

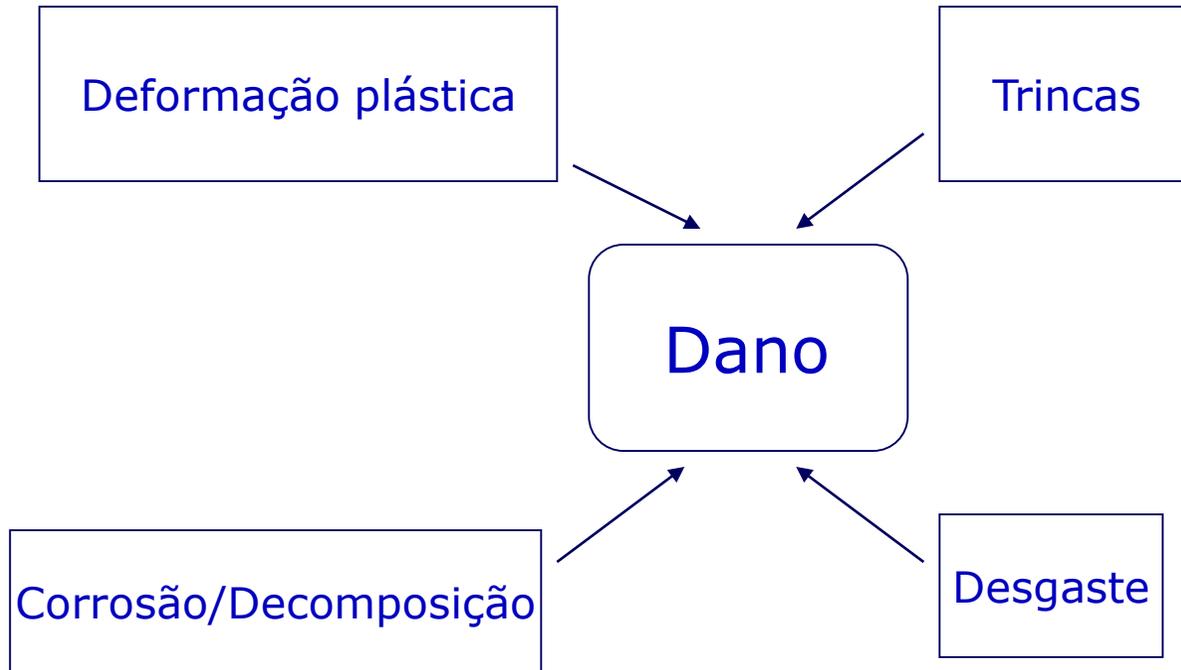


**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

## **CORROSÃO E DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS**

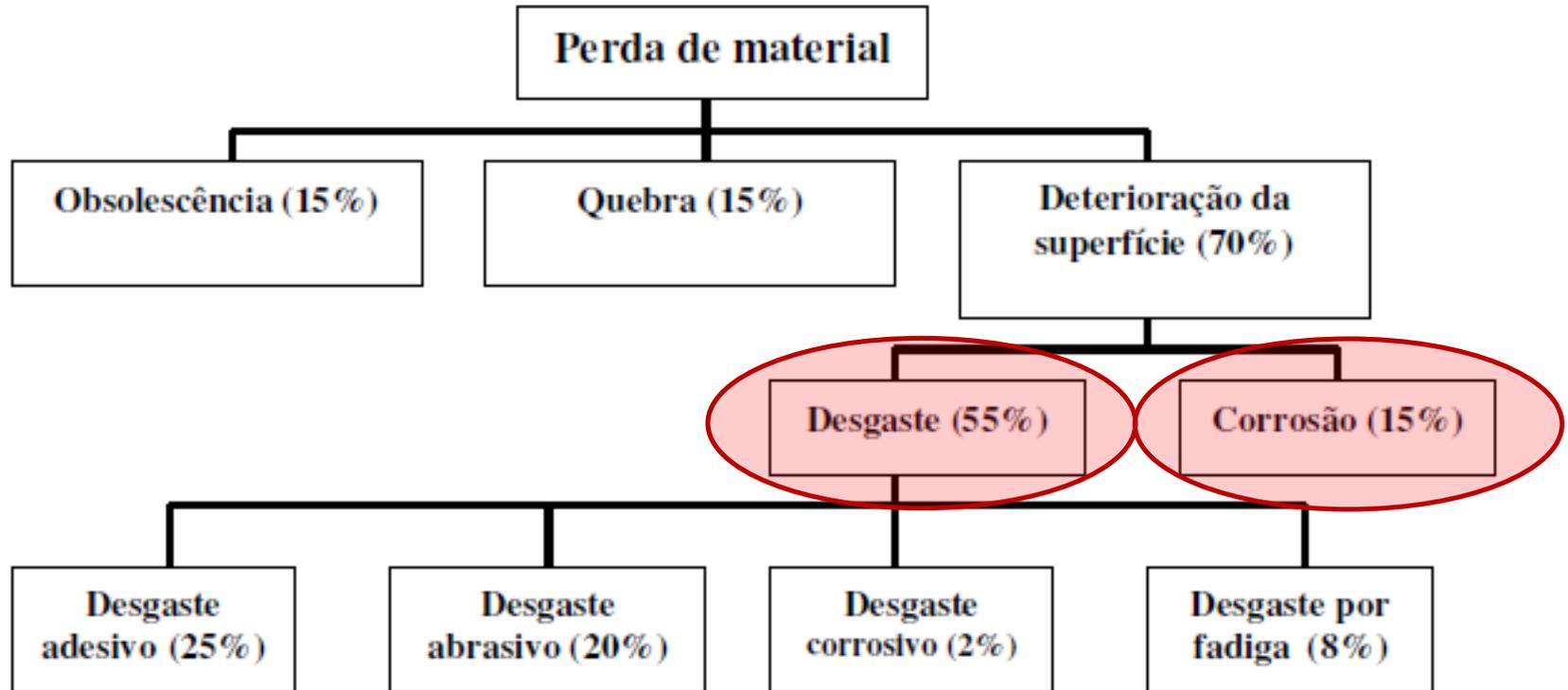
**PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais**  
**2º semestre de 2014**

# INTRODUÇÃO



**Mecanismos de deterioração de materiais**

# INTRODUÇÃO



**Há outros tipos de desgaste**

**Custo: 4,5% PIB (R\$4,84 trilhões)**

**Brasil: R\$217,8 bilhões**

# DESGASTE

- **Definição** (ASTM): degradação da superfície de um sólido que e geralmente envolve perda progressiva de material, devido ao movimento relativo desta superfície com uma ou mais substâncias em contato
- **Tribologia**: ciência que estuda o desgaste e o atrito, ou seja, a interação de superfícies em movimento e de técnicas relacionadas às mesmas
- Onde há atrito há desgaste
- Para vencer o atrito são despendidas quantidades enormes de energia

# DESGASTE

## ATRITO

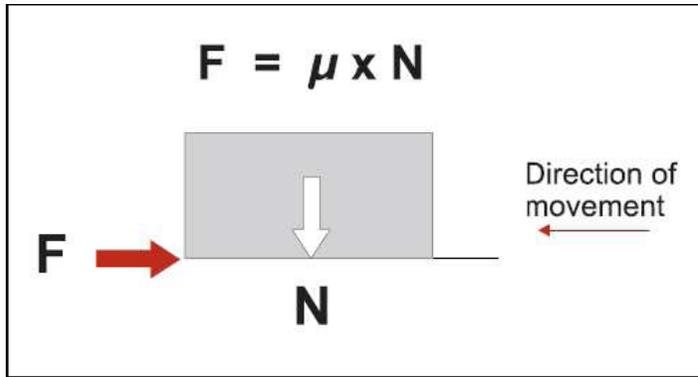
### EFEITOS NEGATIVOS

- Se o atrito não existisse a eficiência de motores, transmissões, etc. aumentaria.
- O tempo de vida de componentes e equipamentos aumentaria.
- Não haveria desgaste, desajustes, vibrações e ruídos.

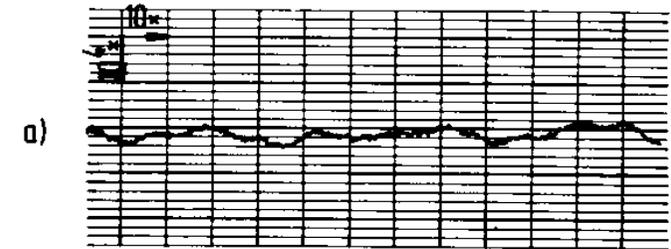
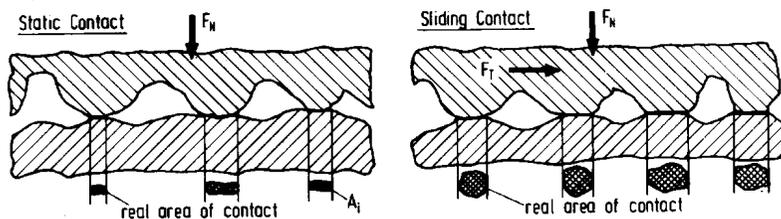
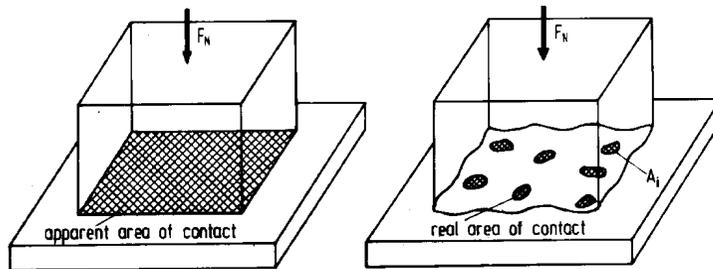
### EFEITOS POSITIVOS

- Sem o atrito não seria possível escrever com um lápis.
- Também não seria possível andar, nem breicar um carro.
- Qualquer objeto colocado sobre um plano levemente inclinado não pararia no lugar.

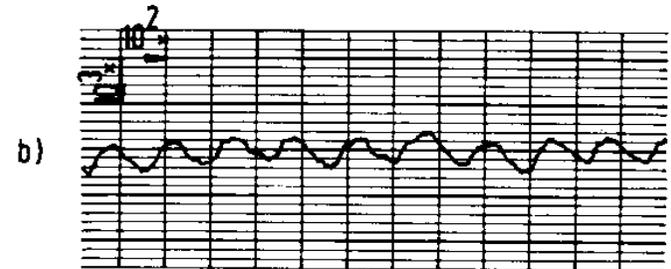
# DESGASTE



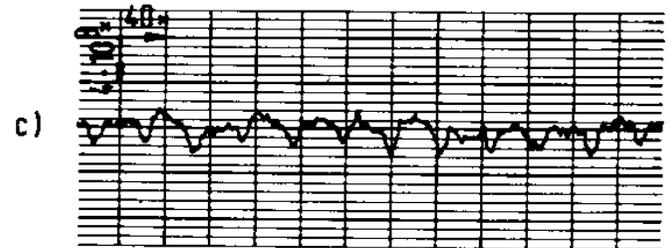
- Depende da interação entre asperezas
- A área de contato real é diferente da área aparente.



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



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



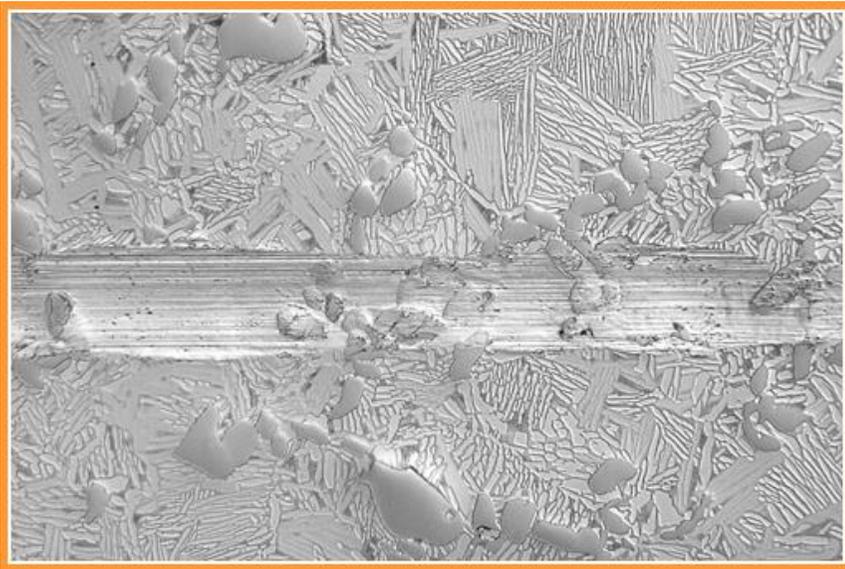
$R_a = 0.42\mu\text{m}$  ,  $R_t = 3.21\mu\text{m}$

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

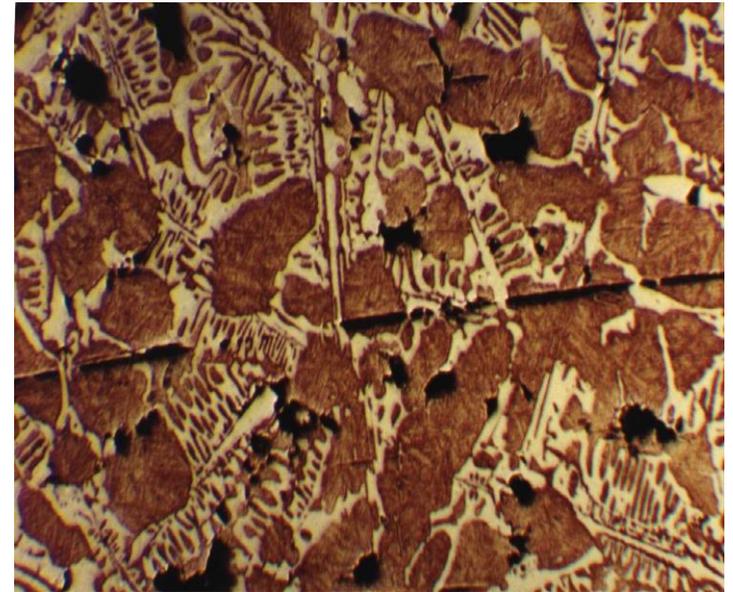
# DESGASTE

Os principais fatores de desgaste são:

- **Material:** Dureza, tenacidade, composição química, constituição e microestrutura.
- **Processo:** Materiais em contato, pressão, velocidade, temperatura e acabamento superficial.
- **Outros:** Lubrificação, corrosão.

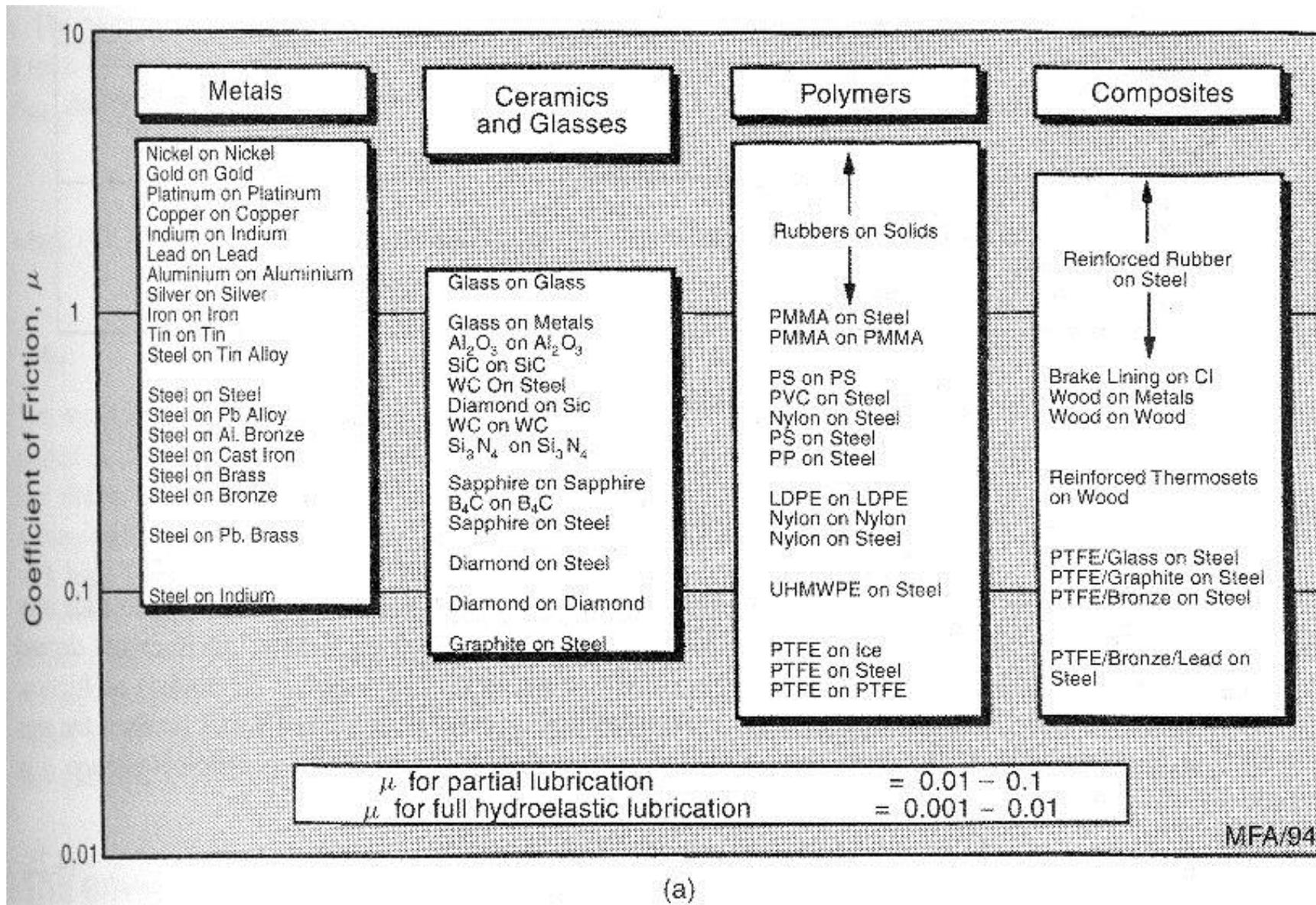


Ti-W(TiC)



Cilindro de laminação

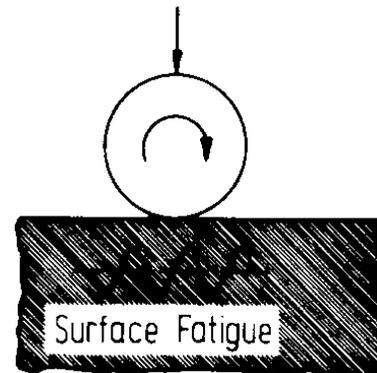
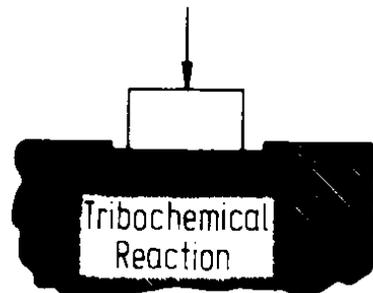
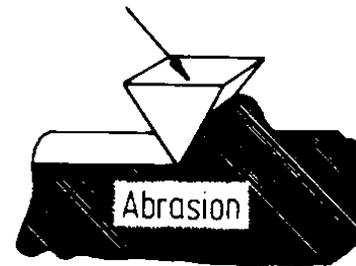
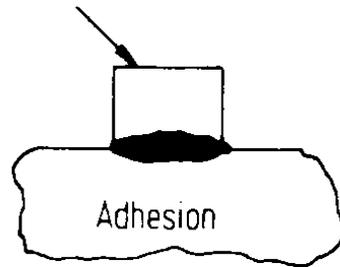
# DESGASTE



(a)

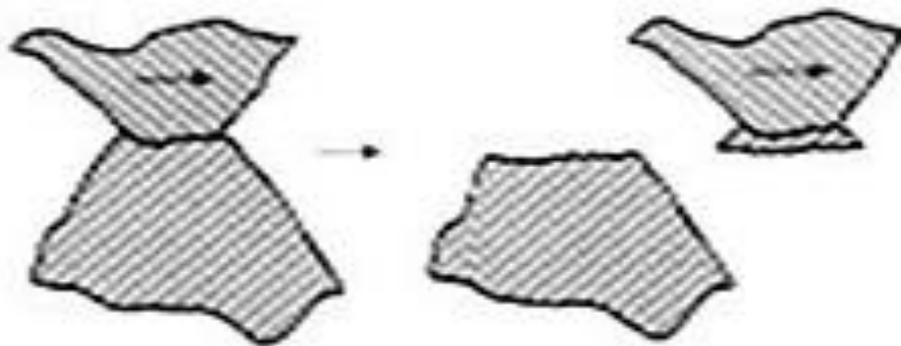
# DESGASTE

- De acordo com a norma DIN 50320 há quatro mecanismos básicos de desgaste :
  - Adesão
  - Abrasão
  - Reação tribo-química
  - Fadiga superficial



# DESGASTE

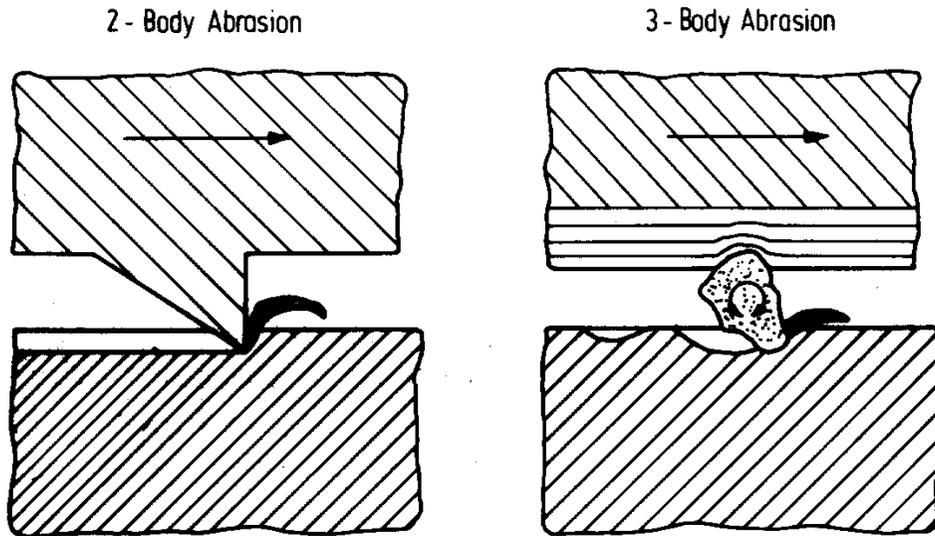
**Desgaste adesivo:** ocorre quando duas superfícies escorregam uma em relação à outra. Pressões locais muito altas são exercidas pelas asperezas em contato, com deformação plástica, adesão e formação de junções.



# DESGASTE

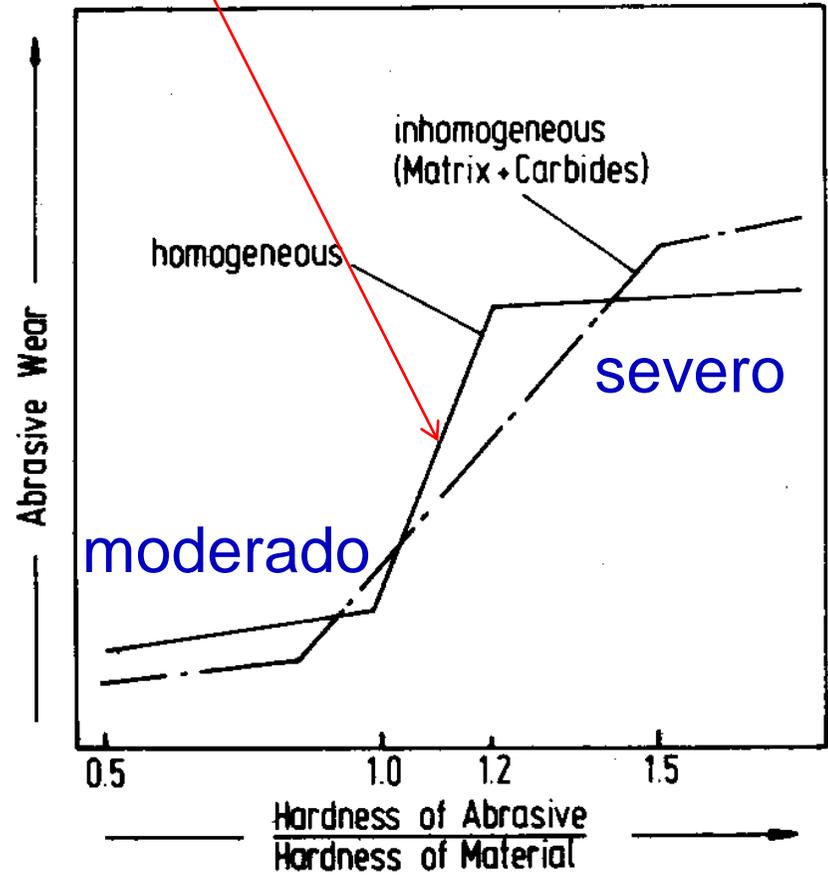
- **Desgaste abrasivo:** ocorre quando há deslocamento de material provocado por partículas de alta dureza existentes entre as duas superfícies em movimento ou embebidas em uma ou nas duas superfícies em movimento.
- As partículas de alta dureza podem ter como origem, por exemplo, o produto do processamento 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

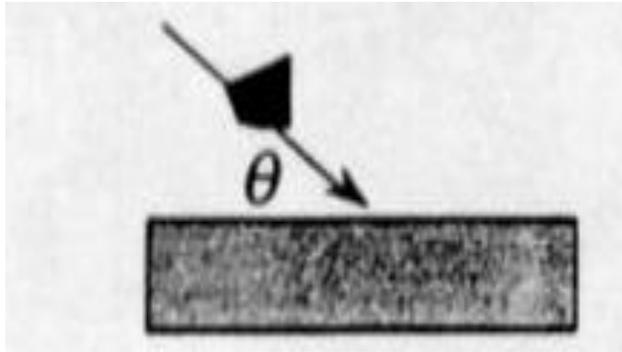


Abrasão a dois corpos e a três corpos

transição



# DESGASTE

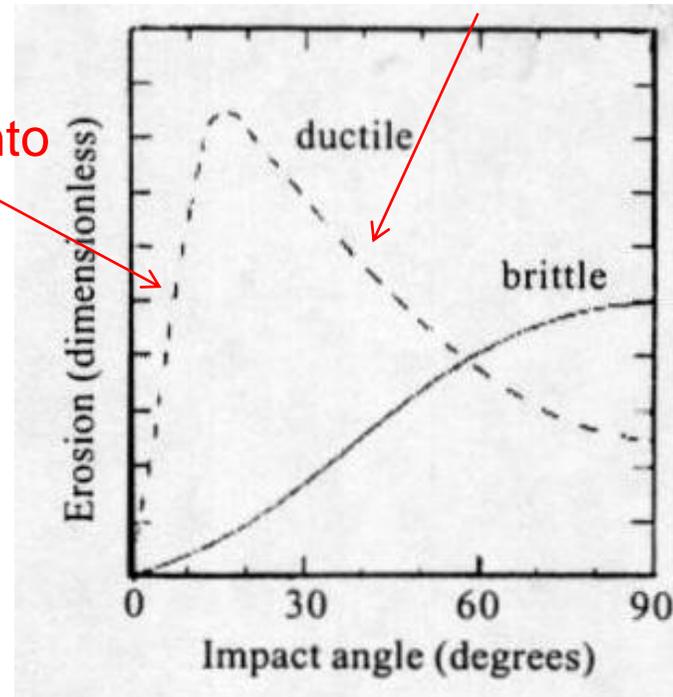


$$E = k V^n f(\theta)$$

↑  
velocidade

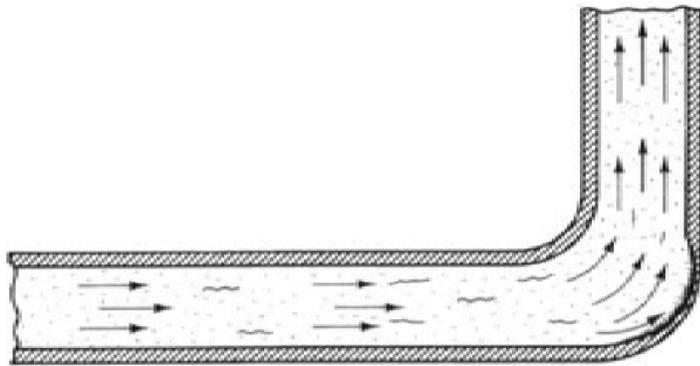
cisalhamento

Aumento do encruamento



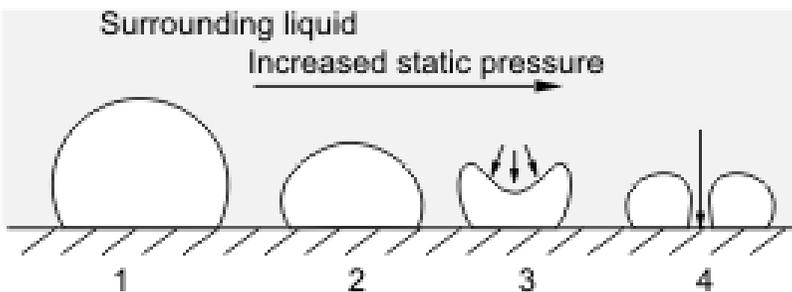
- Partículas duras e agudas produzem as taxas mais altas Quando a remoção é por fratura.
- O expoente da velocidade pode variar até 6.
- O grau de erosão diminui com o tamanho das partículas (menor que  $1\mu\text{m}$  quase não há erosão)

# DESGASTE

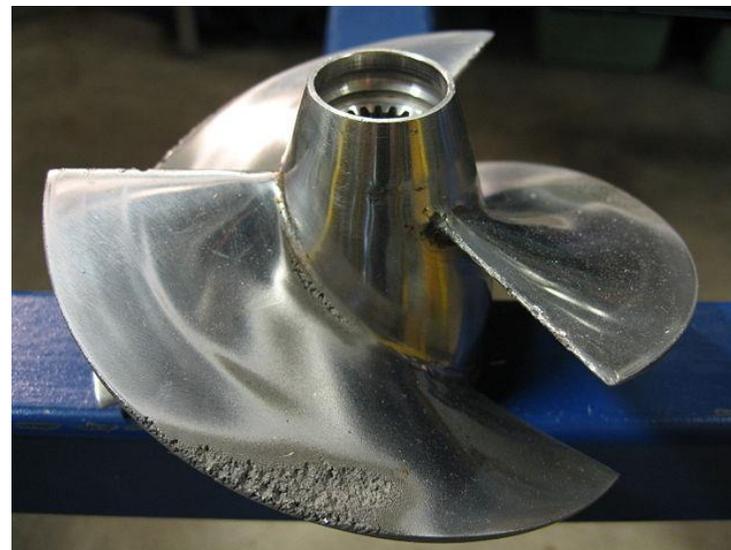


Transporte pneumático  
Transporte de lamas e concreto

## CAVITAÇÃO

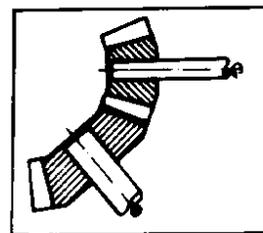
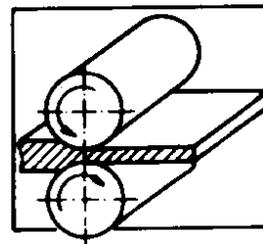
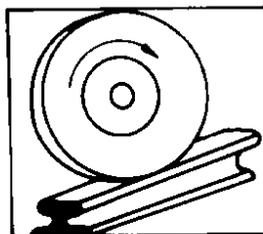


Cavitation bubble imploding close to a fixed surface generating a jet (4) of the surrounding liquid.

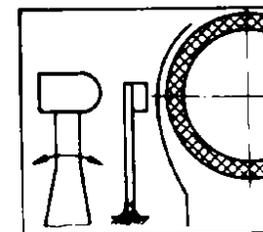
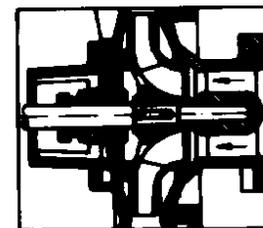
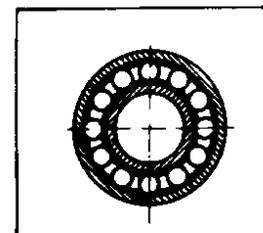
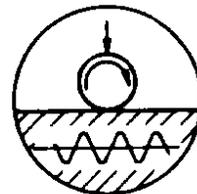


# DESGASTE

- **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.

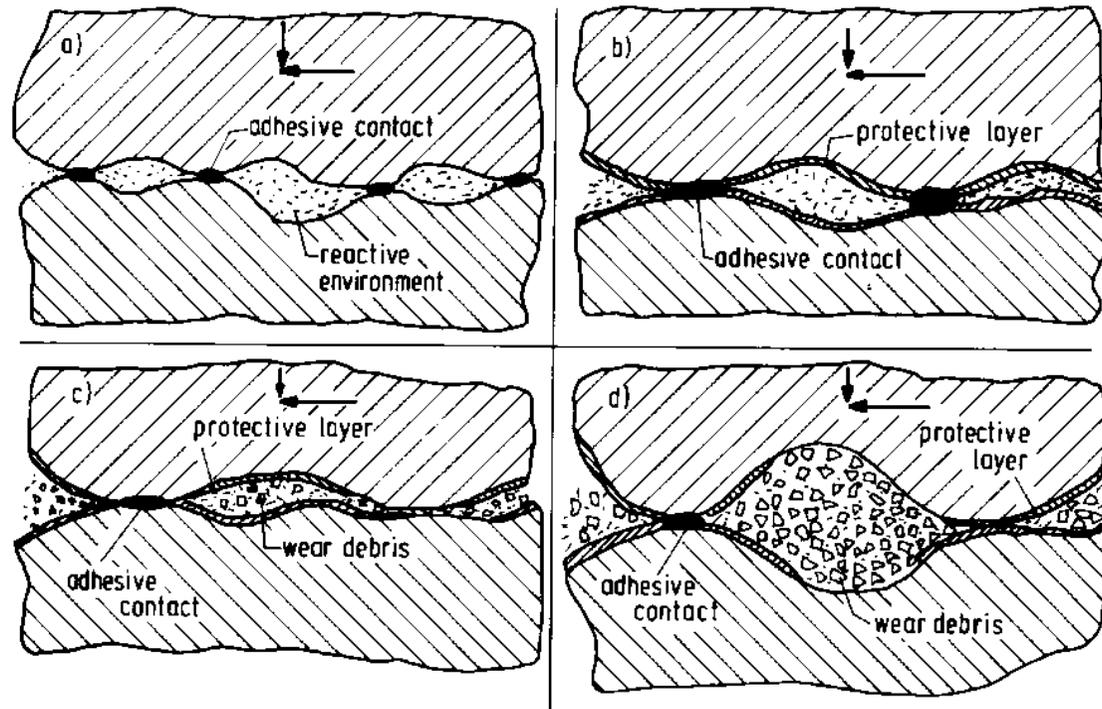


Surface Fatigue



# DESGASTE

- **Desgaste por reação tribo-química:** 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.



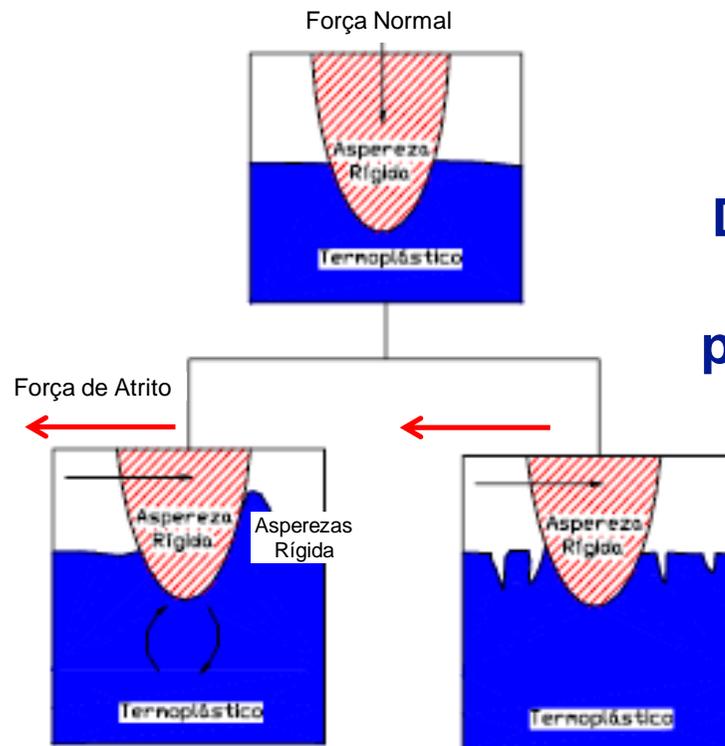
# DESGASTE

Atrito em **polímeros**  
depende



- Contato elástico
  - Índice de plasticidade
  - Par de materiais em contato
- 
- O desgaste abrasivo ocorre quando a deformação da superfície do polímero excede o limite elástico.
  - Os mecanismos são determinados pelas tensões de contato atuantes, bem como pelas características superficiais tais como dureza e acabamento.

# DESGASTE

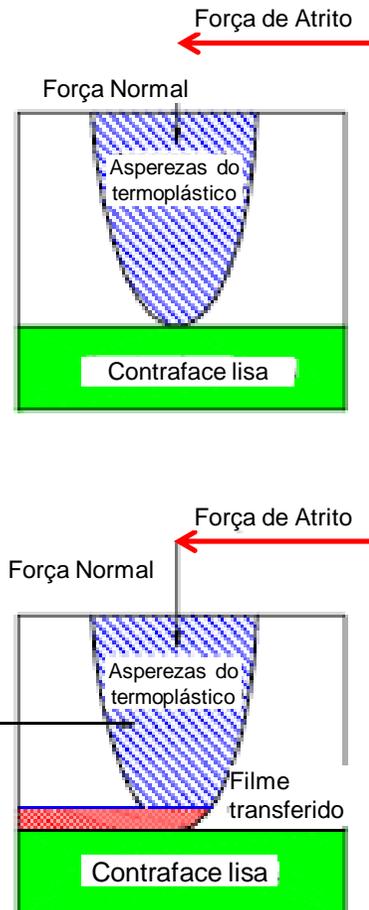


**Dissipação de energia de atrito e desgaste em polímeros termoplásticos.**

- Deformação plástica
- Perdas plásticas
- Perdas visco-elásticas

Dano por fadiga e abrasão  
(corte, rasgamento, trincas)

# DESGASTE



Formação de união adesiva seguida de transferência de filme ou amolecimento da superfície

# CORROSÃO/DECOMPOSIÇÃO

- **Definição:** Destruição ou inutilização para o uso de um material pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra
- O processo de desgaste mecânico pode ocorrer simultânea e complementarmente, resultando num efeito sinérgico: o dano provocado será maior do que a soma dos danos que seriam provocados por cada um dos processos atuando separadamente

# CORROSÃO/DECOMPOSIÇÃO

**Metais:** a deterioração ocorre pela dissolução do material, com ou sem a formação de produtos sólidos (óxidos, sulfetos, hidróxidos). Esse fenômeno é denominado corrosão. A deterioração também pode ocorrer pela reação em atmosferas a alta temperatura, formando camadas de óxidos. Esse fenômeno se chama oxidação. Ambos são processos eletroquímicos.

•**Cerâmicas:** a deterioração (que também pode ser chamada corrosão) ocorre somente em temperaturas elevadas ou em ambientes muito agressivos. Estes materiais são muito resistentes à deterioração.

# CORROSÃO/DECOMPOSIÇÃO

**Polimeros:** Mudanças químicas que resultam em mudanças indesejáveis nas propriedades do material. Em alguns casos a degradação é acompanhada de diminuição da massa molecular

IUPAC – Pure & Appl. Chem., **68** (1996) 2313-2323

# PRINCIPAIS REAÇÕES EM CORROSÃO

## · ANÓDICAS:

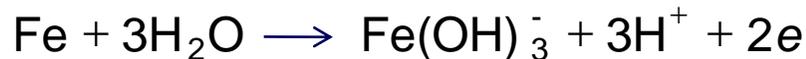
- *dissolução via íon aquoso* :



- *passivação* :



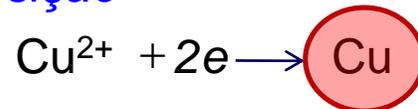
- *dissolução via íon hidrolisado* :



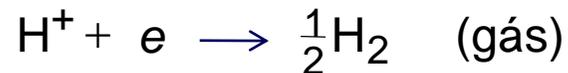
## REAÇÕES DE OXIDAÇÃO

## · CATÓDICAS:

- *deposição*



- *redução do hidrogênio* :



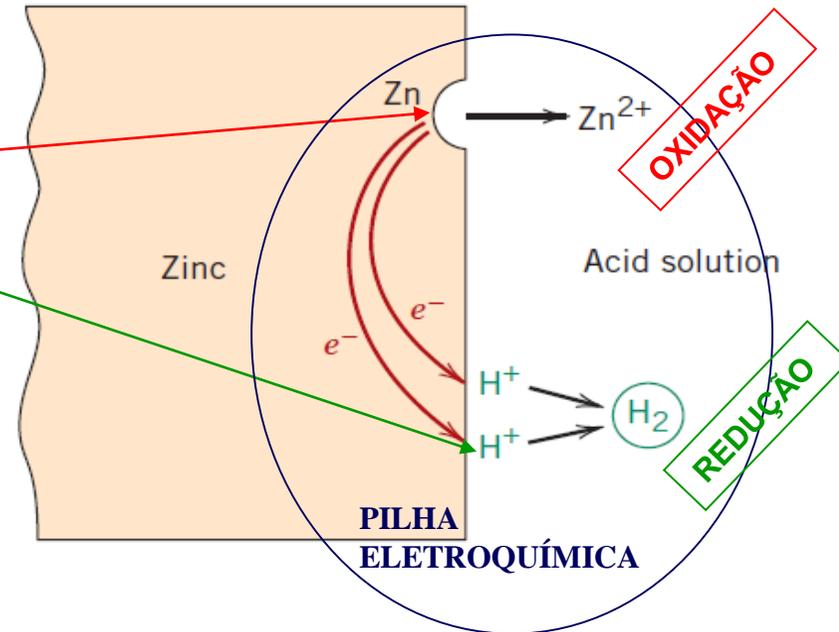
- *redução do oxigênio* :



## REAÇÕES DE REDUÇÃO

# PROCESSO CORROSIVO

- Um processo corrosivo consiste na ocorrência simultânea de pelo menos uma reação **anódica** e de pelo menos uma reação **catódica**. A carga elétrica produzida na reação anódica é totalmente absorvida pela reação catódica.
- Se a solução é uma boa condutora, o metal que sofre corrosão assume um potencial de eletrodo, que é chamado *potencial de corrosão*.



# TENDÊNCIA À CORROSÃO

## POTENCIAL DE ELETRODO PADRÃO (PEP) DE ALGUNS METAIS

<i>Electrode Reaction</i>	<i>Standard Electrode Potential, <math>V^0</math> (V)</i>
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Au}$	+1.420
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.229
$\text{Pt}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Pt}$	~+1.2
$\text{Ag}^+ + e^- \longrightarrow \text{Ag}$	+0.800
$\text{Fe}^{3+} + e^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0.771
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \longrightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0.401
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cu}$	+0.340
$2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2$	0.000
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}$	-0.136
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Ni}$	-0.250
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Co}$	-0.277
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cd}$	-0.403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Cr}$	-0.744
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Zn}$	-0.763
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Al}$	-1.662
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Mg}$	-2.363
$\text{Na}^+ + e^- \longrightarrow \text{Na}$	-2.714
$\text{K}^+ + e^- \longrightarrow \text{K}$	-2.924

Maior inércia

Comportamento catódico

REDUÇÃO

Maior reatividade

Comportamento anódico

OXIDAÇÃO

# VELOCIDADE OU TAXA DE CORROSÃO

- O fluxo de corrente permite a estimativa da perda de metal ou corrosão, dado pelas leis de Faraday de eletrólise

$$\Delta m = \frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F}$$

Onde: I=corrente(A); t=tempo(s); M=massa atômica(g/mol); n=valência;  
F=constante de Faraday=96500 C

- A taxa de corrosão pode ser representada por  $\Delta m/t$  (g/s). Se a corrosão ocorre numa área uniforme pode-se converter a massa em espessura corroída
- A taxa de corrosão em mm/ano é:

$$\frac{mm}{ano} = \frac{3,65 \cdot \Delta m}{S \cdot t \cdot \rho}$$

Onde: S=área(cm<sup>2</sup>); t=tempo(dias);  $\rho$ =densidade(g/cm<sup>3</sup>);  $\Delta m$ =perda de massa(mg)

# PRINCIPAIS TIPOS DE CORROSÃO

- Corrosão generalizada
  - *Corrosão atmosférica*
  - *Corrosão por líquidos*
- Corrosão galvânica
- Corrosão localizada
  - *Corrosão por pite*
  - *Corrosão em fresta*
- Corrosão intergranular
- Corrosão seletiva
  - *Corrosão grafítica*
  - *Dezincificação*
- Corrosão microbiológica
- Corrosão por correntes de fuga
- Corrosão filiforme
- Corrosão associada a tensões mecânicas
  - *Corrosão sob tensão*
  - *Fadiga sob corrosão*
  - *Erosão - corrosão*
  - *Cavitação - corrosão*
- Corrosão por atrito

# PRINCIPAIS TIPOS DE CORROSÃO



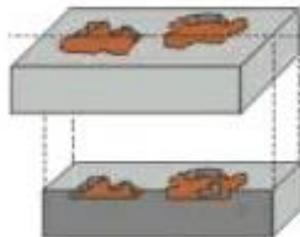
CHAPA SEM  
CORROSÃO



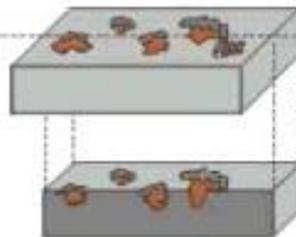
CORROSÃO  
UNIFORME



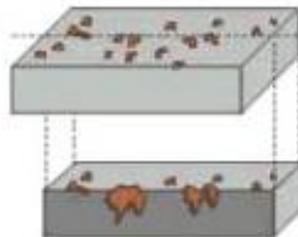
CORROSÃO  
INTERGRANULAR  
(Vista da área exposta)



CORROSÃO  
EM PLACAS



CORROSÃO  
ALVEOLAR



CORROSÃO  
PUNTIFORME  
(PITE)



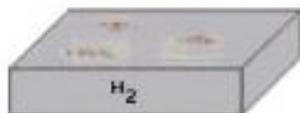
CORROSÃO  
INTERGRANULAR  
(MICROGRAFIA)



CORROSÃO  
FILIFORME



CORROSÃO  
INTERGRANULAR  
(MICROGRAFIA)



EMPOLAMENTO  
PELO HIDROGÊNIO



CORROSÃO  
ENTORNO DE SOLDA



CORROSÃO POR  
ESFOLIAÇÃO

# CORROSÃO GENERALIZADA E CORROSÃO GALVÂNICA

**Corrosão generalizada:** as reações de oxidação e de redução ocorrem aleatoriamente na superfície exposta da peça, o que resulta em superfícies com o mesmo grau de corrosão.



# CORROSÃO GENERALIZADA E CORROSÃO GALVÂNICA

30

**Corrosão galvânica:** ocorre quando dois metais de composições químicas diferentes e em contato mútuo são expostos a um eletrólito. Nesse meio específico, o metal menos nobre (o mais reativo) sofrerá corrosão, e o metal mais nobre será protegido contra ela.



Cobre

Aço galvanizado

A proteção catódica com anodo de sacrifício é um caso de corrosão galvânica. A proteção catódica fornecida por revestimentos anódicos em falhas é também um caso de corrosão galvânica.

# CORROSÃO LOCALIZADA

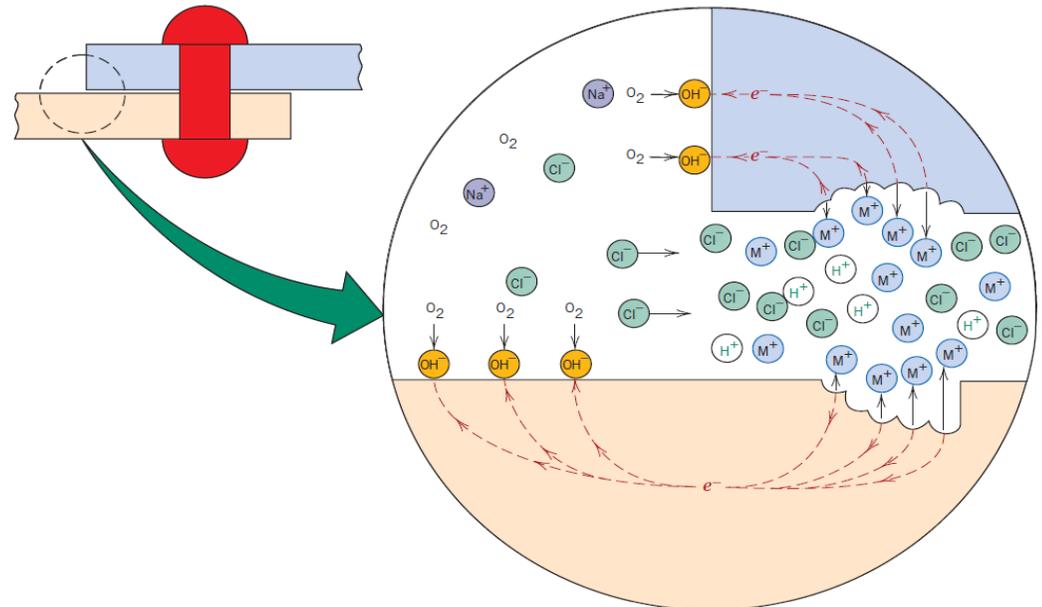
## Corrosão por pite:

- Ocorre em metais passivos na presença de íons cloreto.
- Os íons cloreto rompem localmente a película passiva e evitam a repassivação do metal
- Como as condições são de estagnação no interior do pite, forma-se aí uma solução ácida, o que possibilita um rápido crescimento do pite para o interior do material por um mecanismo semelhante ao da corrosão galvânica.



## Corrosão em fresta

- Ocorre em frestas nas quais a solução consegue penetrar.
- As condições estagnadas e o empobrecimento em oxigênio favorecem o enriquecimento em íons cloreto, os quais acabam rompendo a película passiva.
- Passa-se então a ter um mecanismo semelhante ao da corrosão por pite.

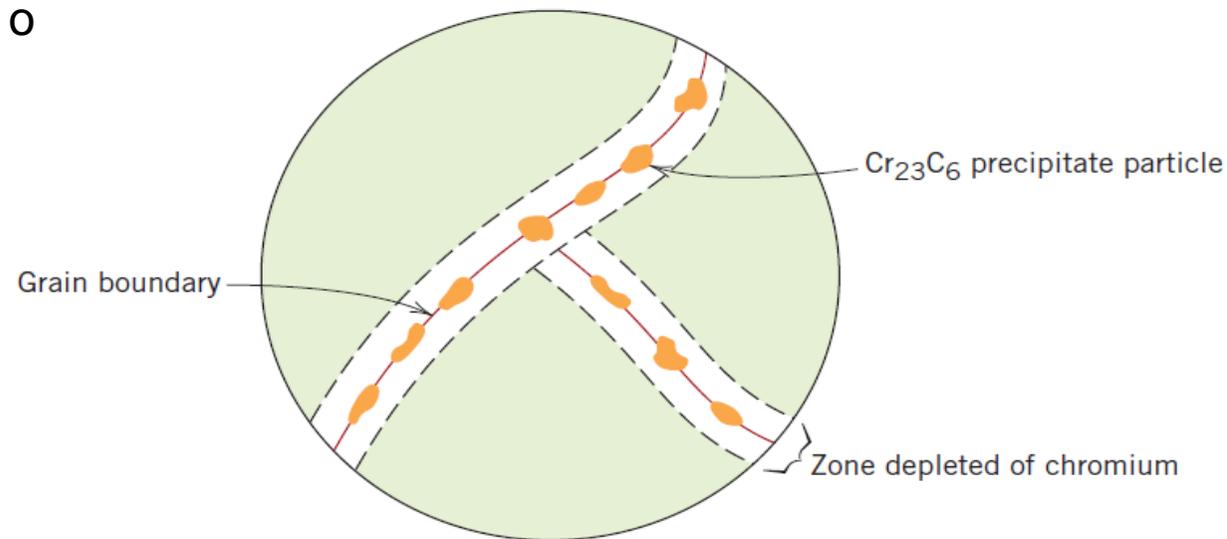
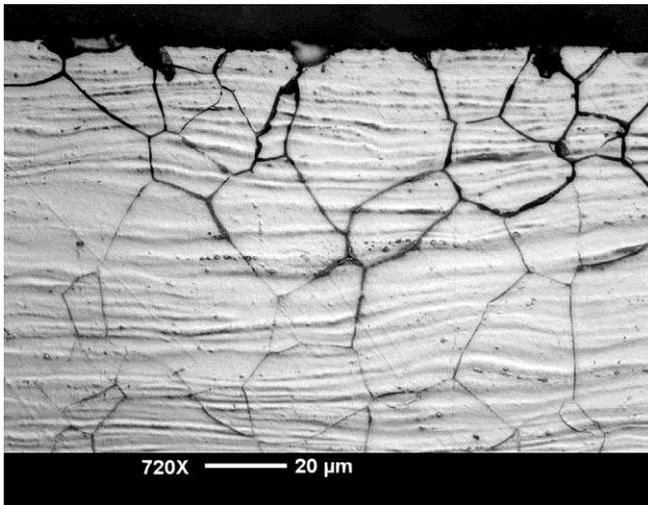


# CORROSÃO INTERGRANULAR

33

A corrosão intergranular ocorre nos contornos de grão. Por causa deste tipo de corrosão, uma amostra pode se desintegrar pelo desprendimento dos grãos. Nos aços inoxidáveis ela é causada pela **precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão**, a qual provoca **empobrecimento em cromo** nas regiões vizinhas (sensitização).

Com o teor de cromo atingindo teores inferiores a 12%, a passividade dessas regiões fica comprometida, e o aço sofre dissolução seletiva.

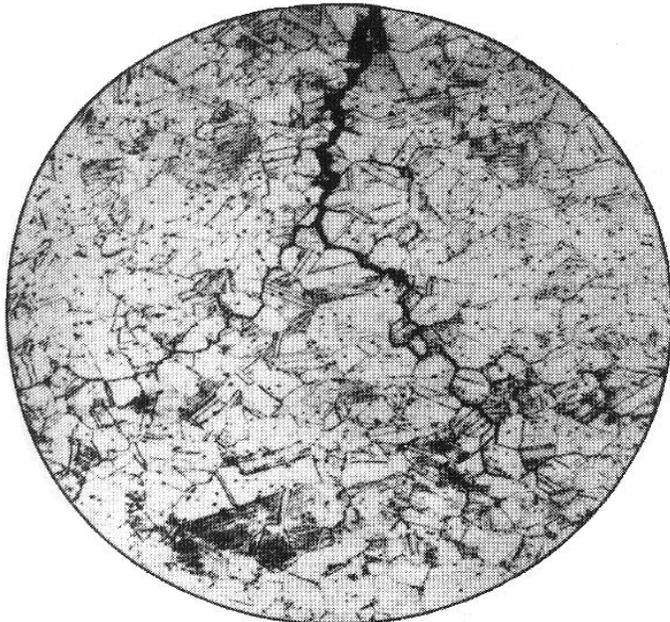


Nas ligas Al-Mg a corrosão intergranular é devida à precipitação no contorno de grão de Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> que é anódico com relação à liga. É este composto que é corroído preferencialmente, por um processo de corrosão galvânica.

# CORROSÃO ASSOCIADA A TENSÕES MECÂNICAS

## Corrosão sob tensão (CST) :

- Causada pela ação simultânea de: (1) tensões de tração (aplicadas e/ou residuais) e (2) meio corrosivo (específico)
- A CST provoca formação de trincas que podem levar à ruptura do material
- Na indústria de processos químicos ela é uma das principais causas de falhas em serviço.



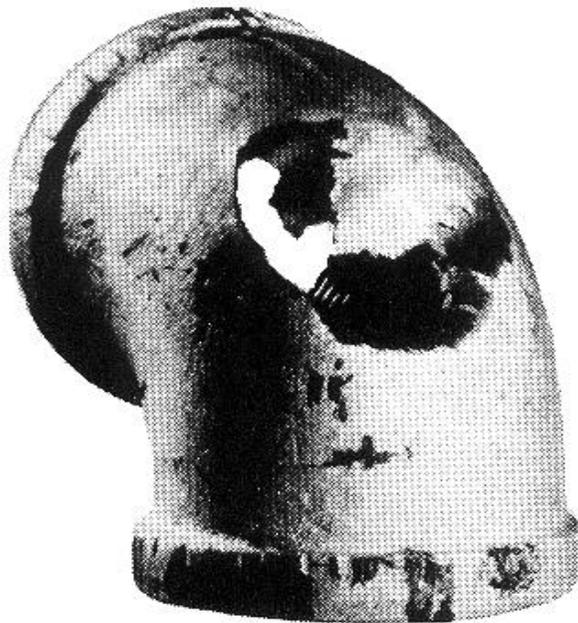
Trinca intergranular ramificada provocada por CST num latão exposto à atmosfera amoniacal.

# CORROSÃO ASSOCIADA A TENSÕES MECÂNICAS

35

## Erosão-corrosão :

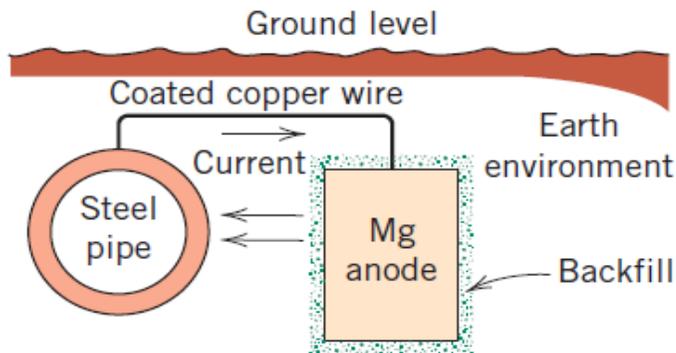
- ação combinada e simultânea de ataque eletroquímico e de erosão
- A erosão se deve ao movimento do fluido. Quanto maior a sua velocidade, maior é o dano provocado
- Nas curvas o dano é maior, devido ao aumento do atrito do fluido com a superfície do metal.



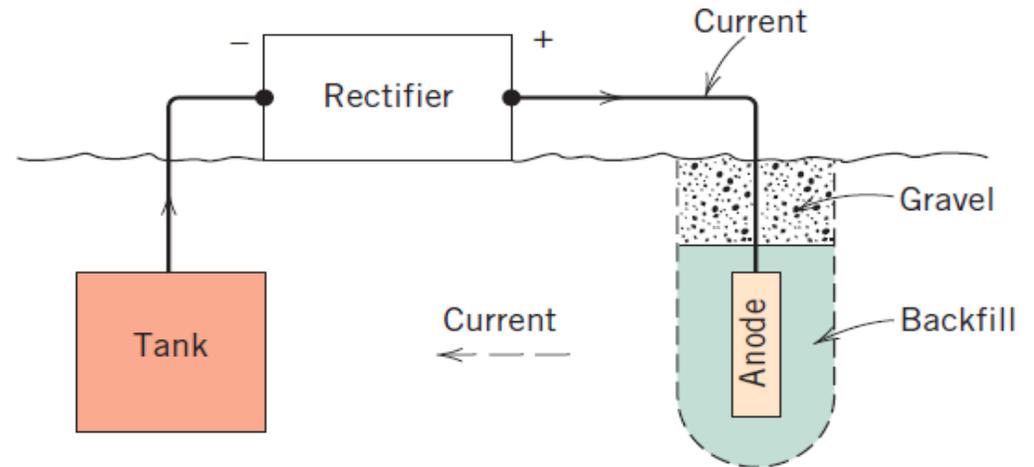
Perfuração por erosão-corrosão em um cotovelo que pertencia a uma linha de condensação de vapor.

# PROTEÇÃO CATÓDICA

POTENCIAL DE ELETRODO PADRÃO, V	
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Co}$	-0.277
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cd}$	-0.403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Cr}$	-0.744
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Zn}$	-0.763
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Al}$	-1.662
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Mg}$	-2.363
$\text{Na}^+ + e^- \longrightarrow \text{Na}$	-2.714



(a)

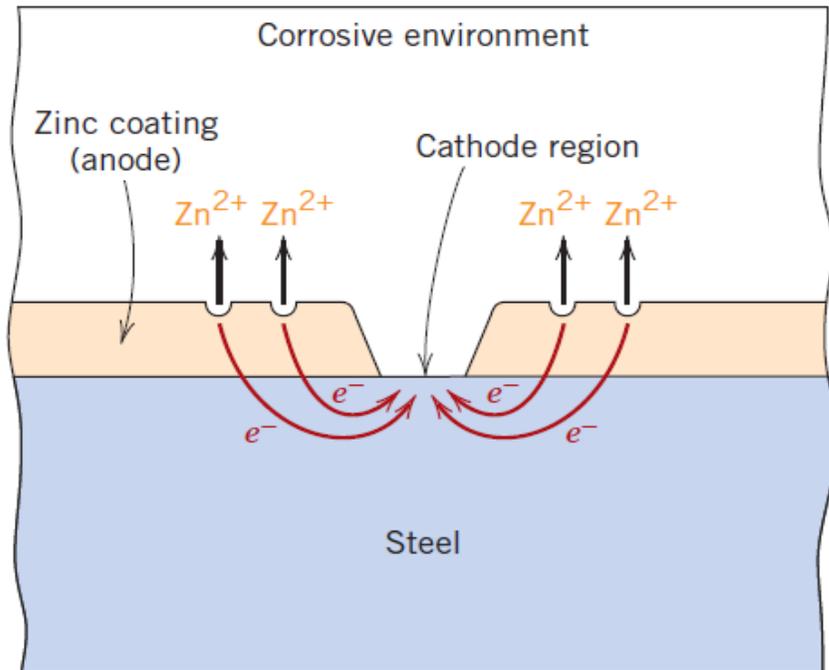


(b)

- (a) tubulação subterrânea com a utilização de **anodos de sacrifício** (de **magnésio**)
- (b) tanque subterrâneo com o uso de **corrente impressa**. Nos dois casos o potencial de eletrodo da estrutura sendo protegida é levado para a região de imunidade

# PROTEÇÃO CATÓDICA

Um revestimento de zinco (anódico) aplicado sobre aço confere-lhe proteção por barreira além de proteger o aço exposto em pequenas falhas pelo mecanismo de proteção catódica.



## POTENCIAL DE ELETRODO PADRÃO, V

$Co^{2+} + 2e^- \longrightarrow Co$	-0.277
$Cd^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cd$	-0.403
$Fe^{2+} + 2e^- \longrightarrow Fe$	-0.440
$Cr^{3+} + 3e^- \longrightarrow Cr$	-0.744
$Zn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Zn$	-0.763
$Al^{3+} + 3e^- \longrightarrow Al$	-1.662
$Mg^{2+} + 2e^- \longrightarrow Mg$	-2.363
$Na^+ + e^- \longrightarrow Na$	-2.714



# PASSIVAÇÃO

- A reação de passivação conduz à formação de uma fina película de um composto (geralmente **óxido** e com espessura **nanométrica**) na superfície do metal (*película passiva*), película contínua e aderente, a qual protege o metal contra a corrosão.
- Exemplos:
  - O alumínio, apesar de ser um metal extremamente reativo, tem uma elevada resistência à corrosão devido à presença na sua superfície de uma película passiva de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
  - O aço inoxidável, que é uma liga de Fe-Cr (com teor de Cr maior de 12% em peso), deve sua resistência à corrosão à película passiva de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

# DETERIORAÇÃO DE METAIS EM TEMPERATURAS ELEVADAS

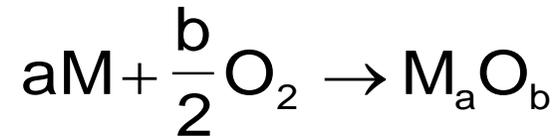
- Ocorre pelo processo de **oxidação** ou **corrosão quente**.
- **Oxidação:** processo eletroquímica de corrosão que ocorre quando o metal está em contato com uma atmosfera gasosa (em geral ar), sem que haja presença de eletrólito. O produto dessa reação é um óxido que se forma a partir da superfície do metal e pode ser protetor.
- **Corrosão quente:** processo eletroquímico de corrosão que ocorre quando o eletrólito é não-aquoso (sal líquido, óxido fundido). Ex.: corrosão de tubos de caldeira pelo  $V_2O_5$  que com outros óxidos chega a formar produto líquido em torno de  $500^\circ\text{C}$ .
- A velocidade de oxidação de um metal normalmente obedece a uma das três relações (outras relações são possíveis): **linear** ( $y = k_l t$ ), **parabólica** ( $y^2 = k_p t$ ) e **logarítmica** [ $y = k \log(t+1)$ ], onde  $y$  é a espessura ou massa por unidade de área da película de óxido,  $t$  é o tempo, e  $k$  é uma constante. Esta última é característica de processos de oxidação que ocorrem em baixas temperaturas.

# CAMADAS DE ÓXIDO PROTETORAS

- Proteção relativa oferecida por alguns óxidos:  $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{NiO} > \text{Cu}_2\text{O} > \text{FeO}$
- Óxidos com menos defeitos são mais protetores. A adição de elementos de liga de diferentes valências afeta o número de defeitos no óxido, tornando-o ou mais ou menos protetor. P.ex., a adição de Cr (em baixos teores) ao Ni torna o NiO menos protetor, enquanto a adição de Li torna-o mais protetor.
- A cinética de oxidação de metais que formam óxidos não protetores é normalmente linear.

# CAPACIDADE PROTETORA DE UMA CAMADA DE ÓXIDO

Quando um óxido  $\text{Me}_a\text{O}_b$  é formado a partir de um metal Me:



o índice de Pilling-Bedworth  $\Phi$  é dado pela relação:

$$\Phi = \frac{M_o \cdot \rho_M}{a \cdot M_M \cdot \rho_o} \quad \text{Índice de Pilling-Bedworth } (\Phi)$$

onde:  $M_o$  é a massa molecular do óxido,  $a$  é o número de átomos do metal (M) em uma molécula de óxido,  $M_M$  é a massa atômica do metal M, e  $\rho_o$  e  $\rho_M$  são as densidades do óxido e do metal, respectivamente.

$\Phi < 1$ : óxido não protetor

$1 < \Phi < 2-3$ : óxido protetor

$\Phi > 2-3$ : óxido não protetor

# ÍNDICES DE PILLING-BEDWORTH DE DIVERSOS METAIS

O índice não é definitivo para predizer o comportamento do óxido.

O seu desempenho depende da sua adesão sobre o metal, assim como da sua temperatura de fusão.

Óxido protetor		Óxido não protetor	
Me	$\Phi$	Me	$\Phi$
Ce	1,16	K	0,45
Al	1,28	Li	0,57
Pb	1,40	Na	0,57
Ni	1,52	Cd	1,21
Be	1,59	Ag	1,59
Pd	1,60	Ti	1,95
Cu	1,68	Ta	2,33
Fe	1,77	Sb	2,35
Mn	1,79	Nb	2,61
Co	1,99	U	3,05
Cr	1,99	Mo	3,40
Si	2,27	W	3,40

# CORROSÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS

- Podemos pensar nos materiais cerâmicos como materiais estáveis em relação à maior parte dos mecanismos de corrosão que acabaram de ser discutidos.
- Na maioria dos meios, esses materiais são altamente resistentes à corrosão.
- Em altas temperaturas, a corrosão desses materiais se dá através de processos de formação de fases vítreas e de dissolução. Ex.: corrosão de refratários usados em fornos de fusão de vidro (formação de fases vítreas).
- A corrosão por dissolução em meios ácidos específicos (HF, por exemplo) ou em meios alcalinos é favorecida, principalmente com o aumento da temperatura do sistema.
- Na temperatura ambiente, o processo de degradação de vidros não-tratados pode se iniciar com gotas d'água que se condensam na superfície deles (esse fenômeno é conhecido como intemperismo). Ex.: imagem de santa formada no vidro de um casarão antigo, que teve ampla divulgação na imprensa de São Paulo.

# DEGRADAÇÃO POLIMÉRICA E EFEITOS AMBIENTAIS



## Tabela. Principais agentes de degradação dos polímeros sintéticos.

Agente de degradação	Tipos de polímeros susceptíveis	Exemplos
Ácidos e bases	Polímeros de cadeias heterogêneas	Poliésteres, Poliuretanos
Umidade	Polímeros de cadeias heterogêneas	Poliésteres, Poliuretanos, Náilons
Radiação de alta energia	Polímeros alifáticos com carbonos quaternários	PP, LDPE, PMMA, Poli( $\alpha$ -metil estireno)
Ozônio	Polímeros insaturados	Poli(butadieno), Poli(isopreno)
Líquidos orgânicos/vapores	Polímeros amorfos	
Biodegradação	Polímeros de cadeias heterogêneas	Poliésteres, Poliuretanos, Nailons
Calor	Polímeros vinílicos	PVC, Poli( $\alpha$ -metil estireno)
Mecânica (aplicação de tensões)	Polímeros abaixo da $T_g$	

A degradação polimérica pode ser focalizada em base:

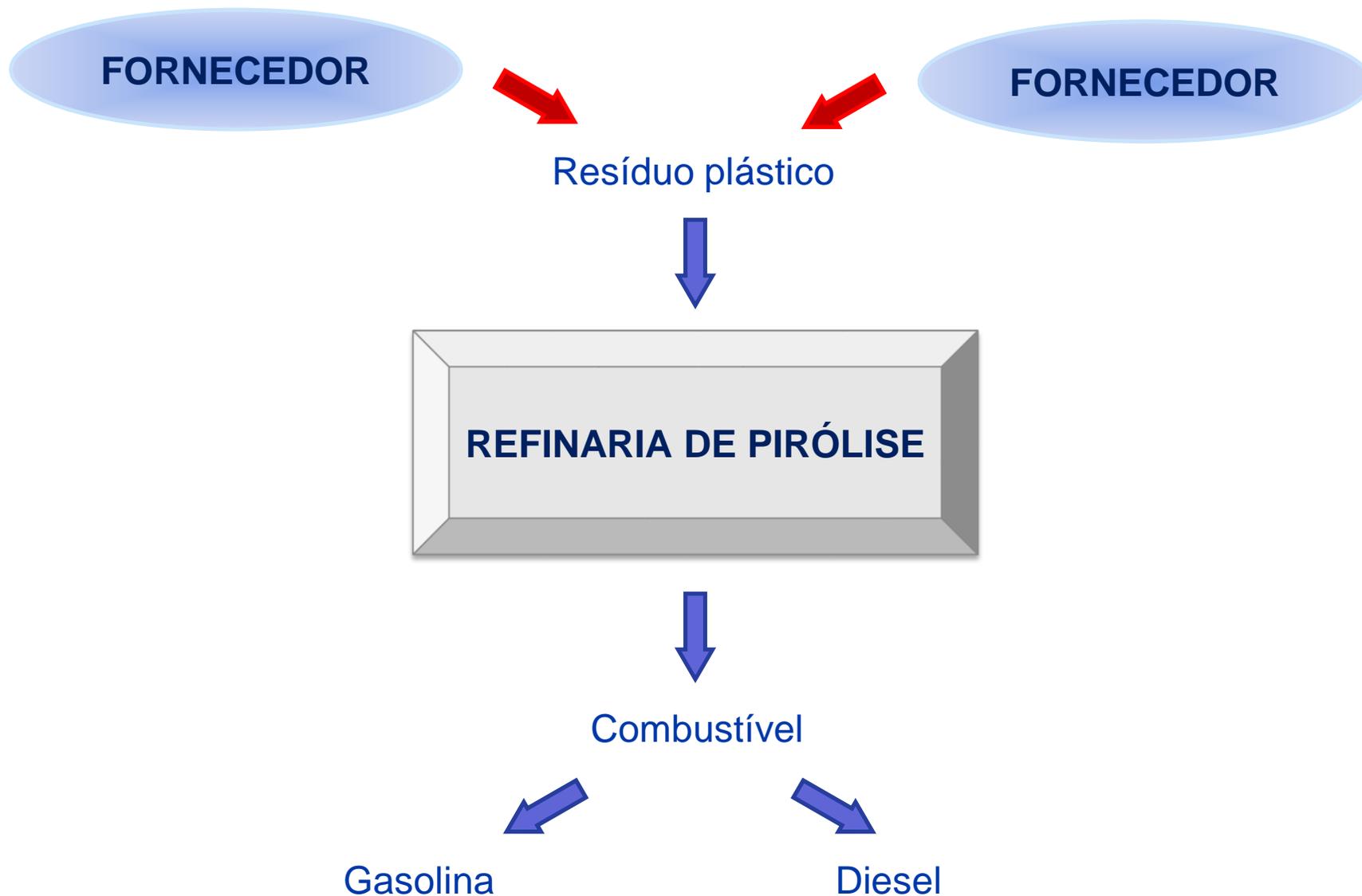
1) Aos fatores (mecanismos) responsáveis por ela:

- **Térmica;**
- **Termo-oxidativa;**
- **Foto-oxidativa**
- Foto-degradação;
- Hidrolítica;
- Química;
- Biológica;
- Mecânica;

2) Aos estágios da vida do material polimérico:

- ◊ Degradação no processamento por fusão;
- ◊ Envelhecimento por calor de longa duração ;
- ◊ Desgaste devido as intempéries.

# DECOMPOSIÇÃO A SERVIÇO DO AMBIENTE, SAÚDE E ECONOMIA



## REFERÊNCIAS

Gentil, Vicente – Corrosão. 6ª ed. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, RJ (2011).

De Paoli, M. A. – Degradação e Estabilização de Polímeros. 2.ed. São Paulo: Chemkeys (2008).

Rosa, D. S.; Filho, R. P. – Biodegradação: Um Ensaio com Polímeros. São Paulo: Moara (2003).

### Outras referências importantes

- Callister, 7ª ed. (2008) e 8ª ed. (2012), capítulo 17.
- Padilha, A.F. – Materiais de Engenharia. Hemus. São Paulo (1997); Capítulo 20.