pode ocorrer em inúmeros processos, como por exemplo, cavitação e fretting. Pitting é definido como a remoção ou deslocamento de material por uma ação de fadiga para formar cavidade na superfície. Esforços repetitivos por deslizamento ou rolamento causam trincas subsuperficiais que crescem em direção a superfície para produzir uma fratura em uma área local da superfície.

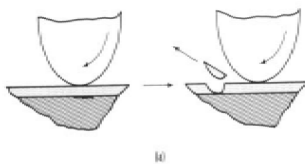
Carbonetos massivos concentram tensões que facilitam a formação de trincas subsuperficiais. Exemplos Rolamentos, engrenagens, cames, etc..



### 4.2 Lascamentos (Spalling)

Partículas fraturam da superfície na forma de escamas. Surge dos mesmos mecanismos que Pitting. Comum em peças revestidas.

Exemplos: cames e engrenagens revestidas, endurecimento superficial muito fino em cames e engrenagens, válvula, etc.

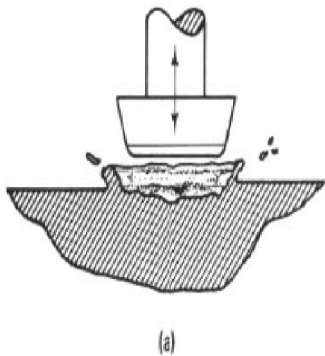


### 4.3 Desgaste por Impacto

Impacto repetitivo entre duas superfícies produzindo dano e remoção de material.

Mecanismos é usualmente a deformação plástica, mas quando repetitivo pode ocorrer pitting ou lascamento ou dano por fretting.

Exemplo : Martelo, furadeiras pneumáticas, batentes,  
etc...



### 4.4 Brinelling

A origem do termo é provavelmente da similaridade desta forma de dano a uma endentação de dureza Brinell. Deformação plástica localizada por aplicação de carga estática. Exemplo: Sobrecargas em superfícies concordantes, em rodas sobre trilhos, em rolamentos, peça de maquinário pesada transportada em estrada esburacada, fechamento inadvertido de moldes de injeção de plástico com plástico em excesso.

