



# **CAPITULO 1**

---

## **Introdução a corrosão**

**Profa. Maria José J. S. Ponte**  
**mponte@ufpr.br**



# Corrosão

---

## **1. OBJETIVOS:**

**Proporcionar aos participantes do curso os conhecimentos básicos sobre os processos corrosivos e os métodos para sua prevenção, com ênfase aos revestimentos protetores (metálicos, orgânicos, inorgânicos e compósitos), enfocando os princípios de sua aplicação e os métodos de inspeção.**



# 1.1- Corrosão

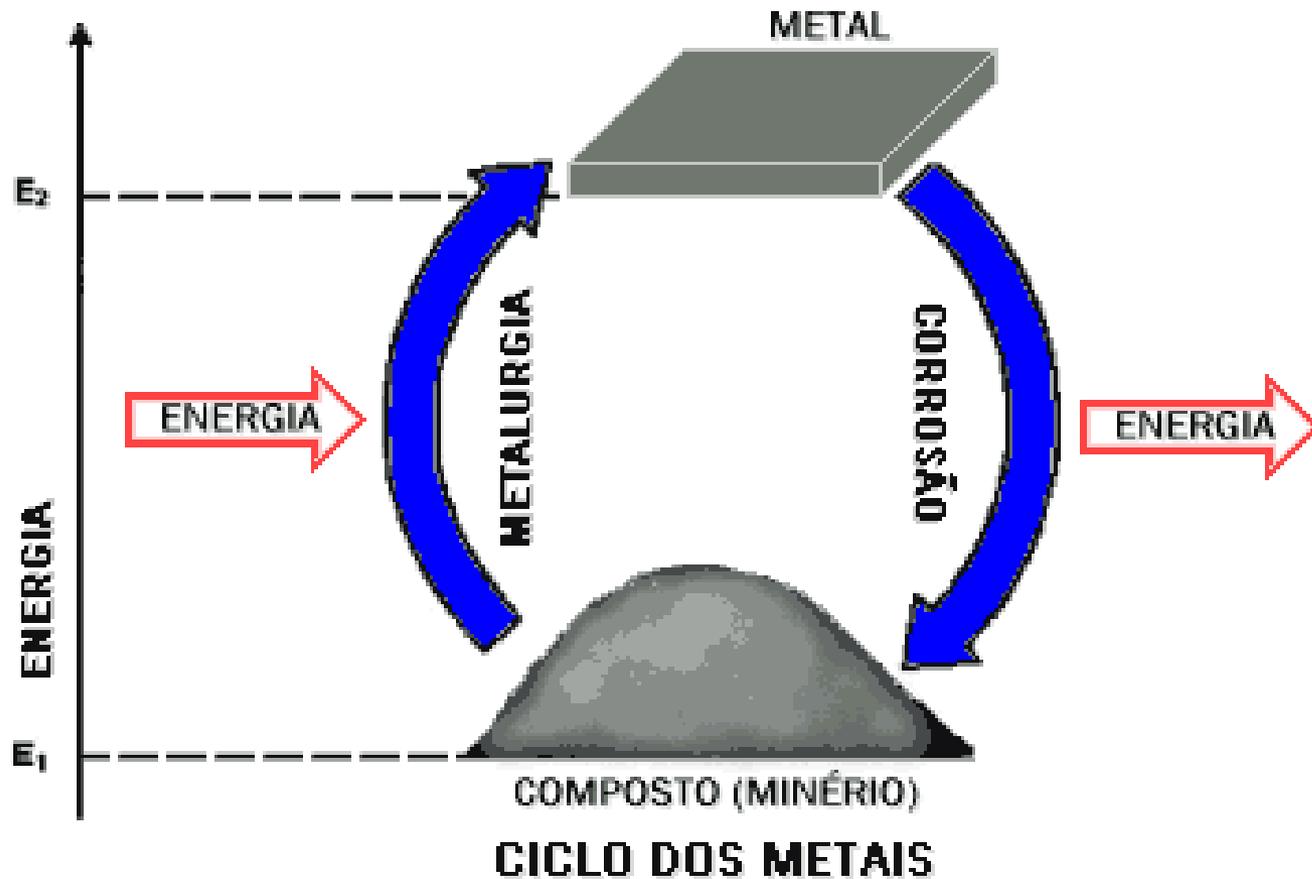
---

→ Um determinado tipo de deterioração dos metais, não se aplicando a materiais não metálicos (Ulhig).

→ A degradação sofrida pelo material ou modificações de suas propriedades através de reação com o meio ambiente.

*Reação:* eletroquímica, química ou estas duas associadas a uma ação física.

# Como ocorre a corrosão?



**Figura 1- Ciclo dos Metais**

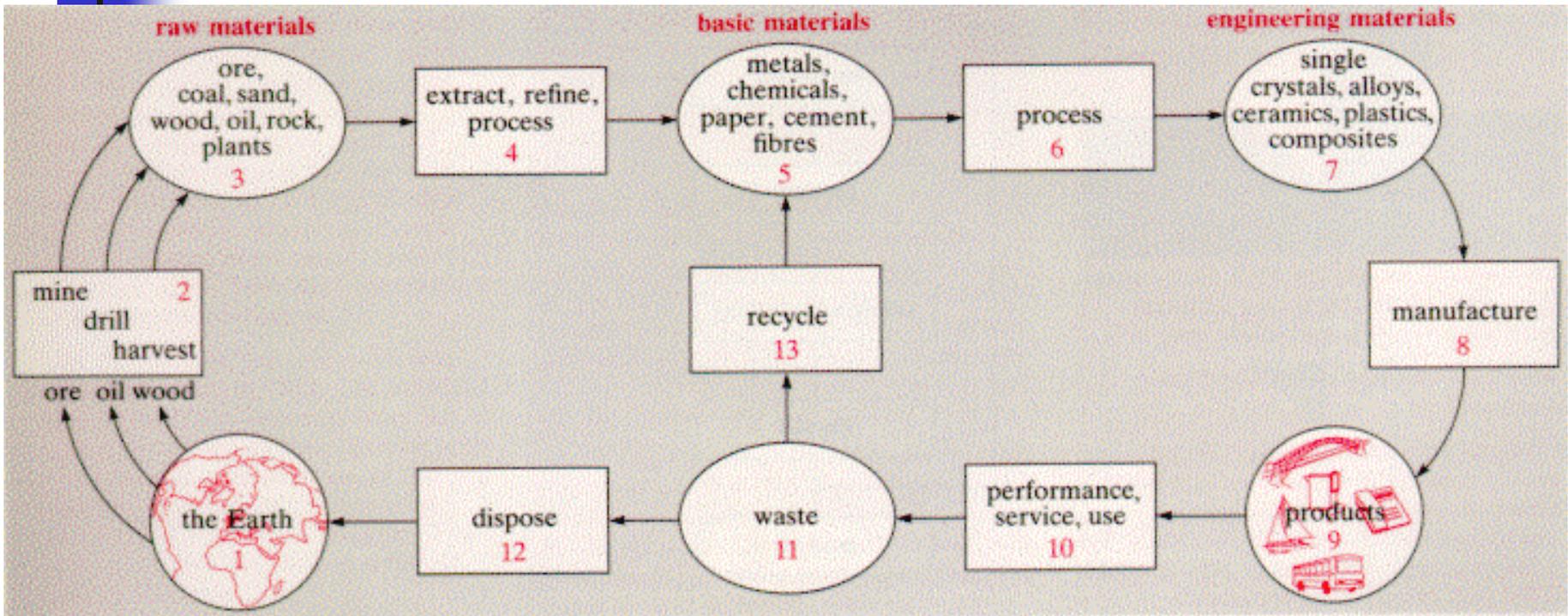
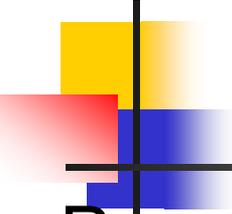


Figura 1.1 - CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS DE ENGENHARIA



---

## Processos que determinam o “fim” dos materiais

- Corrosão e degradação
  - Corrosão de metais
  - Corrosão de materiais cerâmicos
  - Degradação de polímeros
  
- Desgaste mecânico (estudado pela Tribologia)
  - Desgaste abrasivo
  - Erosão
  - Cavitação



**Figura 2- Corrosão em uma tubulação**



**Figura 3- Corrosão em um sistema de solda**



**Figura 4- Corrosão por alta temp. em bico queimador**



**Figura 5- Corrosão por fadiga em junta de expansão**



**Figura 6- Corrosão atmosférica em estátua**



**Figura 7- Corrosão localizada causada pelo solo**



**Figura 8- Corrosão atmosférica**



**Figura 9- Corrosão localizada e generalizada em duto de petróleo enterrado**



## 1.2- Problemas causados pela Corrosão

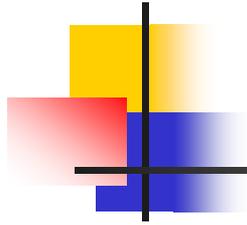
---

### a) Econômico

#### → Perdas Diretas

São perdas em que os seus custos de substituição de peças e de manutenção estão incluídos no projeto (como mão de obra, energia, custo de manutenção do processo).

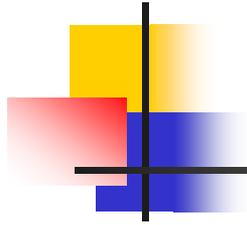
*Exemplo: Proteção Catódica, revestimentos orgânicos e etc.*



## → **Perdas Indiretas**

São perdas em que os seus custos não estão incluídos no projeto.

*Exemplos:* como paralisação acidental, perda de produto, contratação de terceiros e etc.



## **b) Ecológico**

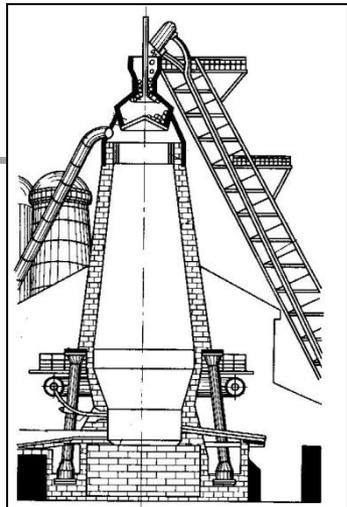
→ Preservação das reservas minerais.

→ Produção adicional destes metais para a reposição do que está sendo deteriorado.

→ Contaminação com produto de corrosão os efluentes.

**RESERVAS MINERAIS**

**MINÉRIO DE Fe**



**CARVÃO**



**Aço-carbono**

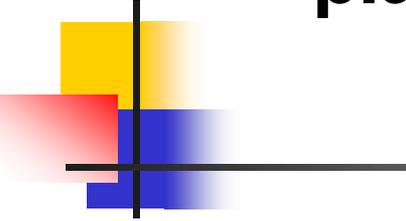


**Figura 11- Mineração no Pará**

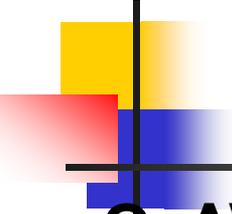


**Figura 10- Mineração de Ferro**

# Tabela 1- Mecanismos causadores de falha em plantas industriais (Ferrante- 2004)



<b>Mecanismo</b>	<b>%</b>
<b>Corrosão</b>	<b>29</b>
<b>Corrosão em alta temperatura</b>	<b>7</b>
<b>Cor. sob tensão/ fadiga combinada com cor./ fragilização por H<sub>2</sub></b>	<b>6</b>
<b>Fadiga</b>	<b>25</b>
<b>Fratura frágil</b>	<b>16</b>
<b>Sobrecarga</b>	<b>11</b>
<b>Fluência</b>	<b>3</b>
<b>Desgaste, abrasão e erosão</b>	<b>3</b>



# CUSTOS

---

- O AVANÇO E A OBSOLESCÊNCIA TECNOLÓGICA SÃO ÍNDICES IMPORTANTES NA DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DIRETOS E INDIRETOS CREDITADOS A CORROSÃO;

- CUSTOS ESTIMADOS:

ESTADOS UNIDOS: ALCANÇAM VALORES DA ORDEM DE  
240 MILHÕES DE DOLÁRES;

JAPÃO: 150 MILHÕES DE DOLÁRES;

ALEMANHA: 70 MILHÕES DE DOLÁRES.

REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS;

AÇO: 30 A 40 %

ALUMÍNIO: 60 A 70 %



**EX 1: EXPLOÇÃO DE CALDEIRA LTDA. (Curitiba – PR) DATA:  
27/10/2000 - MORTES: 02; FERIDOS:8 PERDAS: U\$ 100 mil**

**FIG. 12- CORROSÃO EM TUBOS DE CALDEIRA**



**FIG. 13- VAZAMENTOS PETRÓLEO**



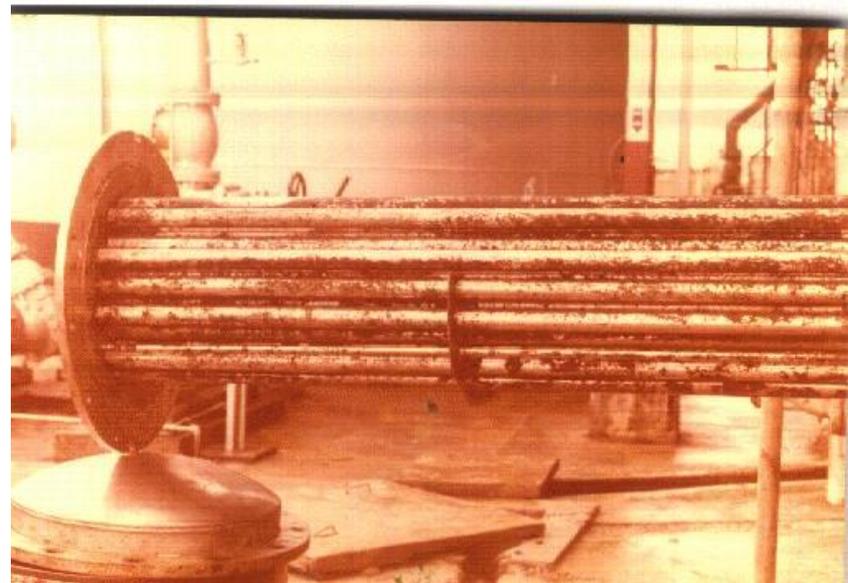


Bombeiros isolam região nos Jardins que teria sido afetada pelo vazamento de gasolina de um posto ontem à tarde em São Paulo

**RISCO** Bombeiros desocupam dois prédios no Jardim Europa, na zona oeste de São Paulo

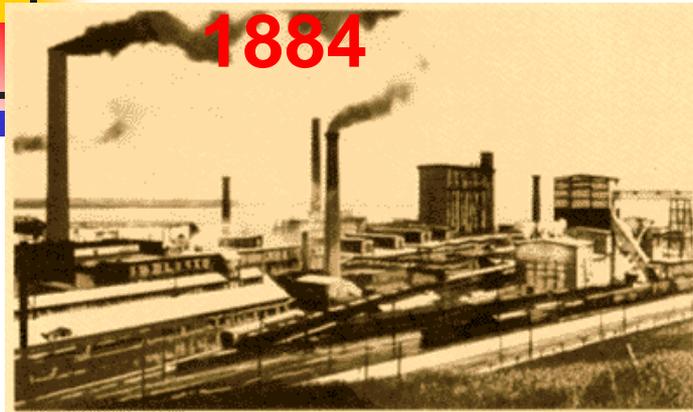
# Gasolina vaza e assusta moradores

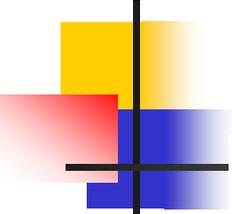
**FIG. 14- CONTAMINAÇÕES PROVOCADAS POR POSTOS DE GASOLINA**



**EX. 2- CORROSÃO EM  
BANCADA DE TC**

# EX. 3- POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA



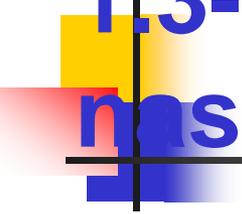


# CUSTO DO MATERIAL

## CUSTO RELATIVO DOS MATERIAIS

<b>Materiais</b>	<b>Custo relativo</b>	<b>Materiais</b>	<b>Custo relativo</b>
Aço-carbono estrutural	1,00	Aço inoxidável tipo 321	13,7
Aço-carbono qualificado	1,15	Aço inoxidável tipo 410	10,2
Aço-carbono acalmado (com Si)	1,25	Ferro fundido	0,95
Aço-liga ½ Mo	2,3	Latão de alumínio	7,6
Aço-liga 1¼ Cr – ½ Mo	3,1	Latão almirantado	7,8
Aço-liga 5 Cr – ½ Mo	3,8	Cupro-níquel 90-10	22,0
Aço-liga 3½ Ni	3,0	Cupro-níquel 70-30	27,0
Aço inoxidável tipo 304	11,5	Alumínio	2,5
Aço inoxidável tipo 304 L	13,3	Metal Monel	31,8
Aço inoxidável tipo 310	25,5	Titânio	41,0
Aço inoxidável tipo 316	15,0	Incoloy	48,5

FONTE: SILVA TELES



# 1.3- Problemas causados pela Corrosão nas propriedades dos materiais

---

## → Resistência Mecânica

Propriedade que depende fortemente da estrutura.

## → Elasticidade

Propriedade intrínseca do material e depende de 2 parâmetros.

\*rigidez das ligações atômicas e

\*densidade das ligações

## 1.3- Problemas causados pela Corrosão nas propriedades dos materiais

---

### →Ductilidade

É a quantidade de deformação(  $\epsilon$ ) que um material pode sofrer através de tensões (  $\delta$ ) até a sua ruptura.

## 1. 4- CORROSÃO (CONCEITOS).

**CORROSÃO  
QUÍMICA**

**CORROSÃO  
ELETROLÍTICA**

**CORROSÃO  
ELETROQUÍMICA**

**EROSÃO**

**EFEITOS  
MECÂNICOS**

## 1.4.1-CORROSÃO

**CORROSÃO  
QUÍMICA**

**QUALQUER  
MATERIAL**

**QUALQUER  
MEIO**

**INDIFERENTE**

**CORROSÃO  
ELETROQUÍMICA**

**METAL OU  
LIGA**

**ELETRÓLITO**

**LIGAÇÃO  
ELÉTRICA**

**PROCESSO  
ESPONTÂNEO**

**CORROSÃO  
ELETROLÍTICA**

**METAL OU  
LIGA**

**ELETRÓLITO**

**LIGAÇÃO  
ELÉTRICA**

**PROCESSO  
NÃO-ESPONTÂNEO**

# 1.4.2- Mecanismos Básicos da Corrosão

Por que Corrói?

Interação: **Metal** x **Meio** x **Condições Operacionais**

## O mecanismo eletroquímico:

Em água ou soluções aquosas;

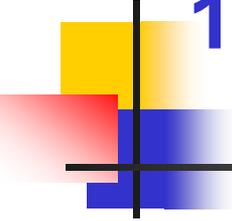
Corrosão Atmosférica, no Solo, em Sais fundidos.

## O mecanismo químico:

Em alta temperatura, gases em ausência de umidade;

Em solventes orgânicos isentos de água;

Corrosão de materiais não metálicos.

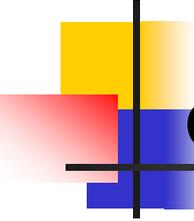


## 1.5- Corrosão pode ser classificada por dois mecanismos

---

### 1.5.1- Corrosão seca (não aquosa)

→ Corrosão química é um processo que se realiza na ausência de água em geral em temperaturas elevadas (temperatura acima do ponto de orvalho da água), devido a interação direta entre o metal e o meio corrosivo.



## OBS:

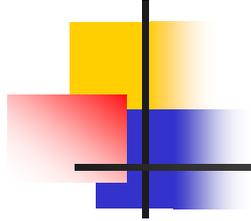
---

→ Os processos corrosivos de natureza química ocorrem, normalmente, em temperaturas elevadas. (?)

R. Porque na temperatura ambiente o sistema não possui energia para reação.

→ Pelo fato destes processos serem acompanhados de temperaturas elevadas, são comumente conhecidos por processos de corrosão ou oxidação em altas temperaturas.

→ A corrosão química é um produto da era industrial e ocorre em equipamentos que trabalham aquecidos, tais como: fornos, caldeiras, unidades de processo, etc.



***Exemplos:***

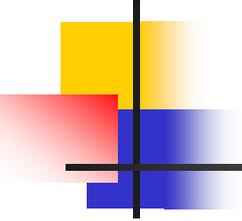
- Aço atacado por gases em alto forno;
- Escapamento de gases;
- Motores de foguetes
- Processos petroquímicos



**Figura 15- Escapamento de gases**



**Figura 16- Bicos injetores**

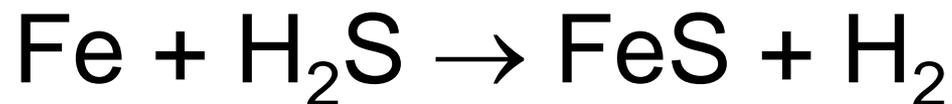
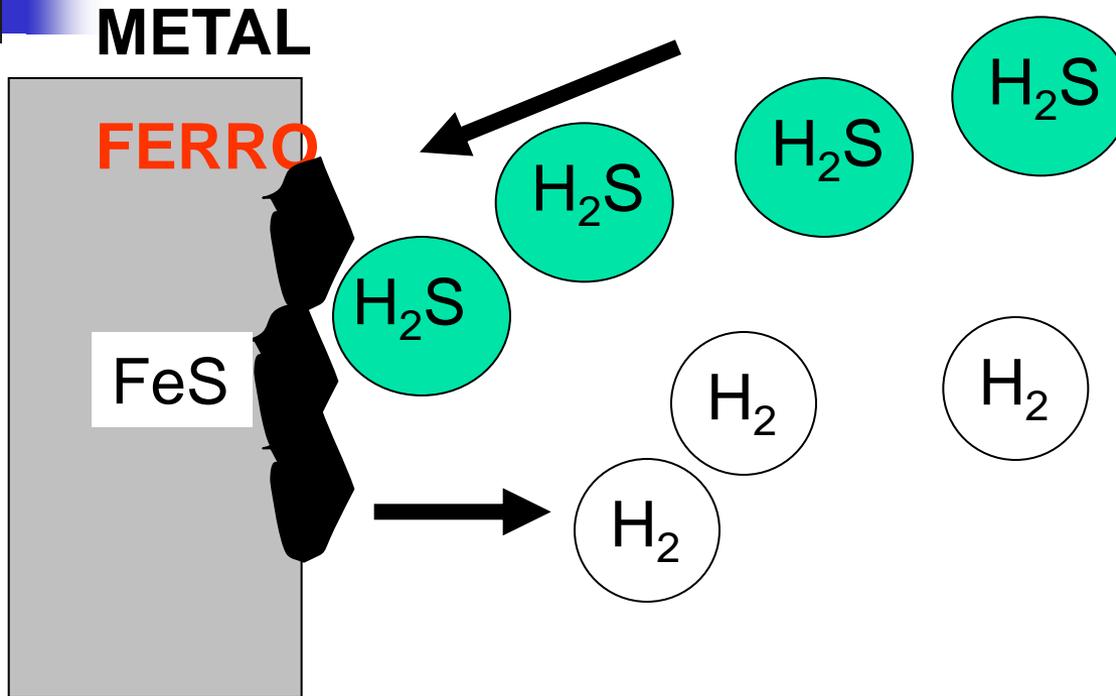


### 1.5.1.1. Qual o mecanismo

---

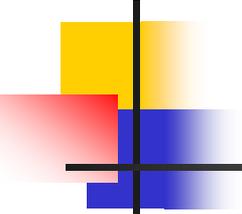
→É caracterizado pela ocorrência de uma reação química do metal com o agente corrosivo, sem que haja deslocamento dos elétrons envolvidos em direção a outras áreas.

# CORROSÃO QUÍMICA(Oxidação)

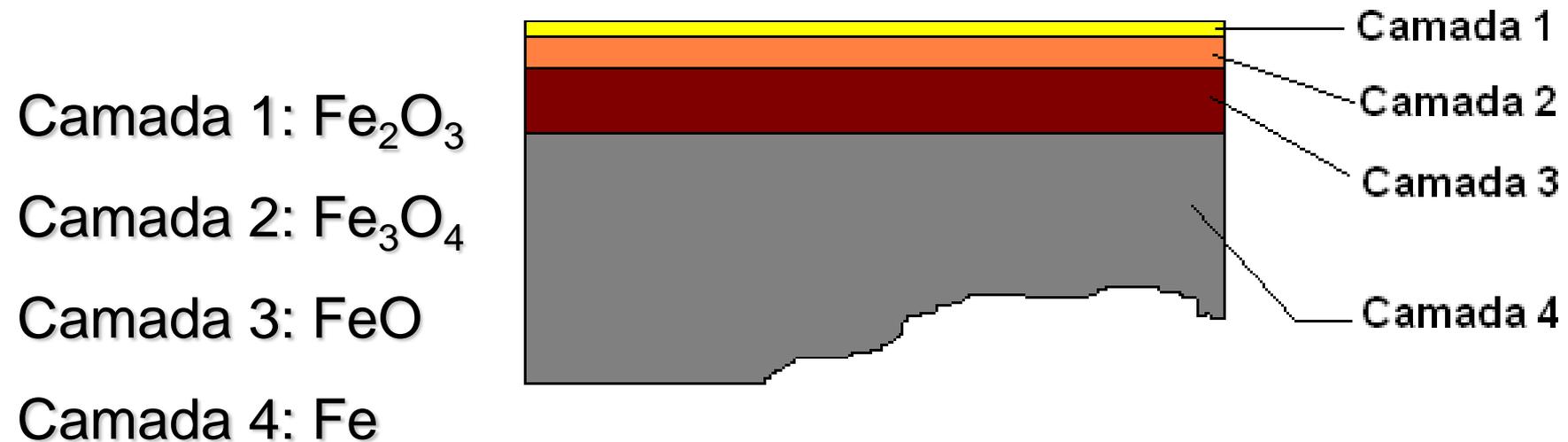


Placa de ferro, reagindo com sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), na forma gasosa e na ausência de umidade.

Inicialmente, ocorre a adsorção do gás (H<sub>2</sub>S) na superfície do ferro e, posteriormente, o ataque, formando uma película de sulfeto ferroso (FeS).

- 
- Ferro, cobre, cobalto, manganês – apresentam vários estados de oxidação, formando camadas de óxidos com diferentes composições.

■ Exeplo: Fe ( T = 700°C, p = 1atm )

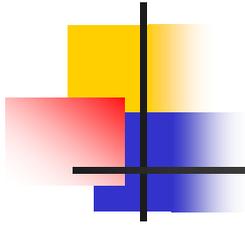




---

## 1.5.1.2. CRESCIMENTO DA PELÍCULA DE OXIDAÇÃO

A fixação do oxigênio à superfície de um metal exposto a uma atmosfera de oxigênio molecular resulta da competição de 3 processos:



**1. Absorção de um filme de oxigênio atômico sobre a superfície metálica;**

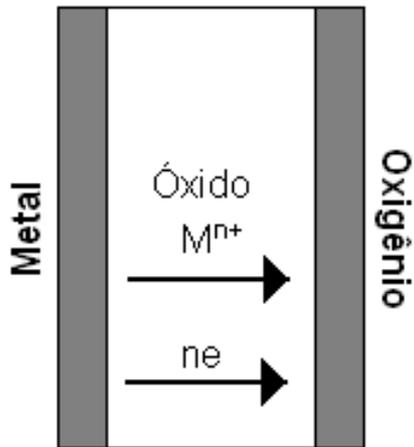
**2. Absorção de oxigênio molecular sobre a face externa do filme anterior;**

**3. Película de óxido proveniente da reação de oxidação (mais acentuado em temperaturas elevadas).**

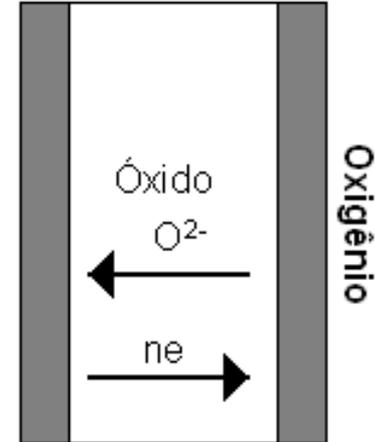
- **É necessário que haja o fenômeno de difusão através da película de óxido para que o crescimento da película possa ocorrer.**

## 1.5.1.2.1- DIFUSÃO

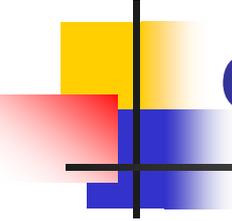
DIFUSÃO CATIÔNICA



DIFUSÃO ANIÔNICA



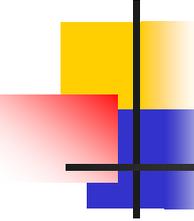
- ◆ Zonas de crescimento das películas:
  - Difusão simultânea;
  - Difusão através do metal;
  - Difusão através da película.



## Características da Difusão no Estado Sólido

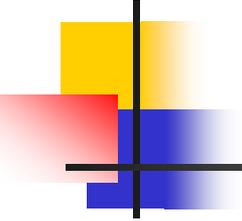
---

- 1) Os produtos da corrosão nos processos químicos formam-se por difusão no estado sólido. A difusão constitui-se do deslocamento de ânions do meio corrosivo, por exemplo  $O^{2-}$ , e cátions do metal, por exemplo  $Fe^{2+}$ .
- 2) A movimentação dos íons se dá através da película de produto de corrosão e a sua velocidade cresce com o aumento da temperatura.
- 3) O deslocamento pode ser dos ânions no sentido do metal, dos cátions no sentido do meio ou simultânea.



## Características da Difusão no Estado Sólido

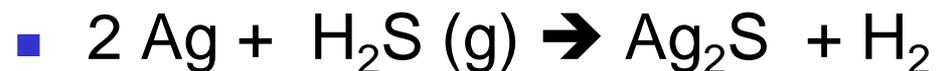
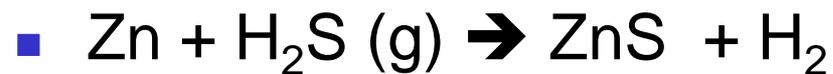
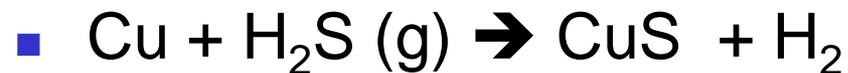
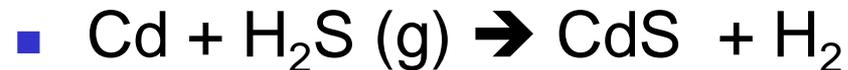
- 4) A difusão catiônica (cátions no sentido do meio) é mais frequente porque os íons metálicos são, em geral, menores que os ânions (especialmente o  $O^{2-}$ ), tornando a passagem dos mesmos pela rede cristalina do óxido mais facilitada e mais provável.
- 5) Como se trata de difusão no estado sólido, a corrosão é influenciada fundamentalmente pela temperatura, pelo gradiente de concentração do metal e pelas leis de migração em face das imperfeições reticulares e nos semicondutores.



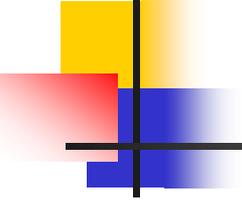
---

A formação de uma película quase impermeável sobre a superfície metálica pode inibir ou impedir a continuação do processo corrosivo, a qual é denominada de **passivação**.

- Outros metais como cádmio, cobre, prata e zinco também estão sujeitos aos mesmos mecanismos sendo representados pelas reações:



## 1.5.1.3. Velocidade de crescimento destas películas



---

**As películas de produto de corrosão química podem crescer segundo três leis de formação:**

### **1- Crescimento linear:**

o crescimento linear é observado quando a espessura da película é diretamente proporcional ao tempo, ou seja:

$$y = K t \quad (1)$$

onde:

**y** = espessura da película

**t** = tempo

**K** = constante

OBS: Esta lei é seguida para metais que formam películas porosas ou voláteis como, por exemplo, Na, Ca, Mg e K (películas porosas), Mo e W (películas voláteis);

## 2-Crescimento parabólico:

O crescimento parabólico é observado quando a velocidade de crescimento é inversamente proporcional a espessura da película, ou seja:

$$y^2 = K' t \quad (2)$$

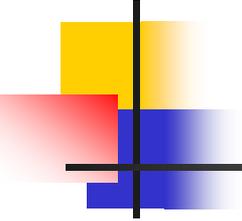
derivando  
tem-se:

$$2y \frac{dy}{dt} = K' \quad \therefore \quad \frac{dy}{dt} = \frac{K_i}{y}$$

● logo a velocidade de crescimento é inversamente proporcional à espessura da película.

onde:

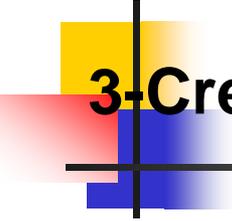
**y** = espessura da película  
**t** = tempo  
**K'** e **K<sub>i</sub>** = constantes



---

**OBS<sub>1</sub>**- Esta lei de crescimento é muito comum em metais em altas temperaturas, tais como o Fe, Ni, Cu e Co.

**OBS<sub>2</sub>**- De modo geral para películas não porosas, o crescimento tende a ser parabólico, com exceção daquelas muito impermeáveis que crescem logaritmicamente e daquelas que fraturam com facilidade, que crescem linearmente.



### 3-Crescimento logarítmico:

---

o crescimento logarítmico é observado quando a espessura da película é uma função logarítmica do tempo, ou seja:

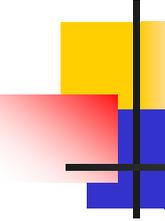
$$y = K'' \ln t \quad (3)$$

onde:

**y** = espessura da película

**t** = tempo

**K''** = constante



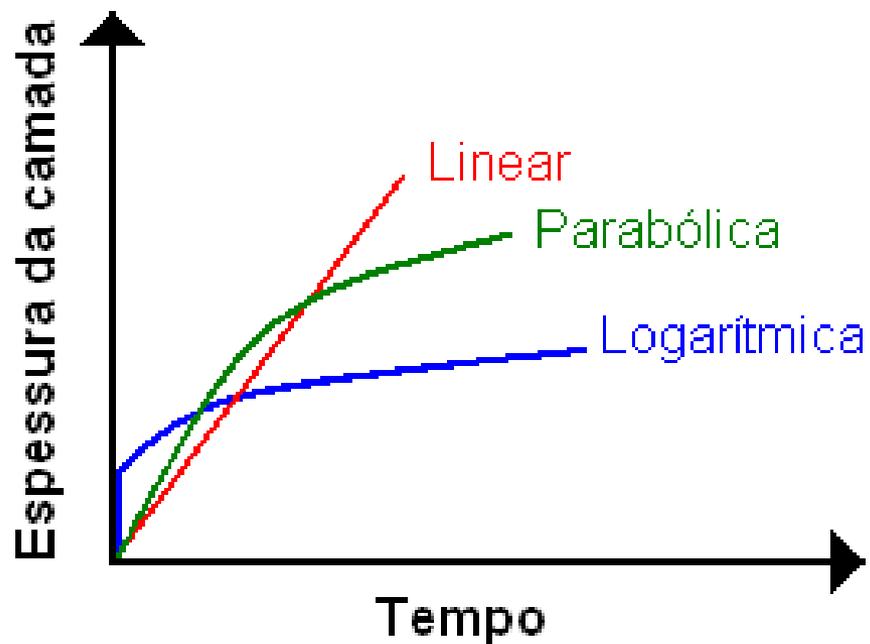
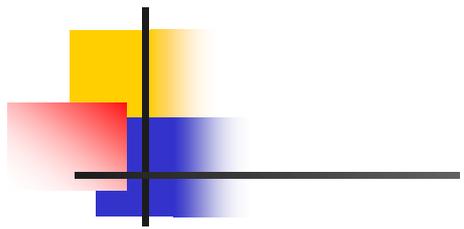
## **OBS<sub>1</sub>**

Esta lei de crescimento é muito comum em metais em temperatura não muito elevadas, tais como o Fe, Zn, Ni e Al.

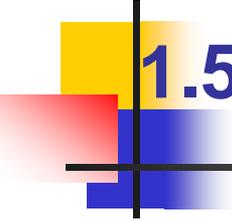
A película neste caso tem um crescimento grande inicialmente e, sofre acréscimos muito pequenos com o tempo mantendo-se praticamente constante a espessura da película de corrosão.

## **OBS<sub>2</sub>-**

De modo geral, este tipo de crescimento é observado em películas muito impermeáveis como as formadas sobre o **Al** e o **Cr**.



<b>Metal</b>	<b>Logarítmica</b>	<b>Parabólica</b>	<b>Linear</b>
<b>Al</b>	< 300°C	300...475°C	>475°C
<b>Cu</b>	<100°C	>550°C	
<b>Ti</b>	<360°C	360...850°C	>850°C
<b>Zn</b>	<360°C	>360°C	
<b>Fe</b>	<180°C	400...1000°C	



## 1.5.1.4. Características das Películas Protetoras

---

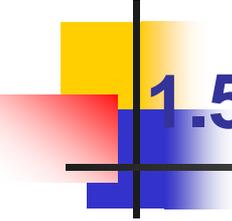
As películas formadas em corrosão química poderão ser protetoras ou não, dependendo das seguintes características:

**Volatilidade:**

as protetoras devem ser não voláteis;

**Resistividade elétrica:**

as películas de maior resistividade elétrica oferecem maior dificuldade à difusão iônica e logicamente são mais protetoras por imporem maior restrição à passagem destes íons;



## 1.5.1.4. Características das Películas Protetoras

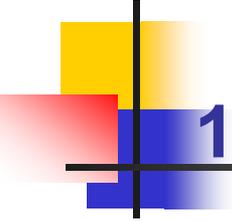
---

### **Impermeabilidade da rede cristalina:**

quanto mais compacta a rede cristalina maior será a dificuldade para a difusão e, portanto, mais protetora;

### **Aderência:**

as películas mais finas são, de modo geral, mais aderentes quando a rede cristalina do produto de corrosão é semelhante a do metal tem-se normalmente maior aderência da película. Películas mais aderentes são mais protetoras;



## 1.5.1.4. Características das Películas Protetoras

---

### **Refratariedade:**

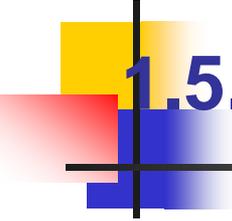
as películas para serem protetoras não devem fundir a baixas temperaturas;

### **Plasticidade:**

as películas muito duras fraturam com facilidade, tendendo a ser menos protetoras;

### **Porosidade:**

está intimamente ligada à impermeabilidade da rede cristalina. Quanto menos porosa mais protetora é a película;



## 1.5.1.4.1 Características das Películas Protetoras

---

**\*\*\*Relação entre o volume do óxido e do metal que originou o óxido:**

$$\frac{V_{\text{óxido}}}{V_{\text{metal}}} \geq 1$$

a película é formada sob compressão podendo ser protetora.

$$\frac{V_{\text{óxido}}}{V_{\text{metal}}} < 1$$

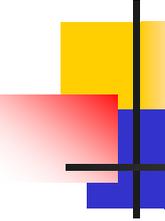
a película é formada sob tração, é porosa e não protetora.

## Características das Películas Protetoras

Estas relações foram estabelecidas por **Pilling e Bedworth** (1923) para alguns metais e estão citados na tabela ao lado

METAL	ÓXIDO	RELAÇÃO
K	K <sub>2</sub> O	0,41
Na	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,57
Ca	CaO	0,64
Mg	MgO	0,79
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,275
Pb	PbO	1,29
Sn	SnO <sub>2</sub>	1,34
Zn	ZnO	1,58
Ni	NiO	1,60
Cu	Cu <sub>2</sub> O	1,71
Cr	Cr <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2,03
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,16
Mo	MoO <sub>3</sub>	3,3
W	WO <sub>3</sub>	3,6

**Tabela 2 - Relação de Pilling e Bedworth**



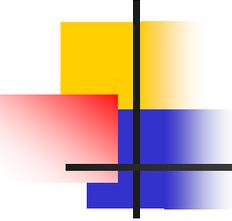
## 1.5.1.4 Características das Películas Protetoras

---

*Das propriedades mencionadas e da relação de Pilling e Bedworth podem ser tiradas as seguintes conclusões relacionadas às películas protetoras:*

**K, Na, Ca, Mg** formam películas porosas e, não protetoras, que apresentam crescimento linear;

**Fe, Ni, Cu** formam películas compactas, porém fraturam e perdem aderência com facilidade apresentando um crescimento parabólico;

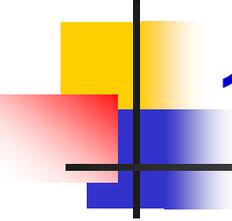


#### 1.5.1.4. Características das Películas Protetoras

---

**Al e Cr** formam películas compactas, aderentes, plásticas, impermeáveis, logo são muito protetoras apresentando um crescimento logarítmico;

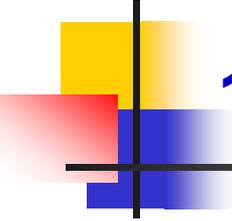
**O W e Mo** formam películas compactas porém são voláteis e apresentam um crescimento linear.



## 1.6. Meios Corrosivos (Cor. Química)

---

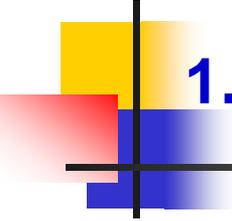
- Os principais meios corrosivos a altas temperaturas são:
  - **oxigênio e gases contendo enxofre:** presentes em fornos, caldeiras, unidades de processo, nas chamadas atmosferas sulfurosas.
  - O **enxofre** e o **H<sub>2</sub>S** formam sulfetos de metal que não são protetores e agravam o processo corrosivo por formarem eutéticos de baixo ponto de fusão com os óxidos de metal.



## 1.6. Meios Corrosivos (Cor. Química )

---

- Os principais meios corrosivos a altas temperaturas são:
  - Em ligas contendo níquel o sulfeto localiza-se nos **contornos de grão** formando um eutético  $\text{Ni}_3\text{S}_2$  - Ni que funde a  $645^\circ\text{C}$  tornando estas ligas pouco resistentes a atmosferas sulfurosas.

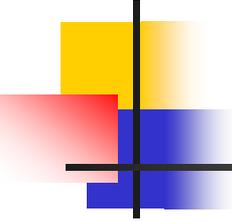


## 1.6. Meios Corrosivos (cont...)

---

- **vapor d'água:** em temperatura elevada o vapor d'água pode atacar certos metais formando óxido e liberando hidrogênio que pode provocar fragilização pelo hidrogênio e

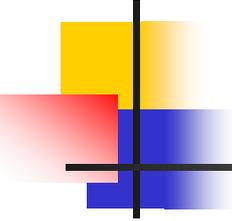
- **cinzas:** a queima de combustível em fornos, caldeiras, turbinas a gás, etc., pode provocar sérios problemas de corrosão devido a cinzas contendo vanádio e sulfato de sódio.



## 1.6. Meios Corrosivos (cont...)

---

- O **vanádio** presente no combustível oxida-se a  $V_2O_5$  e forma eutéticos de baixo ponto de fusão com os óxidos do metal destruindo as películas protetoras das superfícies metálicas.



## 1.6. Meios Corrosivos (cont...)

---

- **O sulfato de sódio** origina-se de reações de  $\text{SO}_2$  com o  $\text{NaCl}$  presente no combustível. Este sulfato de sódio reage posteriormente com os óxidos formados destruindo também, as películas protetoras.
- **A ação combinada** do vanádio e sulfato de sódio é muito mais acentuada sobretudo em cinzas contendo cerca de 85% de  $\text{V}_2\text{O}_5$  e 15% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas

---

### ● CORROSÃO CATASTRÓFICA

☞ É um tipo de corrosão que se manifesta em alguns aços e outras ligas onde ocorre uma oxidação extremamente rápida, conduzindo à destruição da liga.

☞ A corrosão ou oxidação catastrófica ocorre, particularmente em aços contendo molibdênio e aços com alto teor de vanádio devido ao baixo ponto de fusão de seus óxidos.

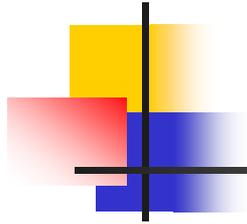
# 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas

## ● CORROSÃO POR METAIS LÍQUIDOS

☞ Este tipo de corrosão ocorre em situações em que se trabalha com um metal líquido em contato com outro sólido, como por exemplo em reatores nucleares.

☞ ● A corrosão pode ocorrer devido a dissolução do metal sólido no líquido ou a penetração intergranular do metal líquido no sólido do recipiente. Em ambos os casos há a formação de uma liga com a perda de material do recipiente.

## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas



### ● CARBONETAÇÃO E DESCARBONETAÇÃO

A carbonetação e a descarbonetação podem ser causa importante de falhas em alta temperatura com perda de material e por esta razão podem ser associadas à corrosão.

## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas

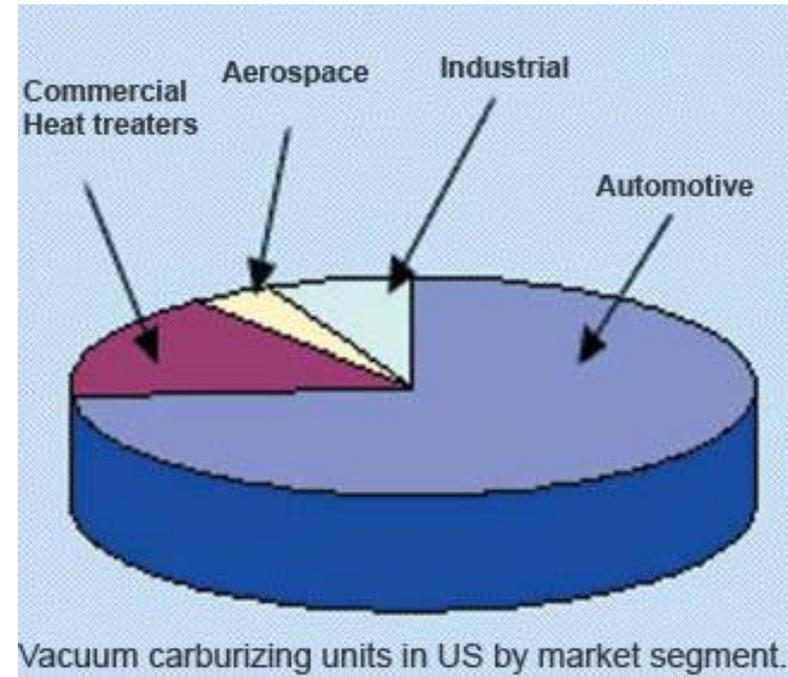
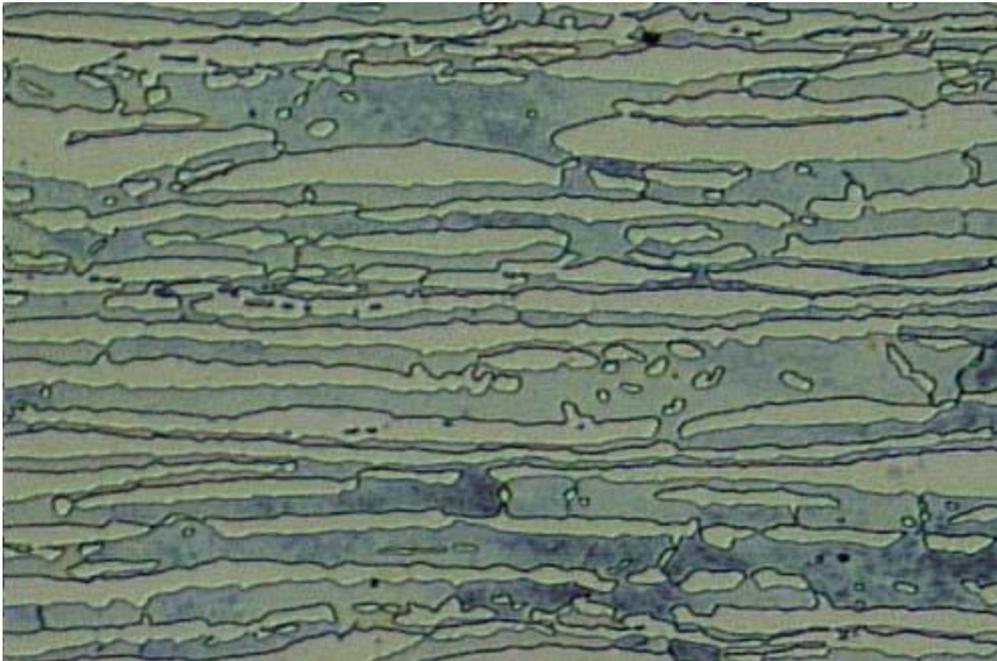
### CARBONETAÇÃO

→ Consiste na entrada de carbono

→ Ocorre quando ligas ferrosas são aquecidas em atmosferas contendo hidrocarbonetos ou monóxido de carbono.

→ Carbono vai se difundindo para o interior do metal, formando uma camada rica em carbono na superfície.

## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas



## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas



## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas

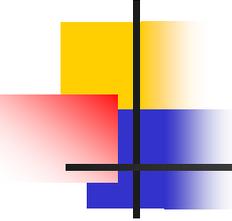
### DESCARBONETAÇÃO

→ Consiste na saída de carbono.

→ Ocorre quando ligas, principalmente o aço baixa liga são colocados em ambientes com agentes descarbonetante como o  $\underline{\text{H}}_2$  e o  $\underline{\text{CO}}_2$ . Neste caso a liga vai se deteriorando e perdendo a dureza superficial.

## 1.7. Casos Especiais de Corrosão em Altas Temperaturas





## 1.8. MEIOS CORROSIVOS A ALTA TEMPERATURA

---

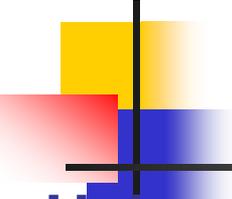
### **Enxofre e gases contendo enxofre:**

Oxidação intergranular do metal, principalmente nos casos de níquel (15 a 30% Ni) e cobre.

### **Hidrogênio:**

Descarbonetação de aços ou ruptura ao longo dos contornos de grão em alguns metais.

## 1.8- MEIOS CORROSIVOS A ALTAS TEMPERATURA



---

### **Halogênios e compostos halogenados:**

Formação de halogenetos metálicos que são voláteis em temperaturas elevadas (Cr e Al, por exemplo).

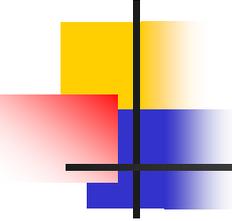
### **Vapor de água:**

Formação de óxidos e liberação de hidrogênio, podendo ocasionar danos.

### **Nitrogênio e amônia (NH<sub>3</sub>):**

Nitretação do aço em temperaturas maiores que 425°C, endurecendo superficialmente o aço.

Amônia: agente de nitretação.



---

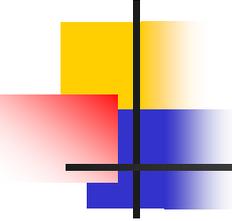
- **Substâncias fundidas:**

Reação de sais com os metais da liga.

- **Carbono e gases contendo carbono:**

Carbonetação ou cementação.

Descarbonetação.



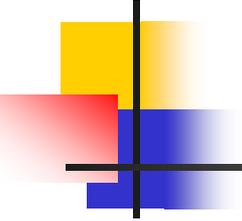
---

## ■ Cinzas:

Cinzas altamente corrosivas, provenientes da queima de combustíveis nas turbinas a gás, nos motores Diesel e nas caldeiras.

*Proteção contra a corrosão por cinzas:*

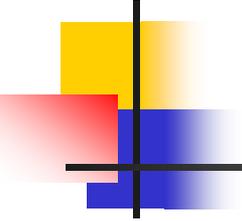
- Controle de excesso de ar;
- Revestimento refratário;
- Emprego de aditivos no combustível;
- Emprego de ligas resistentes



## 1.9- Princípios Básicos de Controle da Corrosão em Altas Temperaturas

---

- ▶ A corrosão em altas temperaturas é controlada a partir do crescimento da película protetora, atuando e dificultando na interação entre o metal e o meio corrosivo.
- ▶ Com este objetivo pode-se agir na seleção do material metálico, resistente à corrosão pela formação das películas protetoras em altas temperaturas ou utilizando revestimentos refratários ou isolantes que separam a superfície metálica do meio.

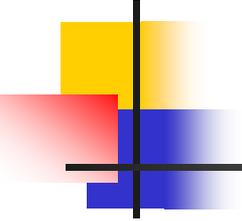


## 1.9- Princípios Básicos de Controle da Corrosão em Altas Temperaturas

---

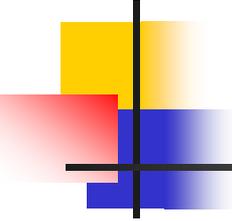
- Como foi dito anteriormente o aumento da resistência à corrosão química baseia-se em impedir ou controlar a interação química entre o metal e o meio corrosivo.
- Com esse objetivo, como se viu, pode-se agir no metal de forma a se obter películas protetoras ou utilizar revestimento refratários e isolantes.

# 1. 10- Metais e Ligas Metálicas – Influência dos Elementos de Liga



---

- 1- Os materiais metálicos resistentes à corrosão química são aqueles formadores de películas protetoras.
- 2- As características das películas protetoras foram vistas anteriormente e para que o desgaste no material seja adequado é necessário que o crescimento da película seja logarítmico (películas muito protetoras) ou parabólico (películas semiprotetoras).
- 3- O crescimento logarítmico seria o ideal e o crescimento parabólico desejável.



## 1.10-. Metais e Ligas Metálicas – Influência dos Elementos de Liga

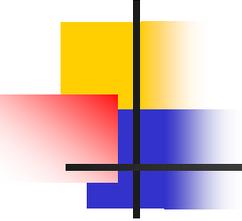
---

A seleção do material metálico deve ser efetuada considerando principalmente a temperatura de trabalho e o meio corrosivo.

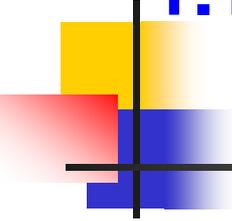
**Algumas observações sobre os materiais são:**

- ◆ A adição de determinados elementos de liga melhoram a resistência a oxidação os aços, entre os quais podem ser citados: Cr, Ni, Mo, Si e Al, sendo o cromo e o níquel os elementos de maior importância;
- ◆ A adição de cromo nos aços aumenta a resistência a oxidação de acordo com a seguinte tabela:

# 1.10- Metais e Ligas Metálicas – Influência dos Elementos de Liga



<b>% CROMO</b>	<b>TEMPERATURA MÁXIMA (°C)</b>
0,75 - 1	540
2 - 3	600
4 - 6	650
7 - 9	700
13	750
17	850
21	1.000
25	1.100

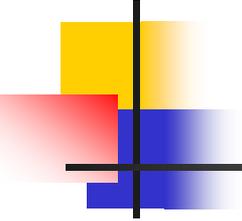


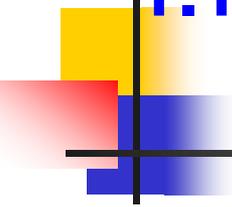
## 1.10- Metais e Ligas Metálicas – Influência dos Elementos de Liga

---

- A adição de Ni nos aços também aumenta a resistência a oxidação em atmosferas oxidantes e isentas de gases de enxofre.
- Em atmosferas contendo gases de enxofre e não oxidante há a formação de um eutético  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ -Ni que funde a  $645^\circ\text{C}$  responsável pela pouca resistência das ligas de níquel;

# 1.10- Metais e Ligas Metálicas – Influência dos Elementos de Liga

- 
- 
- As ligas de Ni - Monel (Ni - 67%, Cu - 32%), Inconel (Ni - 78%, Cr - 14% e Fe - 7%) e outras são resistentes à corrosão em atmosferas oxidantes.
  - Ligas contendo alto teor de Ni e de Cr resistem satisfatoriamente à cinzas contendo vanádio e sulfato de sódio, sendo as principais a 50 Cr e 50 Ni e a 60 Cr e 40 Ni.

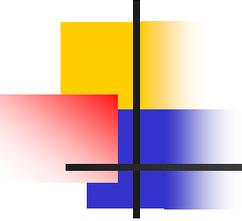


## 1.10- Metais e Ligas Metálicas – Influência dos Elementos de Liga

---

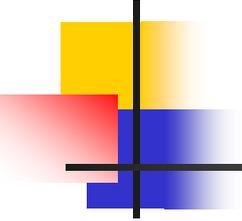
■ De acordo com as observações acima, verifica-se a grande utilização das ligas Fe-Cr, Fe-Cr-Ni e Ni-Cr na construção de equipamentos que trabalham a alta temperatura tais como:

- ☛ tubos de fornos e caldeiras;
  - ☛ queimadores;
- ☛ reatores e regeneradores de unidades de FCC;
- ☛ equipamentos de processo na indústria química,
  - ☛ petroquímica e de petróleo;
- ☛ componentes de máquinas: pás de turbinas,
- ☛ válvulas de motores de combustão interna, etc.



---

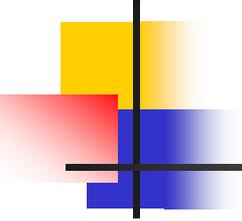
OBS: A corrosão química também pode ser interpretada como a deterioração de polímeros (plásticos, borrachas e materiais compostos), sujeitos à ação de solventes orgânicos e/ou oxidantes.

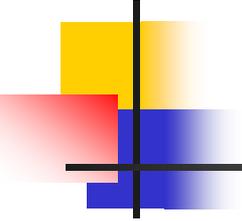


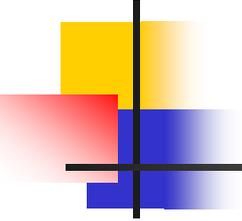
---

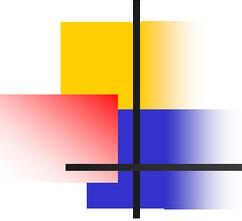
No caso da corrosão de plásticos e de borrachas por solventes orgânicos específicos, pode haver a descaracterização destes materiais, principalmente em relação às suas **propriedades físicas**, pela **perda da rigidez** ou da **flexibilidade**, acarretando o desgaste, que dependerá, por sua vez, da ação e das propriedades do agente agressivo.

Cada tipo de material poderá ter um mecanismo específico, que depende das propriedades físico-químicas do material e do agente químico.

- 
- 
- **O ataque de vapores de ácido fluorídrico a uma tubulação de resina reforçada com fibra de vidro.**

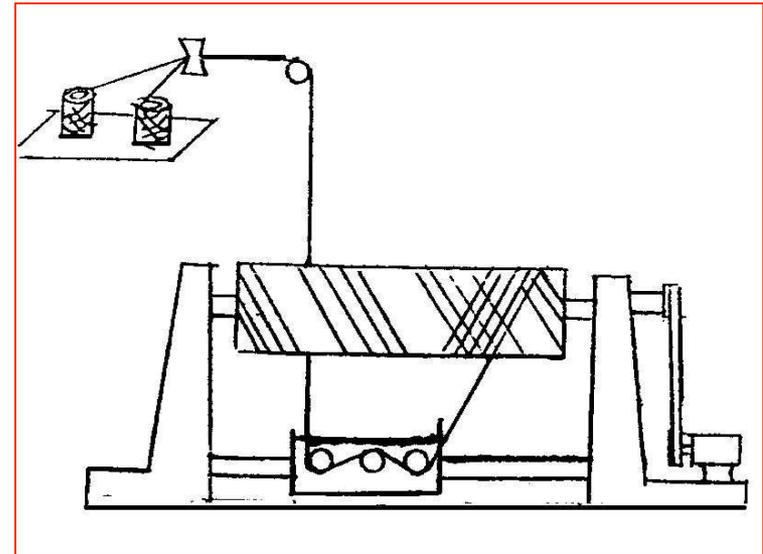
- 
- 
- *Geralmente, estes tubos são formados de quatro camadas sucessivas de resinas com fibras ou flocos de vidro, de tal modo, a formarem uma barreira química e a uma estrutura mecânica compatível com a utilização.*

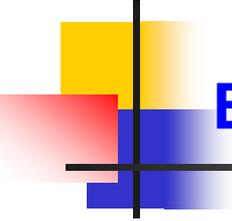
- 
- 
- *A 1a camada “A” que terá o primeiro contato com o meio corrosivo deverá ser constituída de 90 % de resina e 10 % de material vítreo com uma espessura da ordem de 0,25 mm.*
  - *- A 2a camada “B” denominada de barreira química, constituída de 70 % de fios de vidro picados e 30 % de resina tem a função de impedir a penetração do agente corrosivo na estrutura do material.*

- 
- 
- A 3a camada “C”, construída por tecidos de vidro e/ou fios de vidro embebidos na resina constituem a chamada camada estrutural.
  - A 4a e última camada externa “D” compõe o tubo propriamente dito, servindo, também de proteção contra as intempéries.

# CORROSÃO QUÍMICA EM POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

## FABRICAÇÃO



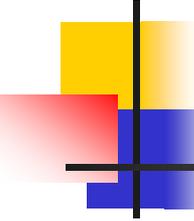


## **EX: CORROSÃO QUÍMICA EM CONCRETO ARMADO**

---

O cimento portland utilizado na maioria das construções é produzido num forno rotativo, em temperaturas variando entre 1000 a 1200°C, através das reações entre:

calcário, areia, aluminatos e óxido de ferro.

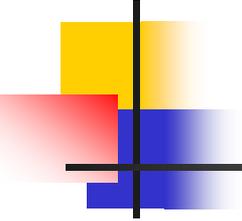


## EX:CORROSÃO QUÍMICA EM CONCRETO ARMADO

---

Os principais constituintes destas reações são:

- ✘ silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),
- ✘ silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),
- ✘ aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- ✘ ferro aluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

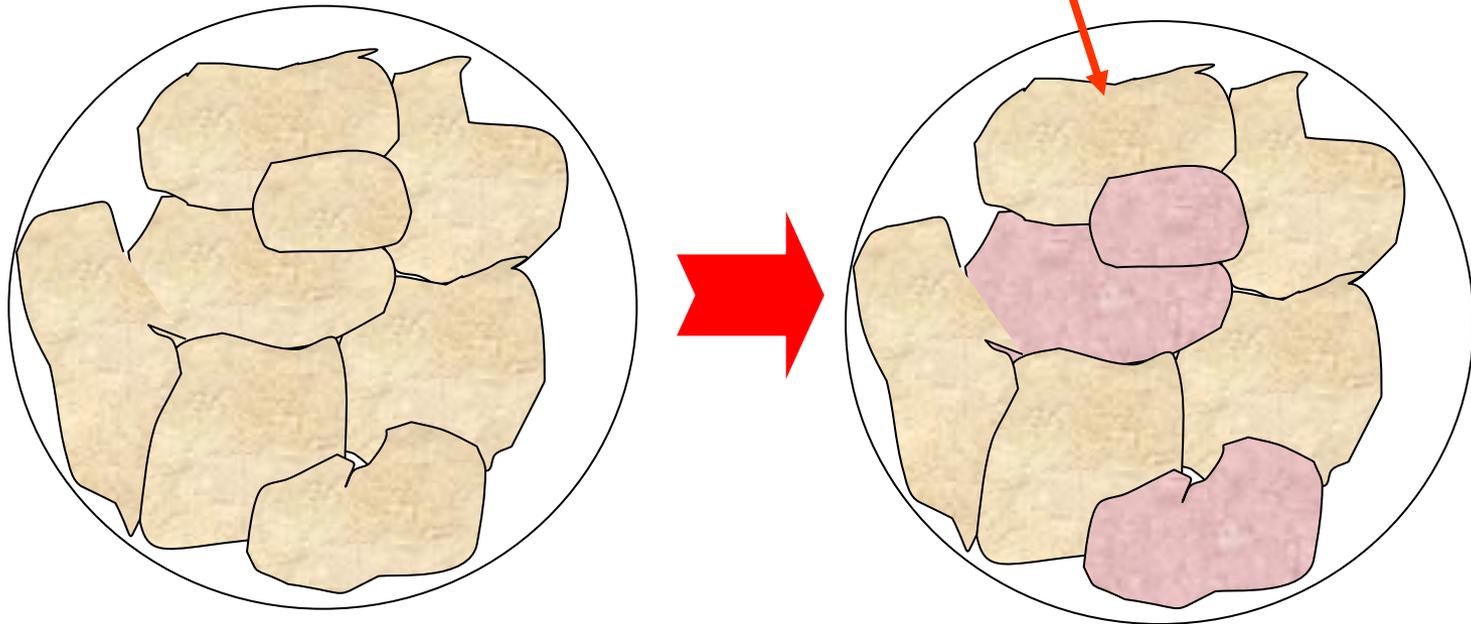
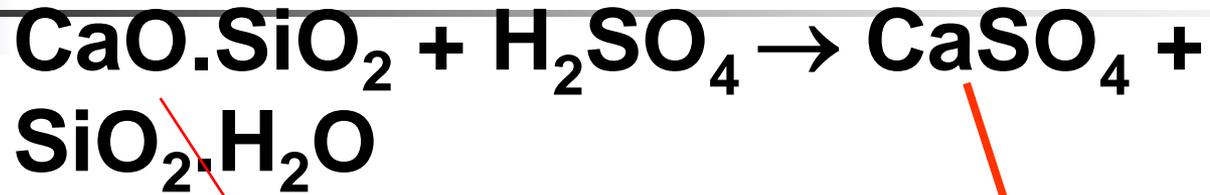


---

O mecanismo da ação química está associado à ação de várias substâncias químicas sobre os constituintes do cimento, tais como:

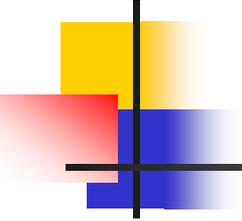
- gases ácidos ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ),
- ácidos inorgânicos ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ),
- ácidos orgânicos (fórmico, acético, oxálico) e compostos alcalinos ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), etc
- $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

# CORROSÃO QUÍMICA



# CORROSÃO QUÍMICA EM CONCRETO ARMADO

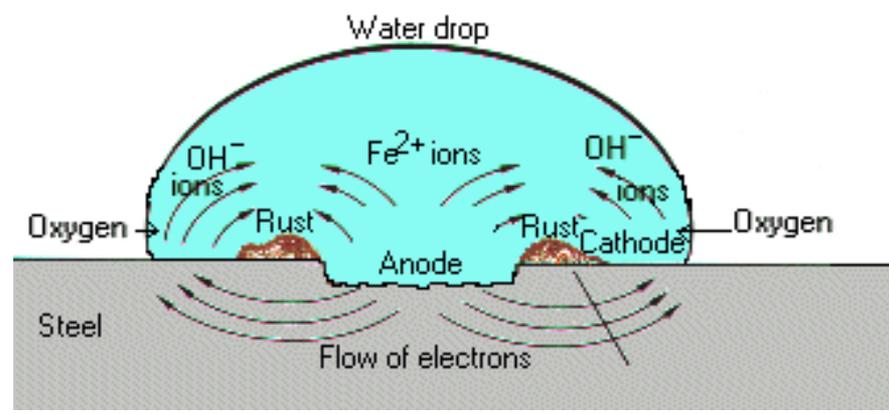
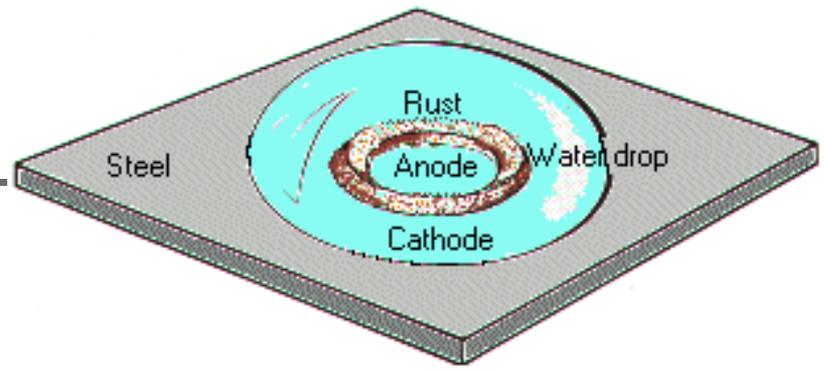
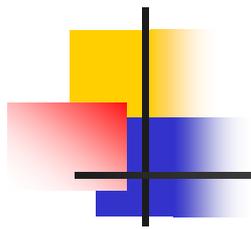


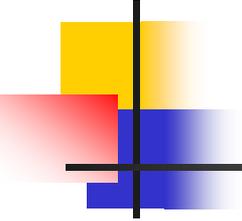


## 1.11.- CORROSÃO AQUOSA

---

→ Característica fundamental é que ela ocorre na presença de um eletrólito (e para que a reação ocorra é necessário que ocorram simultaneamente a reação anódica e a reação catódica).



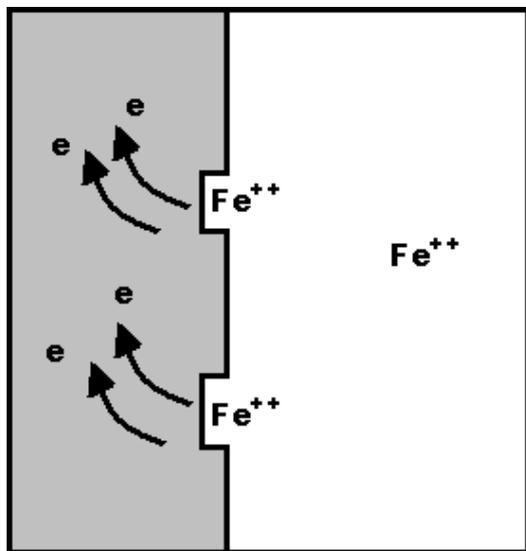


## 1.11- Corrosão aquosa (cont....)

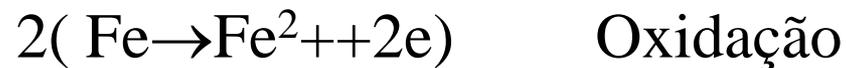
---

### 1.11.1.- Qual o mecanismo

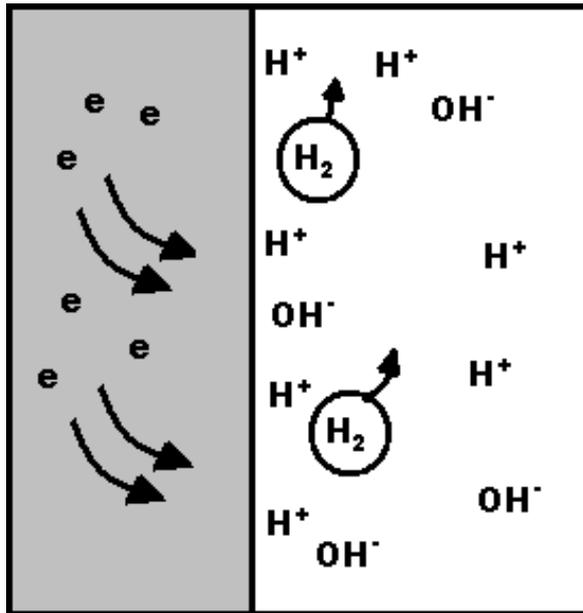
(o mecanismo se traduz no funcionamento de uma pilha de corrosão que requer quatro elementos imprescindíveis, a saber:



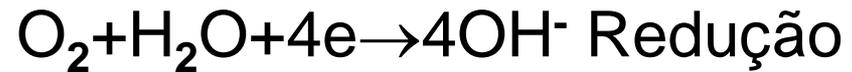
❖ uma área onde se passa a reação **anódica**, por isso denominada de área anódica: ânodo (superfície onde verifica-se a corrosão).

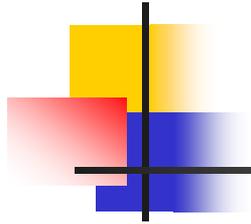


## 1.11.1.- Qual o mecanismo (cont.....)



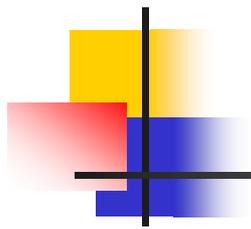
❖ uma área distinta daquela, onde se passa a reação catódica, por isso denominada de área catódica: cátodo (superfície protegida onde não há corrosão- reações de redução).





**(o mecanismo se traduz no funcionamento de uma pilha de corrosão que requer quatro elementos imprescindíveis, a saber:**

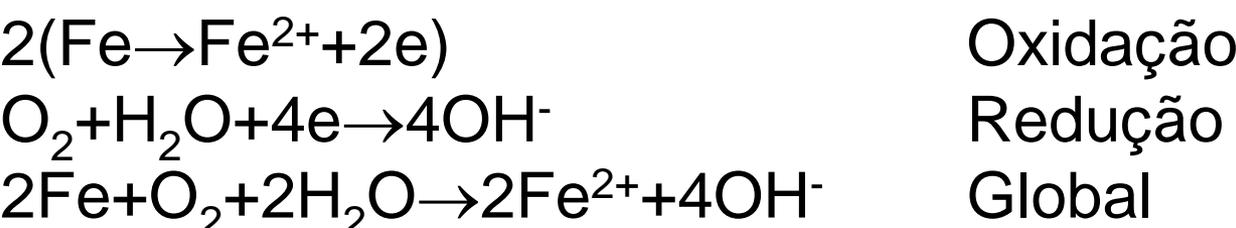
- ❖ uma ligação metálica que une ambas as áreas e por onde fluem os elétrons resultantes da reação anódica: condutor.
- ❖ um eletrólito, solução condutora ou condutor iônico, que envolva simultaneamente as áreas anódicas e catódicas.

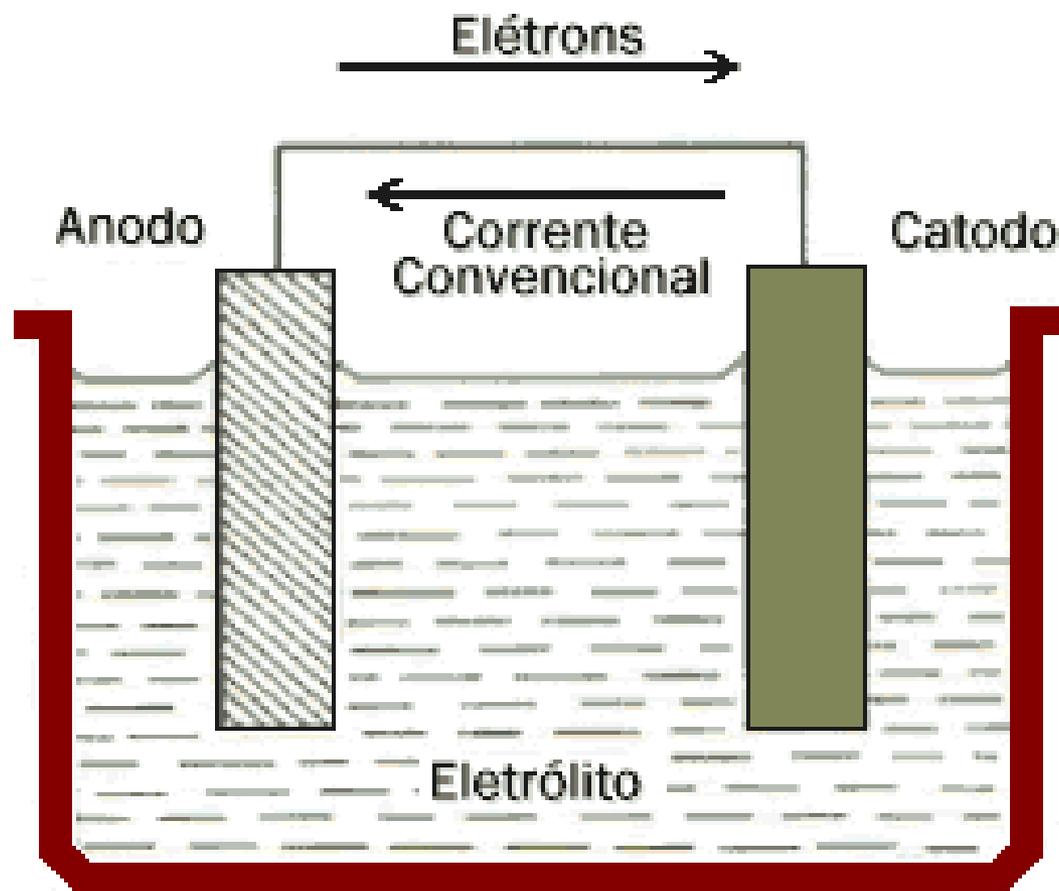
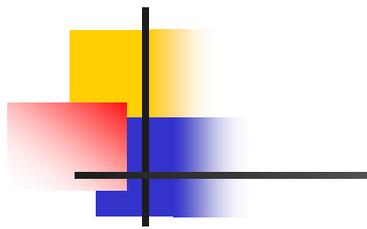


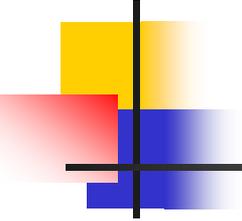
$Me \rightarrow Me^{Z+} + ze$  (liberação de elétrons = reação de oxidação = reação anódica)

$Me^{Z+} + ze \rightarrow Me$  (consumo de elétrons = reação de redução = reação catódica)

**Exemplo:**





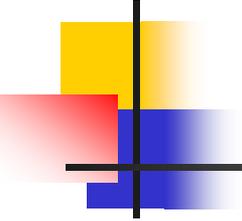


## 1.12. Principais Meios Corrosivos e Respective Eletrólitos

---

### ◆ Atmosfera:

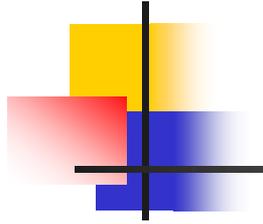
→ O ar contém umidade, sais em suspensão, gases industriais, poeira, etc. O eletrólito constitui-se da água que condensa na superfície metálica, na presença de sais ou gases presentes no ambiente. Outros constituintes como poeira e poluentes diversos podem acelerar o processo corrosivo;



---

## **Produtos de corrosão**

→ Eles podem ser insolúveis ou solúveis.



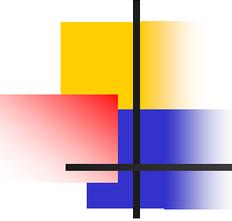
## **Produtos solúveis**

→podem aumentar as taxas de corrosão, aumentando a condutividade do eletrólito sobre a superfície metálica.

→ou por agir higroscopicamente formando soluções quando a umidade ambiental aumenta.

## **Produtos insolúveis**

→podem reduzir a taxa de corrosão, Poe atuar como uma barreira entre a atmosfera e a superfície metálica.



## 1.12.1-As atmosferas podem ser classificadas:

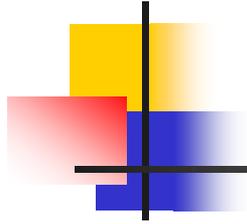
---

### ◆ **Atmosfera industrial**

→ Principal característica contaminação por compostos de enxofre (SO<sub>2</sub>)

\*Amônia

\*Sólidos particulados

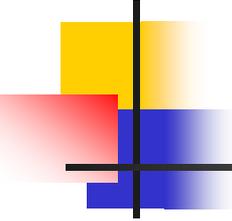


## ◆ Atmosfera marinha

→ Principal característica contaminação por partículas salinas de cloreto de sódio (NaCl).

\* Outros elementos presentes são os íons de K, Mg, Ca que são altamente higroscópicos.

\* O íon cloro é agressivo aos aços inoxidáveis provocando corrosão por pite.



## ◆ Atmosfera rural

---

→ Não contêm contaminantes químicos fortes mas pode conter poeiras orgânicas e inorgânicas e elementos gasosos como  $O_2$  e  $CO_2$ .

\* Umidade → provoca condensação por ciclo (noite/dia).

\* Composto de nitrogênio → formação de amônia proveniente de fertilizantes.

**Temperatura**

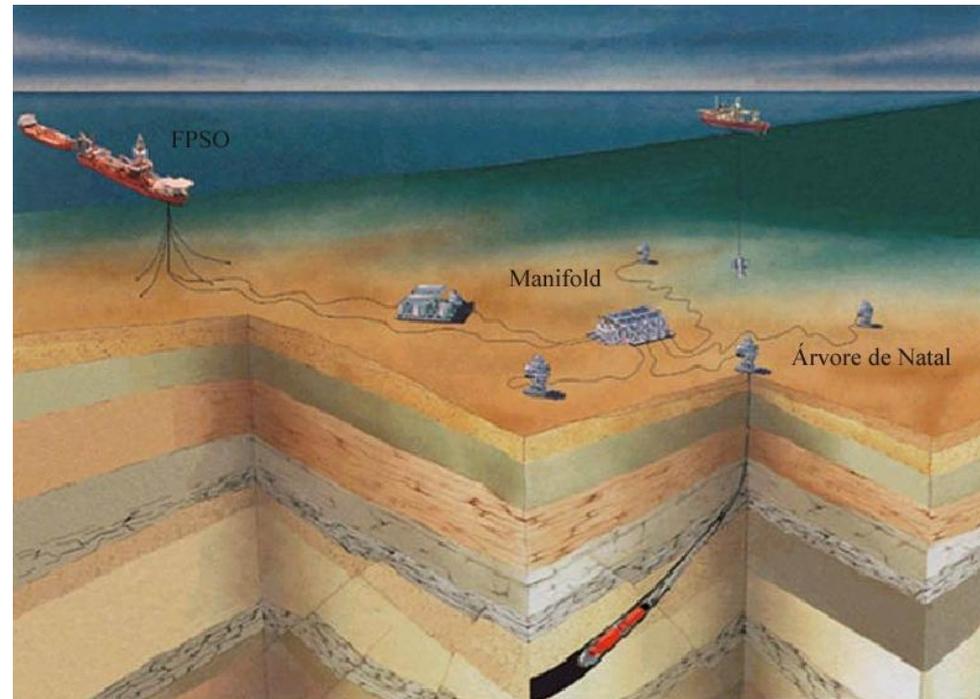
**Umidade relativa**

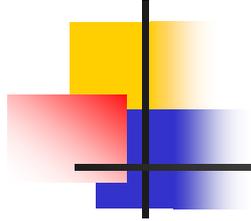
**Direção dos ventos**

**Velocidade dos ventos**

## ◆ Água do mar

O ambiente marinho é o mais corrosivo de todos os meios naturais, (muito utilizado, bombas, tubulações, submarinos, cais estacas e plataformas).





***O Porque de ser tão contaminante????***

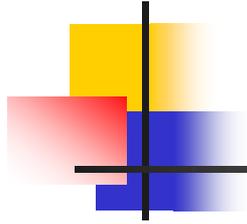
**→ Contém 3,4% de sais dissolvidos e seu ph (~8) é levemente alcalino.**



**Bom eletrólito**

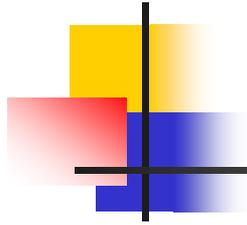


**Cor. Galvânica e Cor. Em frestas**



## Temperatura

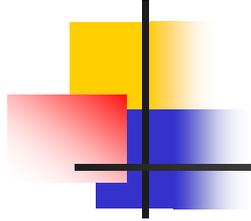
→ Se for elevada irá diminuir a possibilidade de condensação de vapor d'água na superfície metálica e a adsorção de gases, minimizando a possibilidade de corrosão.



## Velocidade dos ventos-

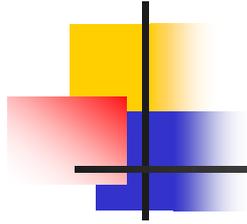
→ Podem arrastar, para as superfícies metálicas, agentes poluentes e névoa salina.

→ Dependendo da velocidade e da direção dos ventos, esses poluentes podem atingir instalações posicionadas até em locais bem afastados das fontes emissoras.



## Insolação-

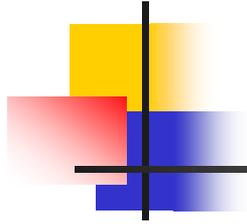
→(raios ultravioletas) causa deterioração em películas de tintas a base de resina epóxi e em PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro, como poliéster reforçado com fibra de vidro) e ocasiona ataque no material plástico.



## ◆ Águas naturais (rios, lagos e do subsolo)

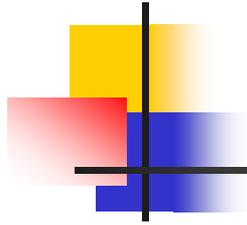
→ Estas águas podem conter sais minerais, eventualmente ácidos ou bases, resíduos industriais, bactérias, poluentes diversos e gases dissolvidos.

→ O eletrólito constitui-se principalmente da água com sais dissolvidos.



## ◆ Solos

- Os solos contêm umidade, sais minerais e bactérias. Alguns solos apresentam também, características ácidas ou básicas.
- O eletrólito constitui-se principalmente da água com sais dissolvidos.



## ◆ **Produtos *químicos*:**

→ Os produtos químicos, desde que em contato com água ou com umidade e formem um eletrólito, podem provocar corrosão eletroquímica.



**Corrosão Localizada por Amônia**