

**TS** TREINAR  
SEMPRE

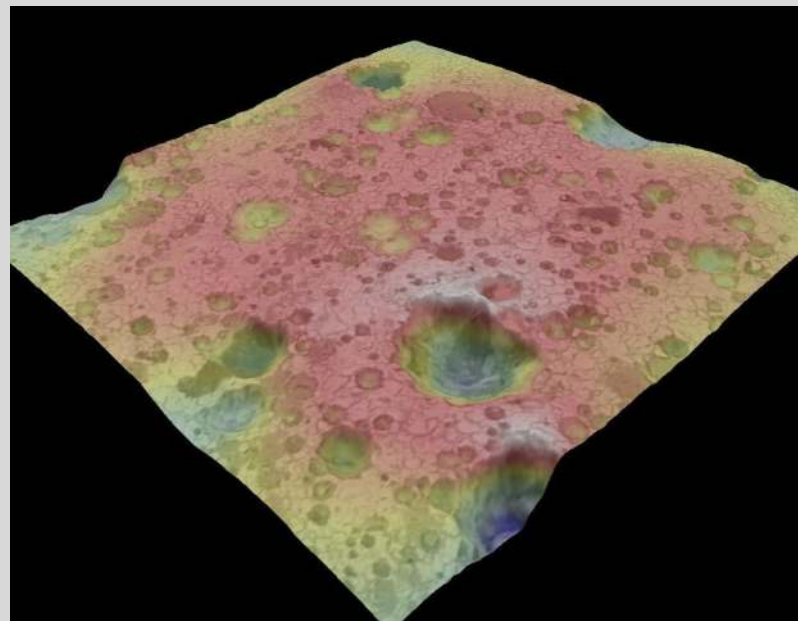
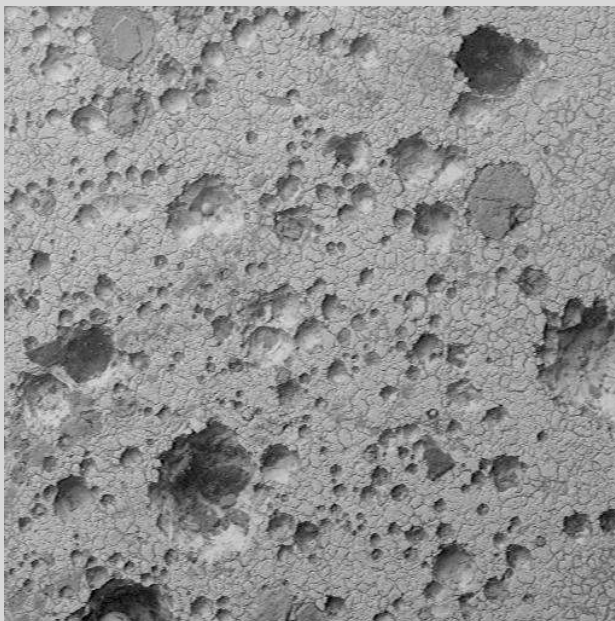
**CAEMA**  
BRASIL  
Consultoria em Engenharia de Materiais

*Adair Borro Jr.*

# Conceituando e Desmistificando os Aços Inoxidáveis

**ABINOX**  
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL


## Corrosão nos Aços Inoxidáveis



## ANTES DE TUDO....


### Os alarmantes números da Corrosão no Mundo

O PIB mundial crescerá cerca de 3% em 2017  
 USD 80 trilhões → R\$ 264 trilhões (1 USD = R\$ 3,3)


  
 Cerca de 3% será perdido em corrosão  
 no mundo em 2017

APENAS EM PERDAS DIRETAS

- Troca de Materiais
- Troca de Equipamentos
- Custos diretos de reparo.

  
 Somando-se as PERDAS INDIRETAS  
 a corrosão irá custar no total em 2017 cerca  
 de 5,5% desse PIB mundial

- Danos Ambientais
- Perda de Recursos
- Lucro Cessante
- Acidentes de Trabalho

  
 USD 4,4 trilhões  
 R\$ 14,5 trilhões

Diretrizes para o controle da corrosão, aplicação de materiais resistentes, treinamentos, tecnologias, políticas públicas

Redução de 25%  
 dos custos da  
 corrosão no  
 mundo.

Economia de ....

USD 1,1 trilhão  
 R\$ 3,63 trilhões

(fonte: FMI)

(fonte: The World Corrosion Organization)

## E NO BRASIL....????

O PIB do Brasil está estimado em 2,5% do PIB mundial para 2017.

USD 2 trilhões → R\$ 6,6 trilhões (1 USD = R\$ 3,3)

### UTILIZANDO O MESMO CRITÉRIO MUNDIAL....

Cerca de 3% será perdido em corrosão no mundo em 2017

APENAS EM PERDAS DIRETAS

- Troca de Materiais
- Troca de Equipamentos
- Custos diretos de reparo.

Somando-se as PERDAS INDIRETAS a corrosão irá custar no total em 2017 cerca de 5,5% desse PIB mundial

- Danos Ambientais
- Perda de Recursos
- Lucro Cessante
- Acidentes de Trabalho

USD 110 bilhões  
R\$ 363 bilhões

Aplicando-se políticas para o controle da corrosão, aplicação de materiais resistentes, treinamentos, tecnologias.....

Redução de 25% dos custos da corrosão

Economia de .....

USD 27,5 bilhões  
R\$ 91 bilhões

(fonte: FMI)

(fonte: The World Corrosion Organization)

## Segundo a “The World Corrosion Organization”

Dentre as políticas sugeridas para redução dos custos da corrosão num país, destacam-se:

- Políticas públicas
- Incentivos fiscais aos setores afins
- Programas de treinamentos contínuos através de organizações de classe do setor privado, instituições de ensino etc.
- Acesso a tecnologia
- Participação em fóruns mundiais
- Programa de Metas detalhado com participação e comprometimento dos setores públicos e privados.
- **INCENTIVO E CAMPANHA OSTENSIVA PARA APLICAÇÃO DE MATERIAIS DE ALTA PERFORMANCE NO COMBATE A CORROSÃO**



**AÇOS INOXIDÁVEIS**

**PROMOVER EDUCAÇÃO E BOAS PRÁTICAS NO CONTROLE DA CORROSÃO PARA O BENEFÍCIO SÓCIO-ECONOMICO DA SOCIEDADE, PARA A PRESERVAÇÃO DE RECURSOS E PROTEÇÃO DO MEIO-AMBIENTE**

**Aços Inoxidáveis → Solução para o combate a corrosão, desperdício, paradas, custos diretos e indiretos....**

**No entanto....**

**Ao contrário do que se pensa, os inoxidáveis quando mal aplicados podem apresentar ataques corrosivos.**



**Dessa forma, é vital que sejam conhecidos os mecanismos de ataques aos inoxidáveis e a suas prevenções.**

**Corrosão:** No caso de metais, significa degradação do material, por ação eletroquímica de sua superfície com ambiente que o envolve. Ela impacta em diversas propriedades dos materiais, na aparência, e no caso específico dos inoxidáveis, na assepsia.

# CORROSÃO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS

## Principais causas:

- **Seleção inadequada de materiais**
  - ✓ Localização
  - ✓ Meio e condições (processo, temperatura, pressão, etc..)
- **Manuseio inadequado → contaminação → convite a ataques**
- **Falta de tratamento superficial pós-soldagem ou outras operações.**
- **Troca de material**
- **Problemas na montagem → solda, manuseio etc**
- **Descontrole de processo**
- **Falha em Projeto**
- **Defeito de matéria-prima**
  - ✓ Composição Química em desacordo
  - ✓ Estrutura em desacordo
  - ✓ Outros



## Corrosão Via -Umida

Fenômenos e Mecanismos associados com temperaturas próximas ao ambiente, em meios líquidos ou úmidos .

### Geral

Perda de massa generalizada

Meios ácidos ou Sol. Alcalinas

### Localizada

Falha pontual típica

Íons cloreto ou halogenetos

- Corrosão Geral (Uniforme)
- Corrosão por Pite (Alveolar)
- Corrosão em Fresta
- Corrosão sob Tensão (CST)
- Corrosão Intergranular
- Corrosão Microbiológica (MIC)
- Outros Fenômenos
  - ✓ Corrosão-Erosão
  - ✓ Corrosão Galvânica
  - ✓ Outros

## Corrosão Alta Temperatura

Fenômenos e Mecanismos associados quando o filme passivo fica exposto a temperaturas acima de 400 °C

### Oxidação

### Específicos

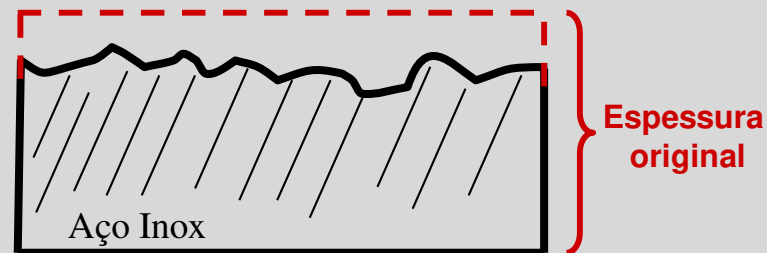
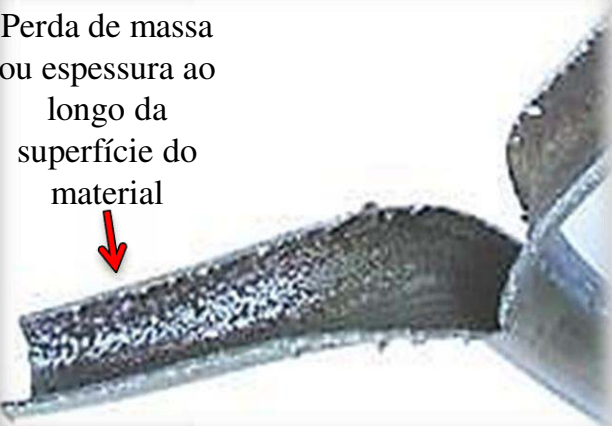
Presença de S

Presença de C

Outros

# CORROSÃO GERAL

Perda de massa ou espessura ao longo da superfície do material



- Perda de espessura homogênea ao longo de uma superfície inoxidável.
- Ocorre principalmente em meios contendo ácidos fortes (usualmente inorgânicos e redutores, como sulfúrico) e soluções alcalinas aquecidas.
- Como em qualquer situação quanto maior a estabilidade do filme passivo, maior a resistência a ataques.
- A resistência a corrosão geral aumenta a medida que elevam-se os teores de Cr, Mo, Ni, além de outros elementos específicos como o Cu (ácidos inorgânicos).



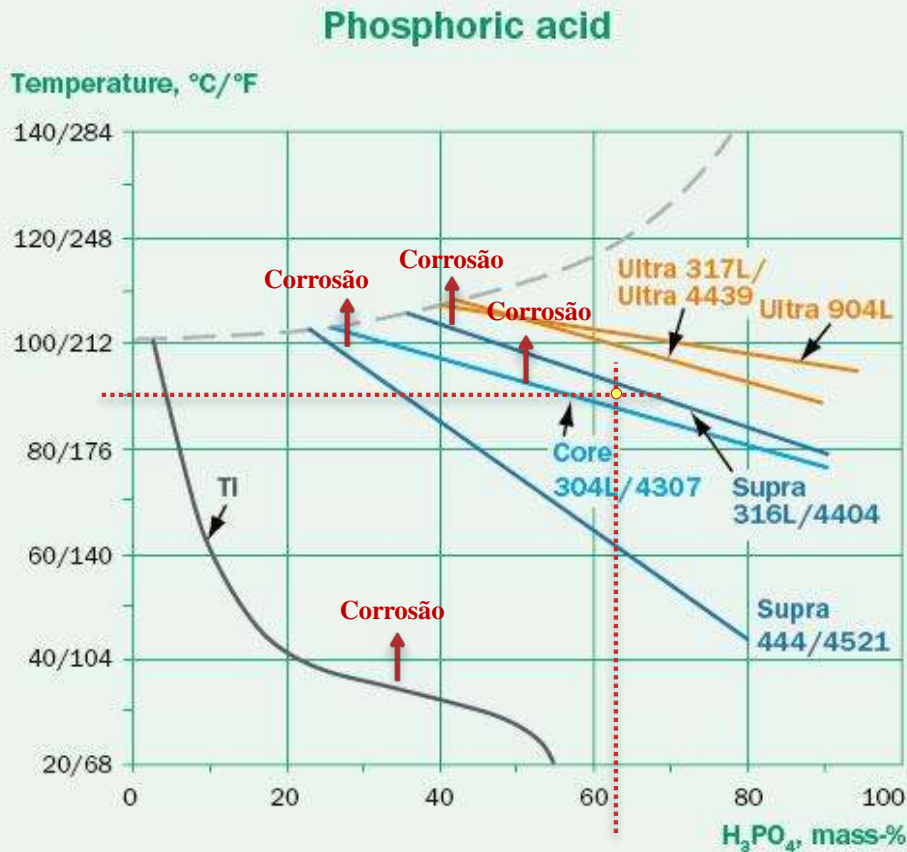


# CORROSÃO GERAL

## Seleção de Material

### Diagrama de ISO-Corrosão

Meio: Ácido Fosfórico (63%)  
Temperatura 90°C



### Tabela de Corrosão (Corrosion Table)

Meio: Ac. Fosfórico (41%) + Ac. Sulfúrico (3%)  
Temperatura 80°C

#### Phosphoric acid + sulphuric acid

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> conc % *	40%	41.4%	41.4%	43%	53%	76%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc % *	2%	2%	3.5%	47%	15%	3.5%
Temp °C	BP	80	80	70	60	80
Carbon steel	×	×	×	×	×	×
Moda 410S/4000	×	×	×	×	×	×
Moda 430/4016	×	×	×	×	×	×
Core 304L/4307	×	×	×	×	×	×
Supra 444/4521	×	×	×	×	×	×
Supra 316L/4404	×	○	●	●	×	●
Ultra 317L/4439	×	○	○	●	×	○
Ultra 904L	×	○	○	●	●	○
Ultra 254 SMO	●			●	○	
Ultra 4565	●			●	○	
Ultra 654 SMO	○			●	●	
Forta LDX 2101						
Forta DX 2304						
Forta LDX 2404						
Forta DX 2205	●			●	○	
Forta SDX 2507	●			●	○	
Ti	×	×	×	×	×	×

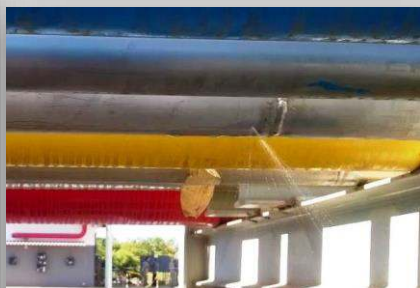
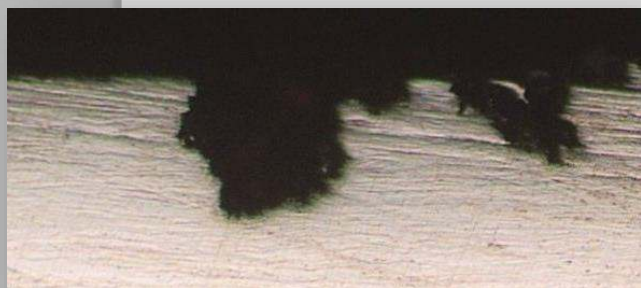
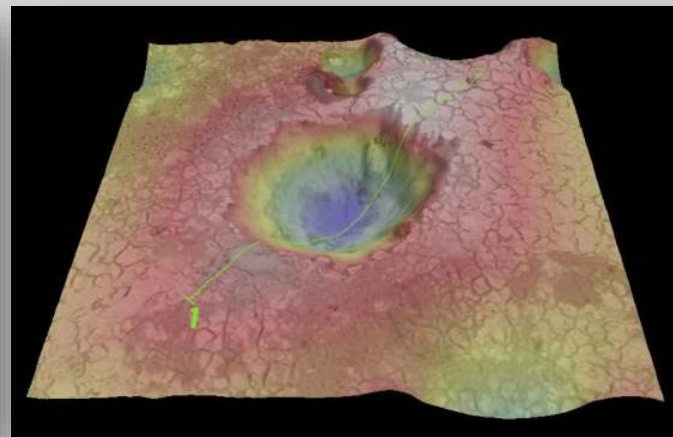
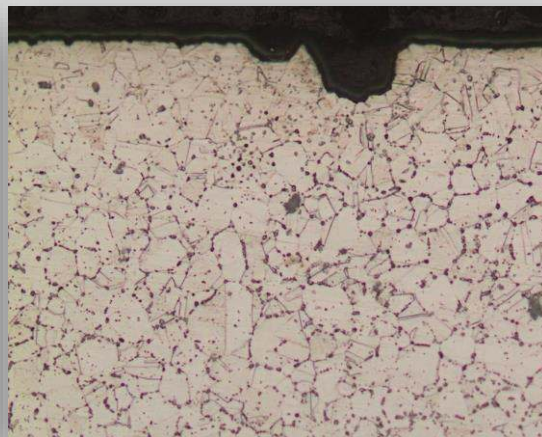
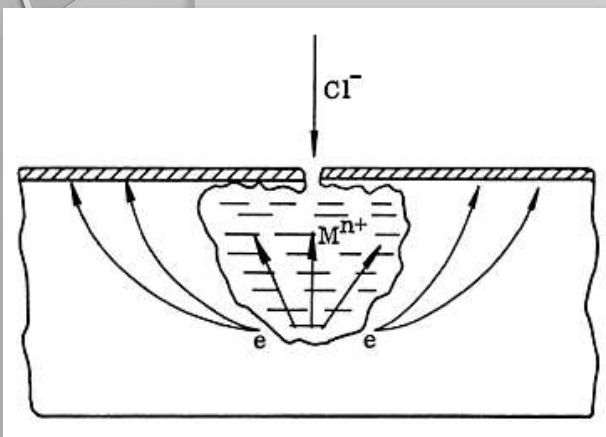
- The material is corrosion resistant. Corrosion rate less than 0.1 mm/year.
  - The material is not corrosion resistant, but useful in certain cases. Corrosion rate 0.1 - 1.0 mm/year.
  - ×
- Serious corrosion. The material is not usable. Corrosion rate over 1.0 mm/year.

## CORROSÃO POR PITES



- Esse fenômeno, com menor incidência, também recebe o nome de Corrosão Alveolar ou Puntiforme.
- Trata-se de corrosão localizada, sendo cavidades ou pites que se desenvolvem quando os aços inoxidáveis são expostos a soluções contendo elementos halogênios (família 7 A da tabela periódica) os quais, quando na forma de íons (cloreto, fluoreto, brometo e iodeto), tentam localmente penetrar no filme passivo dos inoxidáveis que, por alguma razão encontra-se debilitado, sejam por inclusões não-metálicas na liga, contaminações superficiais, irregularidades etc.
- Os íons cloreto aparecem prioritariamente como os principais agentes causadores de ataques pontuais ou pites.

# CORROSÃO POR PITES



- O Cl é um elemento halogênio → Família 7A da tabela periódica → 7 elétrons na última camada de valência → Tendência a buscar ligações químicas → Tendência a ataques.
- Assim, o pite se inicia (nucleação) numa região ínfima, onde o cloreto busca de fato a estabilidade.
- A propagação do mesmo ocorre por diversos fenômenos eletroquímicos no fundo do pite, onde o pH é levado a valores extra-baixos e não se torna possível uma repassivação da região.
- A atividade do pite será tanto maior quanto maior for a temperatura e a oferta de cloretos no meio.

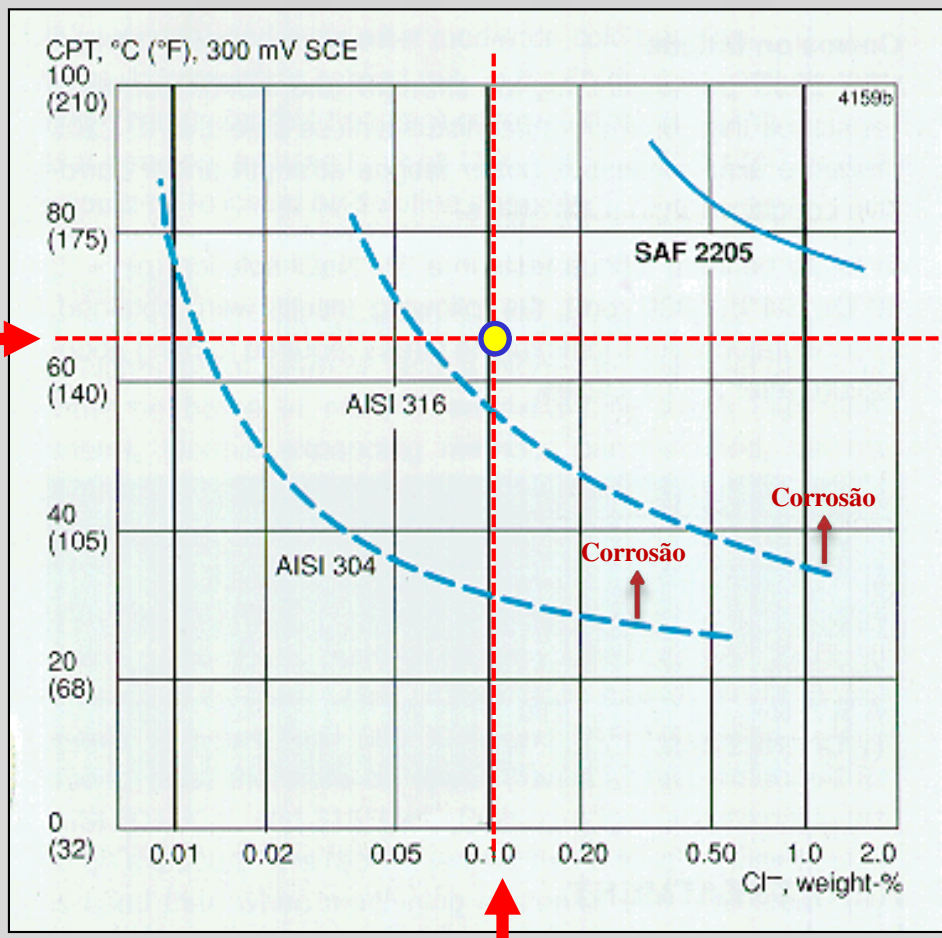


**Produto: Tubo em AISI 316L**  
**Condições: Temperatura = 65°C**  
Nível de cloreto medido: 0,108%



### Temperatura Crítica Pite x Teor de cloretos (%) CPT (Critical Pitting Temperature)

65 °C

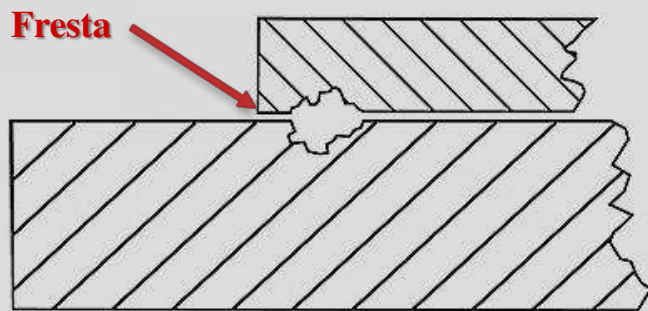


0,108 %

## CORROSÃO EM FRESTA



- Como o próprio nome sugere, tal fenômeno ocorre em espaços estreitos e reduzidos, denominados frestas.
- Normalmente associada a ambientes cloretados.
- Muito relevante em sistemas submarinos



1. Soluções, mesmo com baixos teores de cloretos, acabam por acumular tais íons em frestas, surgindo assim uma região com picos desse agente corrosivo.
2. Outro agravante é o fato destas regiões apresentarem pouca demanda de oxigênio, debilitando a camada passiva



**PITE**



# CORROSÃO EM FRESTA

Tanque construído em AISI 316L  
Industria Farmacêutica

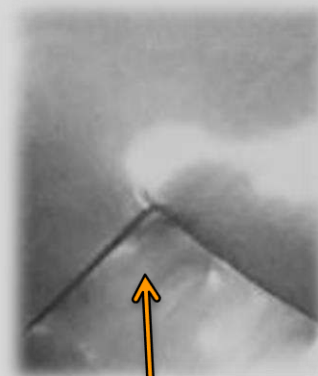
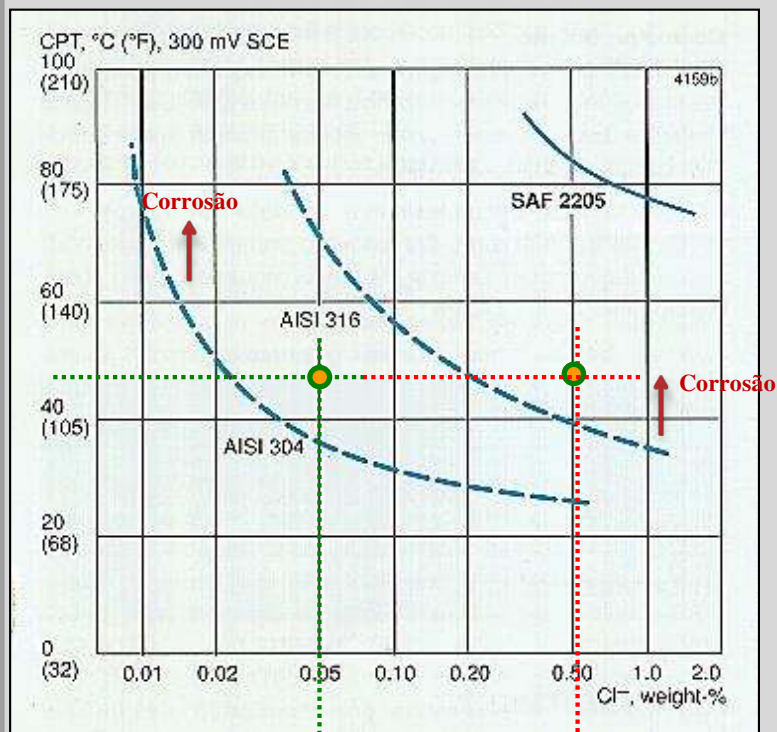
Condições:

- Temperatura = 55°C
- Nível de cloreto = 0,05% ou 500 ppm



- Falha (vazamento pelo fundo) detectado após 3 semanas de uso.
- Na inspeção → Fresta no fundo, interno ao tanque.

Temperatura Crítica Pite x Teor de cloretos (%)  
CPT (Critical Pitting Temperature)

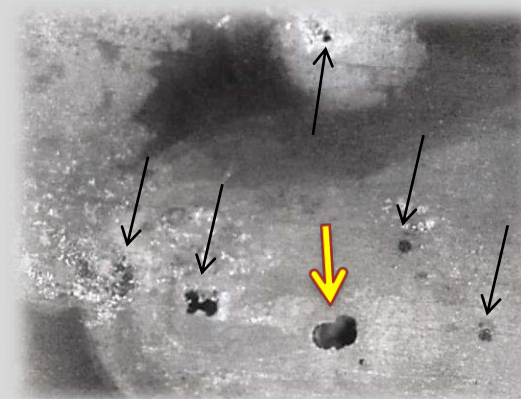


Fresta

A concentração de íons cloreto, dependendo dos ciclos de utilização do vaso, pode elevar-se, dentro da fresta, em até 10x em poucos dias.



Nesse caso, teríamos então, na fresta, uma concentração alterada para 0,05% x 10 = 0,50% de íons cloreto (dentro da fresta)



Dentro da Fresta

# CORROSÃO EM FRESTA

AS FRESTAS PODEM SE FORMAR A PARTIR DE:

## Junção Metal/Metal (Exemplos)

- Tubo/espelho (chicana) em trocadores de calor
- Flanges em sistemas diversos



Fresta

Lado Externo

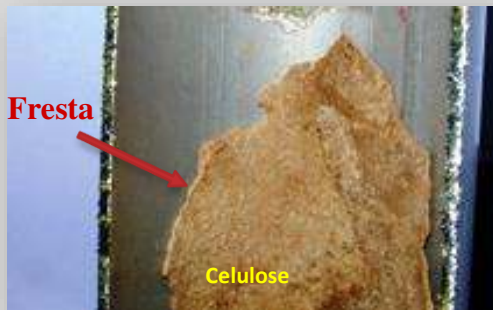


Lado Interno



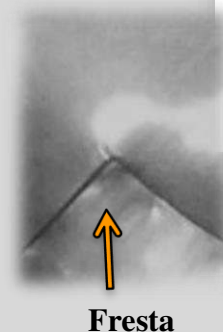
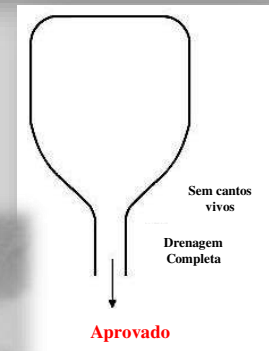
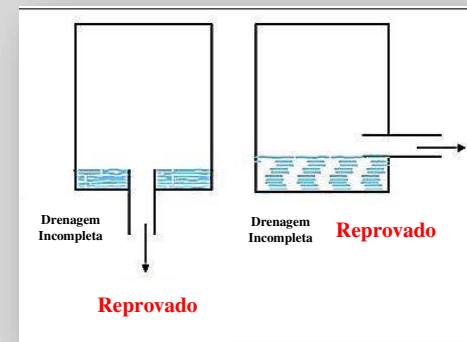
## Junção Metal/Não-Metal (Exemplos)

- Incrustações diversas
- Tubulações submersas → vida

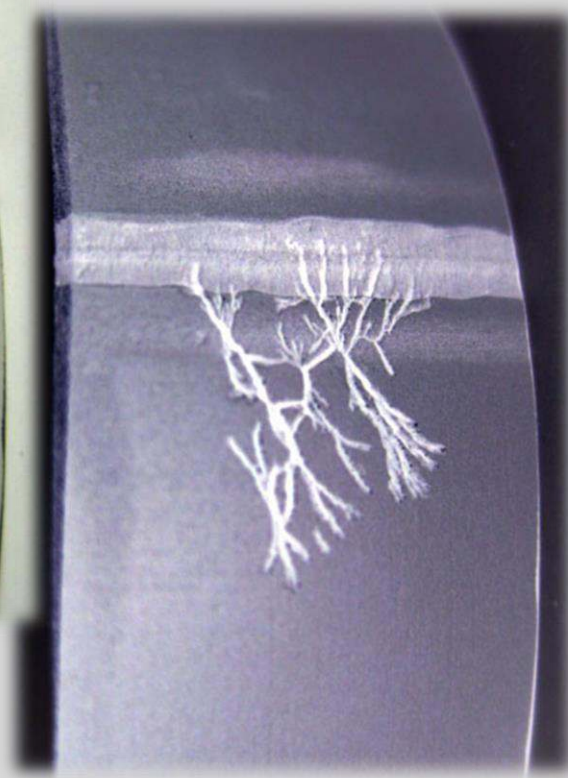


## Erros de Projeto (Exemplos)

- Design de tanques
- Posição do cordão de solda



## CORROSÃO SOB TENSÃO







# CORROSÃO SOB TENSÃO

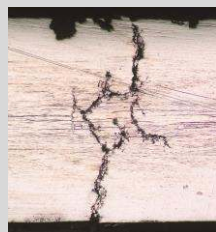


- Cloretos
- Cáusticos
- H<sub>2</sub>S
- Outros

Meio  
agressivo

Aços Inoxidáveis austeníticos são mais propensos ao fenômeno da CST, devido a sua estrutura CFC. Aços inox ferríticos que apresentam estrutura ferrítica (CCC) ou parcialmente ferrítica (duplex) são mais resistentes, fato porém que não os imunizam contra o fenômeno.

Corrosão  
Sob  
Tensão



Tensões no  
inoxidável

Temperatura  
(≥ 30°C)

- Residuais
- Térmicas de Soldagem
- Dinamicamente Aplicadas



# CORROSÃO INTERGRANULAR

**Material Susceptível**



**Temperatura: 450 e 880°C**

**+**

**Tempo**



**SENSITIZAÇÃO**



**Meio Corrosivo**



**CORROSÃO INTERGRANULAR**



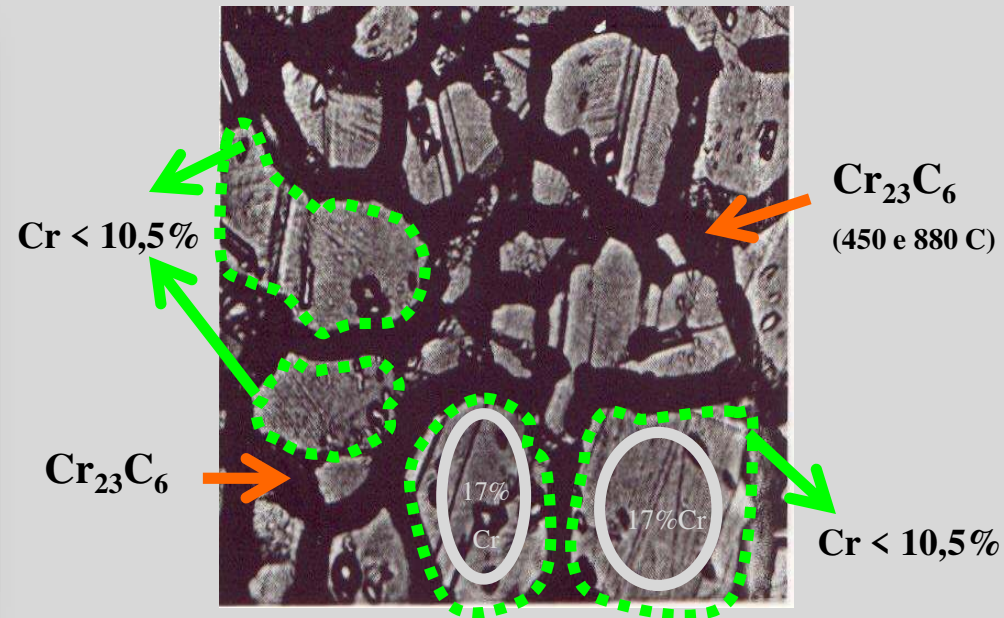
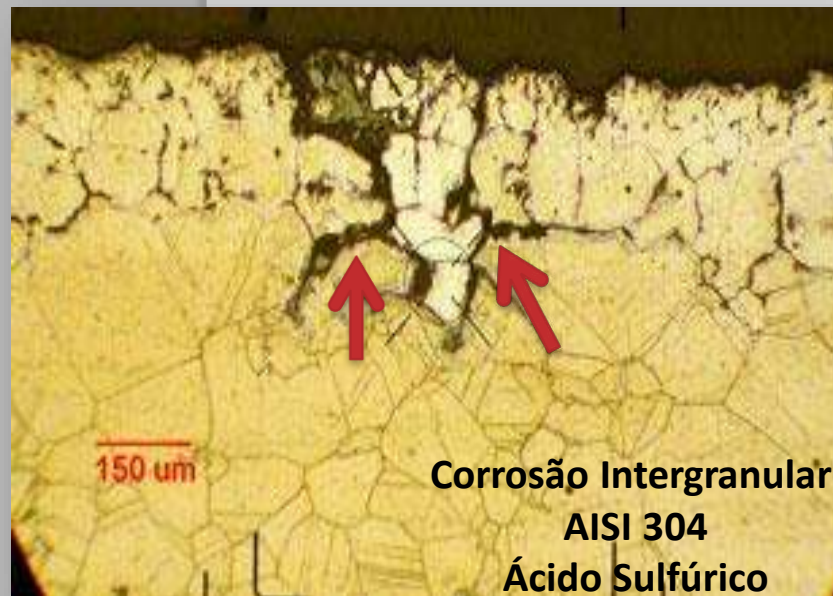
# CORROSÃO INTERGRANULAR

**TUDO COMEÇA COM O FENÔMENO DA SENSITIZAÇÃO**

Durante uma solda, por exemplo....

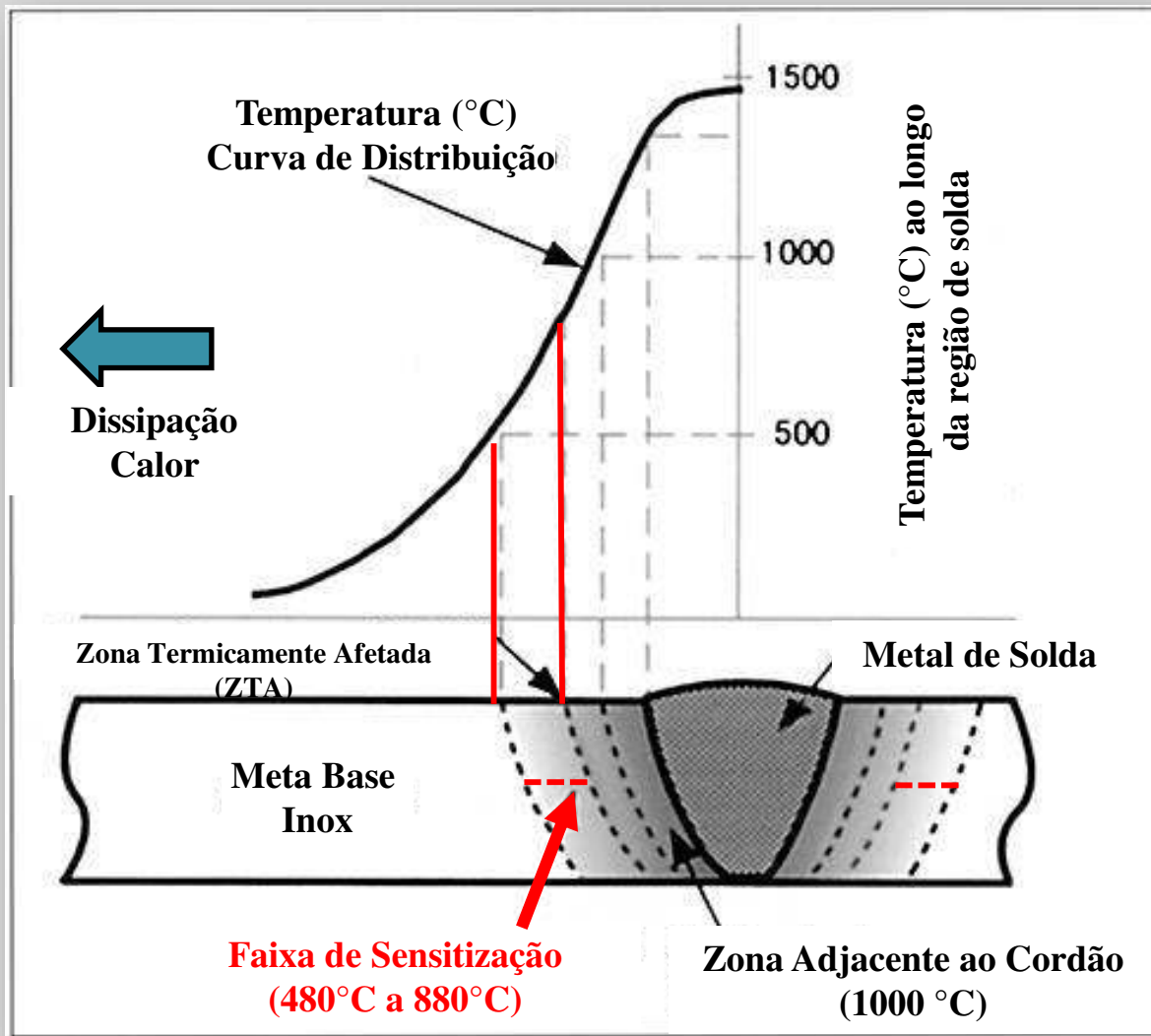
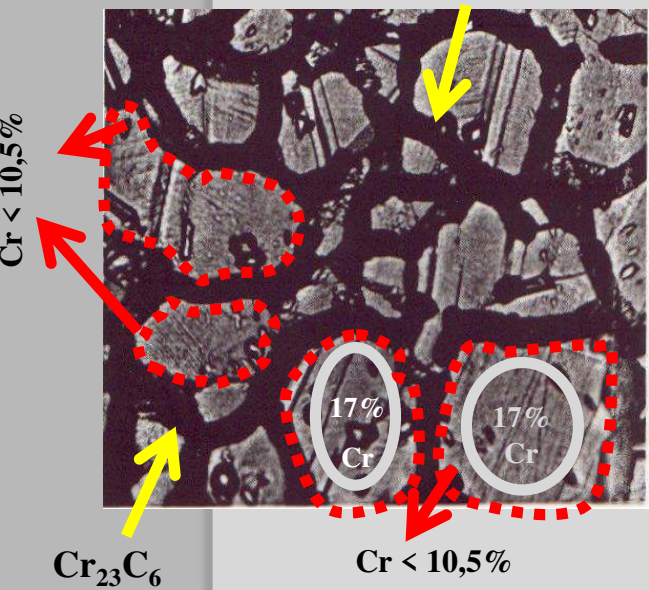
Região adjacente ao cordão passará pela faixa de temperatura entre 450°C e 880°C.

Nessa faixa → **Carbono** e **Cromo** apresentam grande afinidade e formam nos contornos de grão,  **$Cr_{23}C_6$**  (carboneto de cromo)..empobrecendo uma região que circunda o contorno de grão.....



**FENÔMENO DA SENSITIZAÇÃO**

$Cr_{23}C_6$   
(precipitação entre 480 e 880 C)





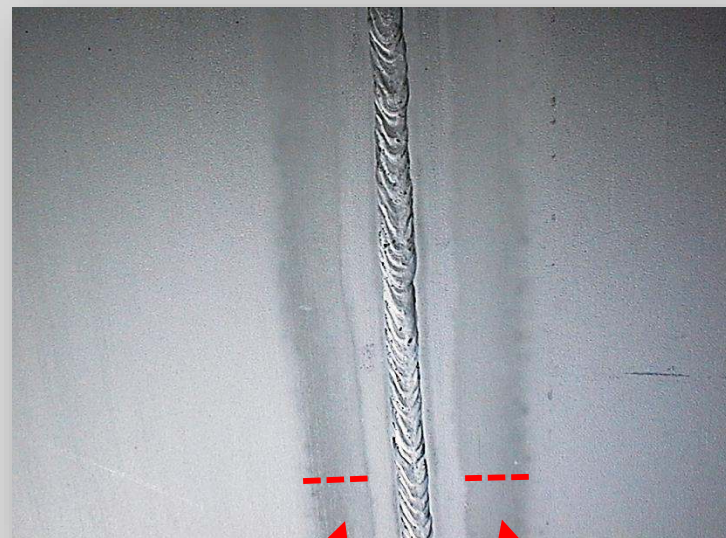
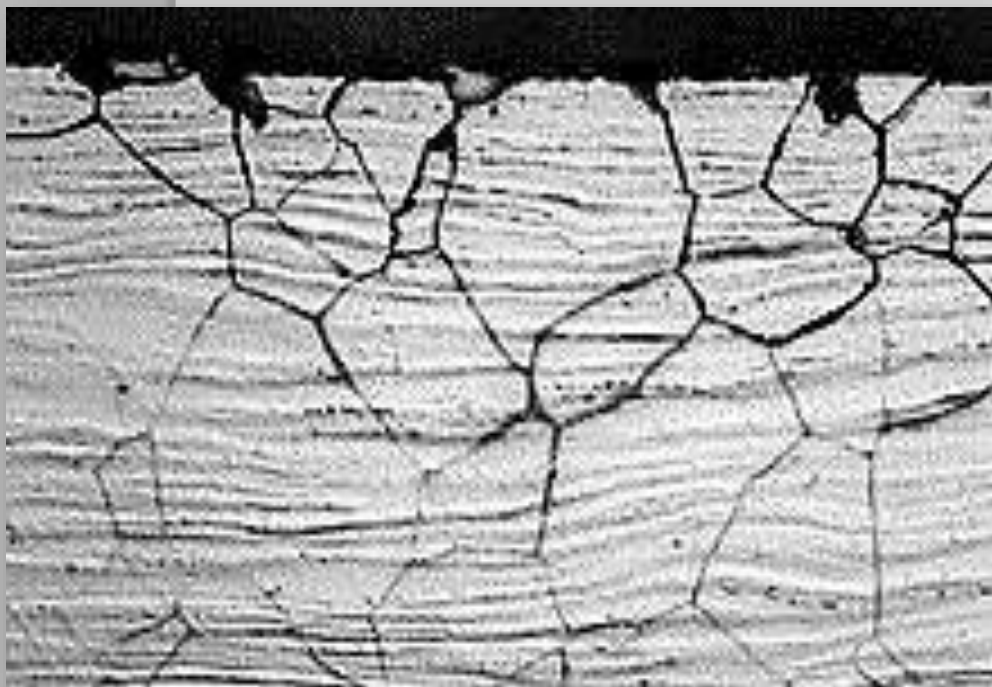
**MATERIAL A PARTIR DE  
SENSITIZADO...**



**MEIO CORROSIVO**



**CORROSÃO  
INTERGRANULAR**



**Zona de Sensitização (480°C a 880°C)**

## CORROSÃO INTERGRANULAR

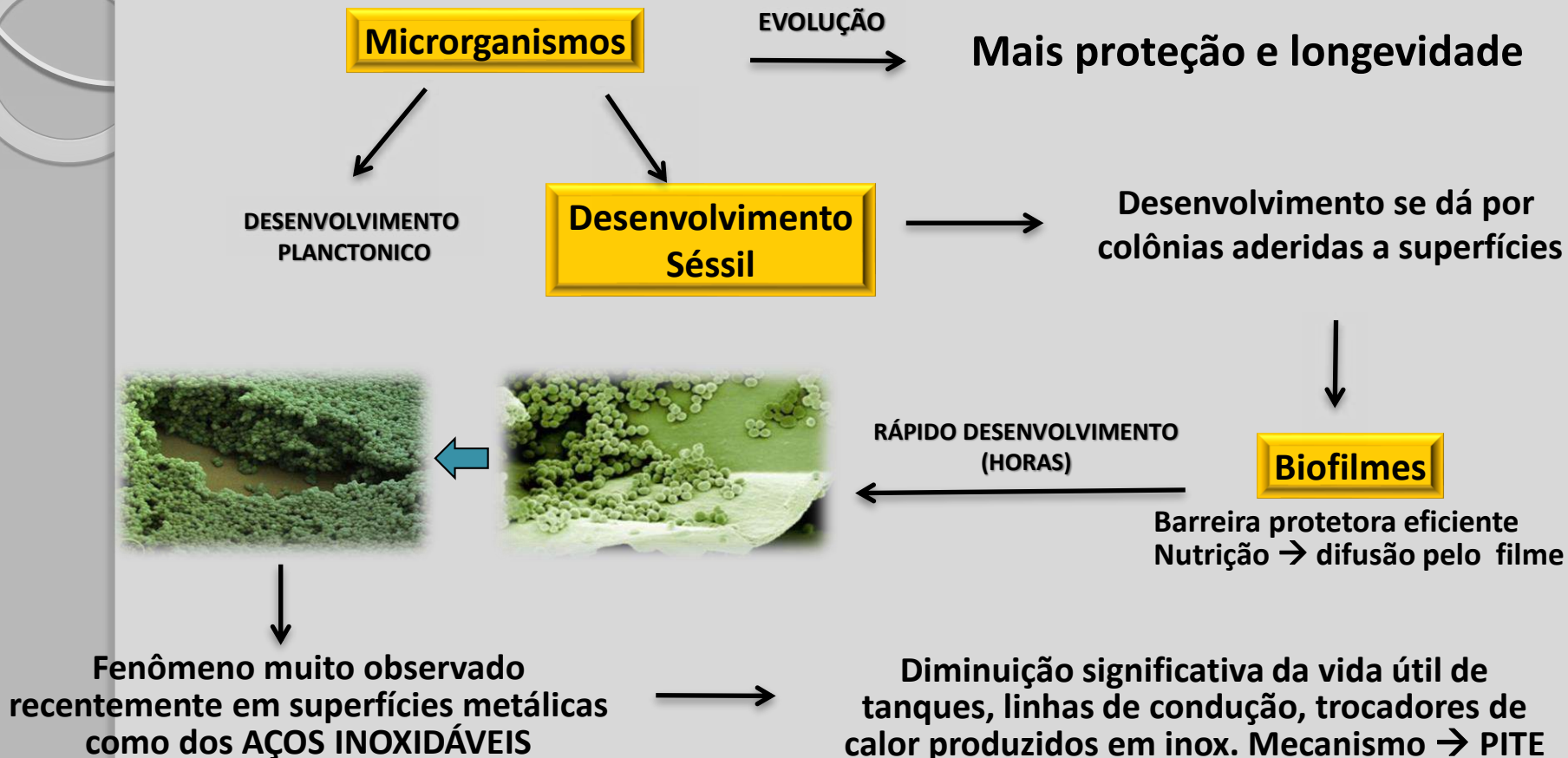
Uma vez que o fenômeno não é observável a olho nu, tal corrosão só é percebida quando um vazamento está em andamento, tornando-a extremamente perigosa.



Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura  
Corrosão Intergranular em AISI 304  
Ácido Sulfúrico - solução aerada 0,5M



# CORROSÃO MICROBIOLÓGICA



A essa interação entre colônia de microrganismos, formação de biofilme e posterior aceleração dos processos de deterioração de materiais, dá-se o nome de **Corrosão Microbiológica** (MIC - Microbiologically Induced Corrosion)

# CORROSÃO MICROBIOLÓGICA

Trata-se de uma matéria multidisciplinar.

O estudo a respeito de biofilmes requer conceitos relacionados à Microbiologia, Bioquímica, Química, Engenharia e Medicina.

## ANTES DE ABORDAR A CORROSÃO E OS BIOFILMES....

As desvantagens relacionadas à formação de biofilmes podem ser as seguintes:

Em trocadores de calor dificultam a transferência de calor, implicando na elevação de custos com limpeza e biocidas;

Em sistemas de membranas causam entupimento e contaminação microbiológica.

São contaminantes da água potável, por produzirem metabólitos que causam odor e sabor desagradável, além da patogenicidade.

Muitas outras...

# CORROSÃO MICROBIOLÓGICA

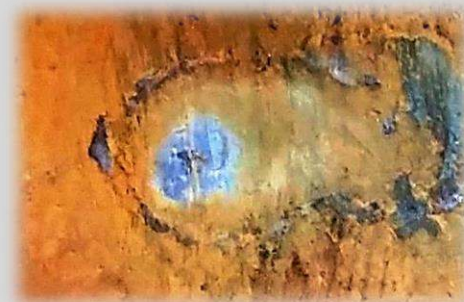
DEPOIS DE ADERIDOS A UMA SUPERFÍCIE INOXIDÁVEL, OS  
MICRORGANISMOS PARTICIPAM DO PROCESSO DE CORROSÃO POR TRÊS  
FORMAS:

- Pela produção secundária de substâncias corrosivas em função do seu metabolismo.

**IMPORTANTE:** *Para obter aderência máxima, os microrganismos sintetizam substâncias poliméricas.*

- Criando pilhas de aeração diferencial, onde áreas ficam expostas a diferentes concentrações de oxigênio, justamente pela presença do biofilme aderido.

- Pelo consumo direto de elemento químico contido na liga metálica e essencial para o metabolismo dos microrganismos. Mecanismos preferencial → PITE



# CORROSÃO MICROBIOLÓGICA

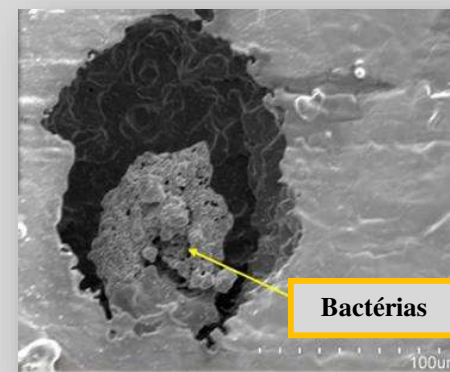
CRESCIMENTO ASSUSTADOR DE CASOS NOS ÚLTIMOS ANOS....  
QUAIS SERIAM OS MOTIVOS?

## MICROORGANISMOS

Grande capacidade de resistência e adaptação a condições ambientais extremas tais como: temperaturas entre  $-12^{\circ}\text{C}$  e  $110^{\circ}\text{C}$ ; valores de pH entre 0,5 e 13; pressões entre 0 e 1400 bar,

Tais características que favorecem a presença das bactérias em muitos processos fabris, tais como: papel e celulose, petroquímico, álcool e alimentício. Estes processos industriais têm condições ótimas para o desenvolvimento de bactérias

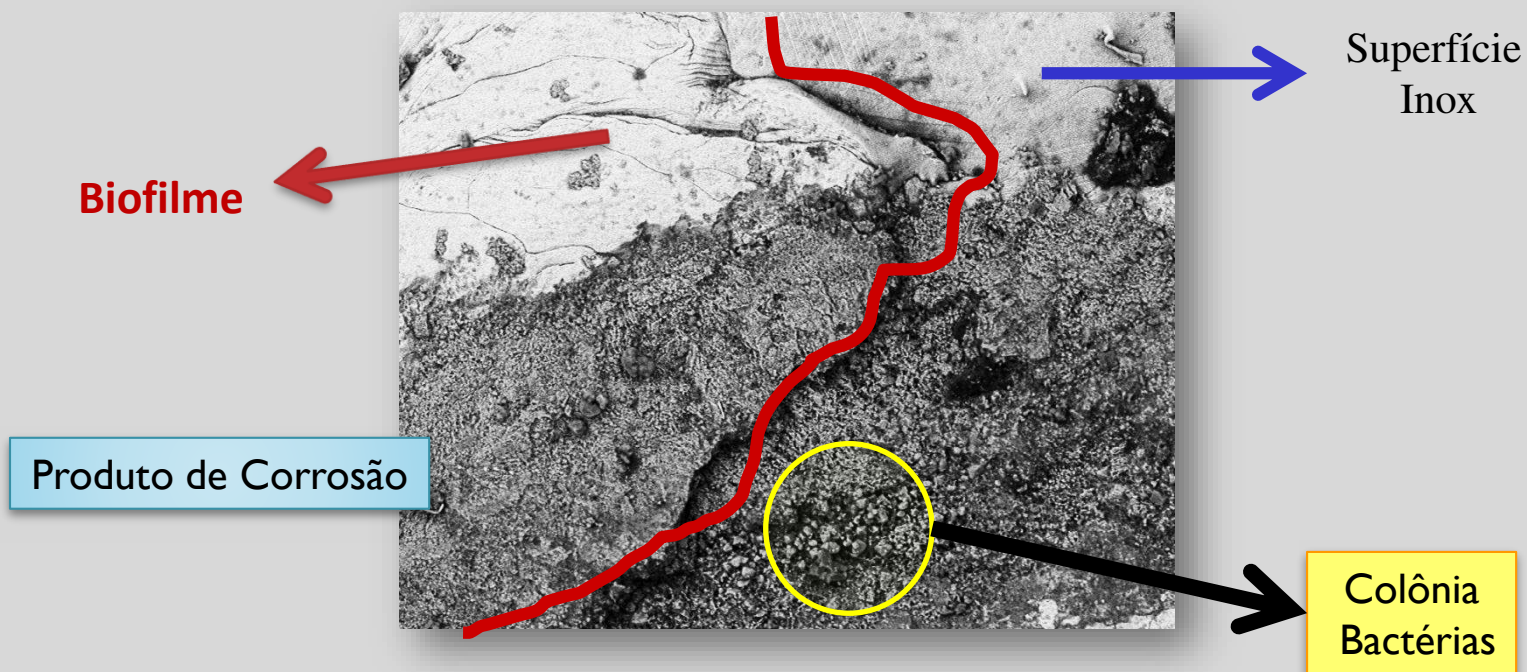
Estima-se que mais de 90% dos microrganismos vivem no planeta Terra sob a forma de biofilme, cuja composição microbiana na sua maioria é de bactérias (98%) e o Restante são algas, fungos, protozoários, substâncias poliméricas extracelulares





## CORROSÃO MICROBIOLÓGICA

Diversas classes de bactérias relatadas como sendo os principais microrganismos responsáveis por ataques observados aços inoxidáveis. Sabe-se que a composição do biofilme nunca é composta apenas de uma espécie de microrganismo, no entanto, é possível associar um processo de MIC a um microrganismo responsável.



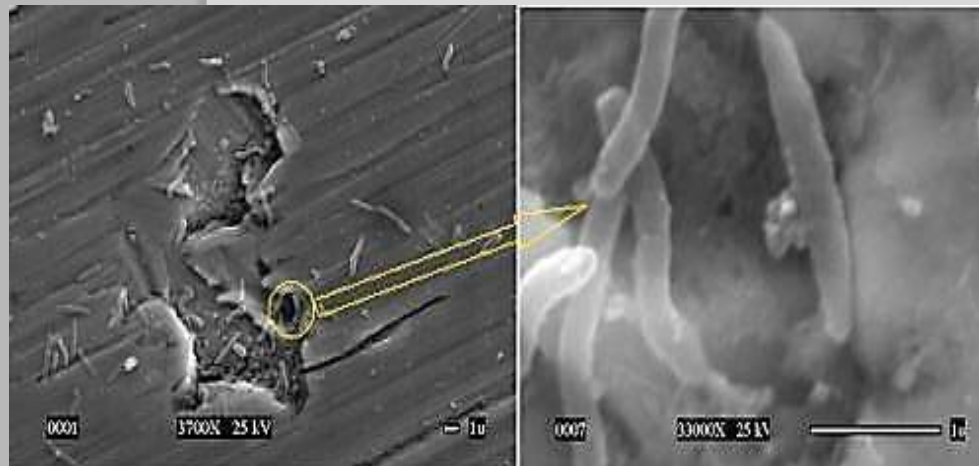
# CORROSÃO MICROBIOLÓGICA

## SRB

## IOB

De uma forma geral, a classe de bactérias mais estudada se denomina SRB (Sulphate-Reducing Bacteria), que inclui espécies como a *Desulfovibrio* e *Desulfomaculum*.

Do grupo IOB (Iron-Oxidising Bacteria) a *Gallionella*, *Leptothrix* e *Siderocapsa* aparecem como as mais mencionadas. Muitos estudos associam a presença destas duas últimas a fenômenos de MIC em aços inoxidáveis aplicados em sistemas de água.



# CORROSÃO MICROBIOLÓGICA

## Ação Corretiva

**A partir da certeza do fenômeno e da classificação dos microrganismos envolvidos, técnicas atuais de controle podem ser avaliadas, tais como:**

- A operação de *flushing* com produtos decapantes à base de ácido nítrico + fluorídrico, aparece como excelente opção para limpeza e repassivação de uma linha de água construída em aço inoxidável austenítico.
- Emprego de biocidas modernos e ecologicamente aceitos com destaque para o THPS, tido como mais promissor dos agentes antibacterianos, atuando em grande espectro e sobre a ação de uma variedade importante de microrganismos.
- Desenvolvimento de estratégia de exclusão biocompetitiva, que envolve o emprego de nutrientes que estimulam o crescimento competitivo de bactérias tipo NRB, capaz de inibir microrganismos danosos de uma comunidade.

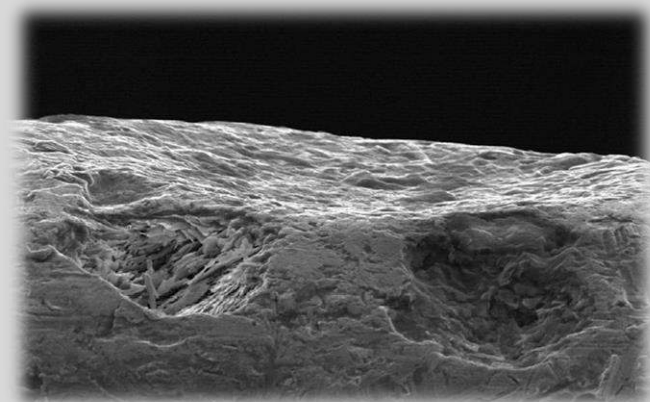
# CORROSÃO-EROSÃO

## AÇÃO SIMULTÂNEA



**MEIO CORROSIVO + EROSÃO / ABRASÃO (Tribologia)**

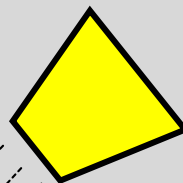
A ação erosiva sobre o filme passivo, prejudica a resistência a corrosão do material que, submetido a um meio agressivo, tende a ser corroído.



**Meio corrosivo/agressivo**



**Partículas Sólidas  
(abrasão)**



Filme Passivo



**Aço Inox**

- Meios com sólidos em suspensão
- Sistemas com água do mar (Óleo&Gás)
- Indústria de sal, calcário etc
- Setor de mineração



## CORROSÃO EROSÃO

Ligas com maior resistência mecânica tendem a apresentar maior resistência ao desgaste.

Destacam-se como excelentes ligas que associam resistência a erosão e resistência a corrosão



Duplex 2507

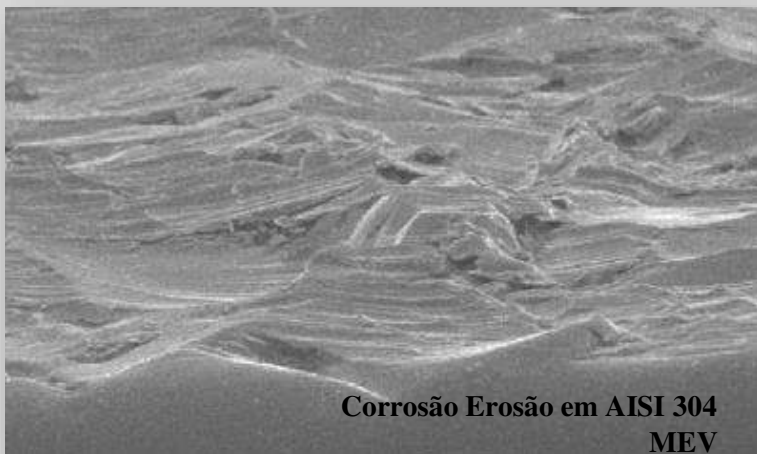
Duplex 2205

17-4 PH

410D



Incremento  
de Resistência  
ao Desgaste



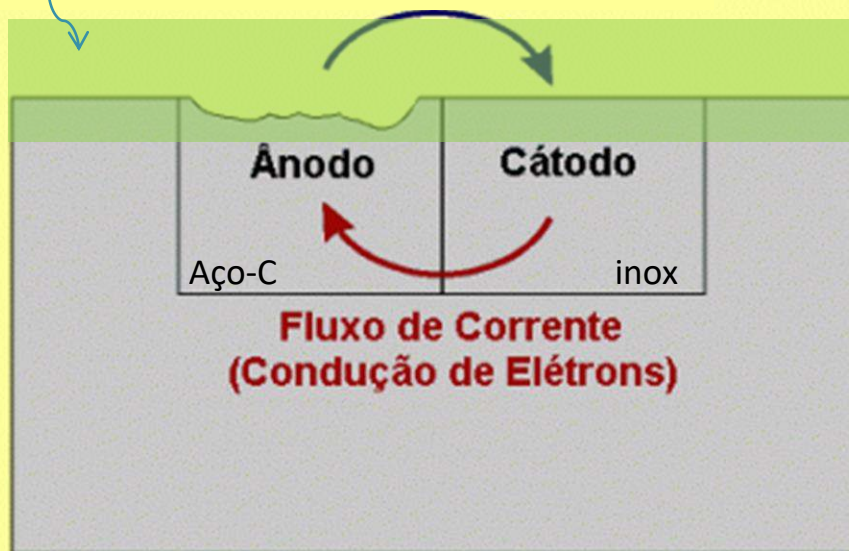
Corrosão Erosão em AISI 304  
MEV

# CORROSÃO GALVÂNICA

Dois metais diferentes, em ambiente contendo eletrólito.  
(meio aquoso condutor de elétrons)

## Formação de Par Galvânico

Eletrólito



## Série Galvânica

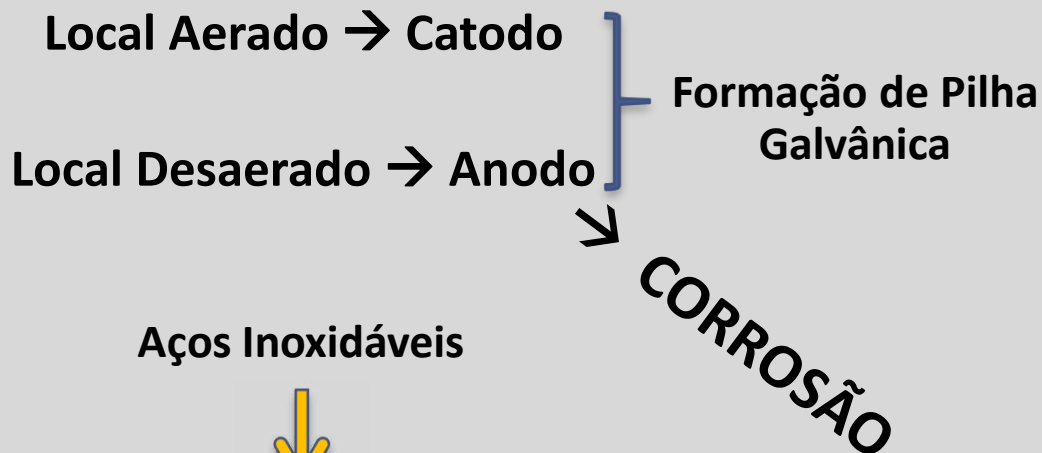


# CORROSÃO GALVÂNICA



# CORROSÃO POR AERAÇÃO DIFERENCIAL

Ocorre quando a superfície do inoxidável fica exposta a diferentes concentrações de oxigênio.



Aços Inoxidáveis



Exemplo

Fenômeno observado em tubulações enterradas!!



# CORROSÃO POR AERAÇÃO DIFERENCIAL

Má compactação da terra sobre a superfície do tubo



Regiões Aeradas (RA) e Regiões Des aeradas (RD)



**Próxima Aula**  
**Aula 5 - Módulo 4**

**Aços Inoxidáveis**  
**Corrosão Alta Temperatura**



*Adayr Borro Jr.*

## Corrosão Alta Temperatura

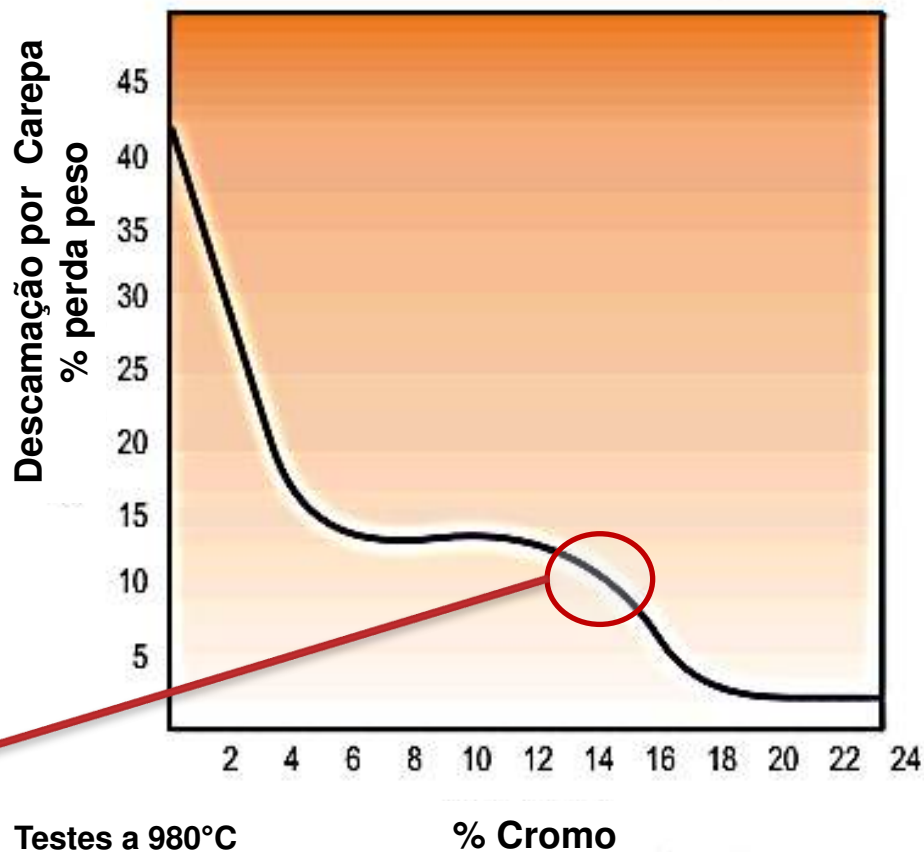
**OXIDAÇÃO**

O teor de cromo elevado é tão benéfico para a resistência de corrosão via úmida quanto para resistência a alta temperatura.

O mecanismo de proteção no caso da Alta Temperatura está associado à formação lenta de óxidos de cromo impuros [(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + Fe, Mn....]



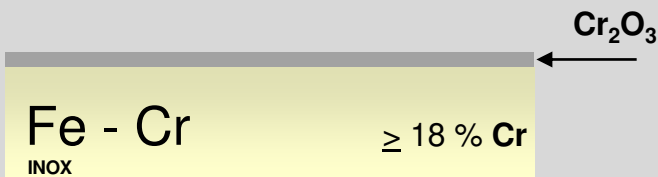
Efeito do Cromo na Resistência a Descamação para aços inoxidáveis



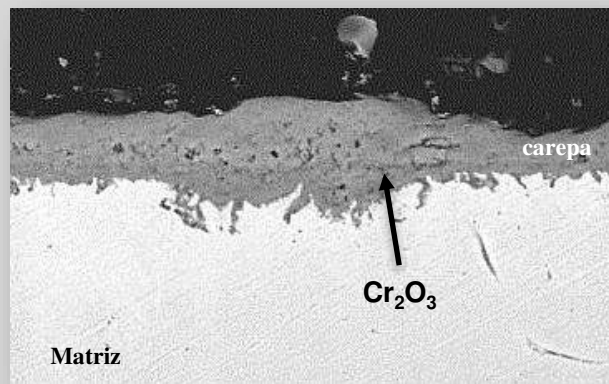
Testes a 980°C

% Cromo

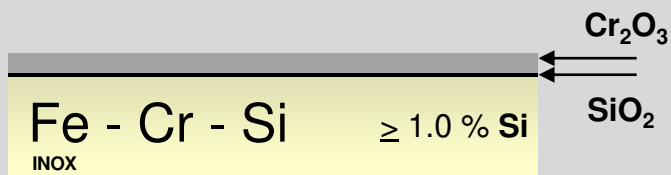
304; 316; 347



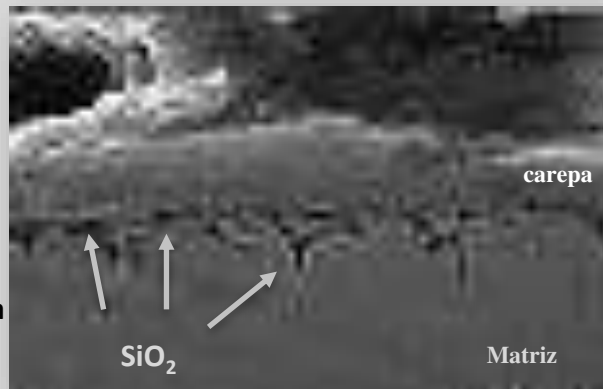
Cr > 17 % → uma carepa contínua de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, proteção contra oxidação + barreira contra a penetração de elementos nocivos



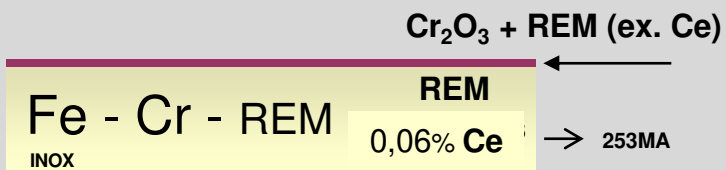
310; 310S



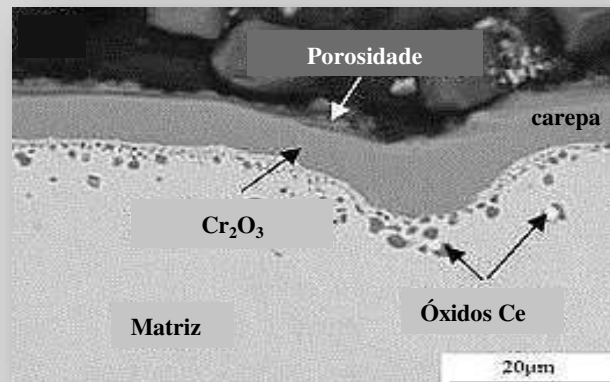
Cr > Si > 1.5 w-%, irá formar uma camada contínua de SiO<sub>2</sub> sob a escala de óxido de cromo, que aumenta a proteção ainda mais



253MA; 353MA



metais de terras raras (REM) melhora aderência e crescimento de escala favoravelmente e diminui a escala de fragmentação na oxidação cíclica





**OXIDAÇÃO**

304; 316; 347

Fe - Cr  $\geq 18\% \text{ Cr}$

←  $\text{Cr}_2\text{O}_3$



310; 310S

Fe - Cr - Si  $\geq 1.0\% \text{ Si}$

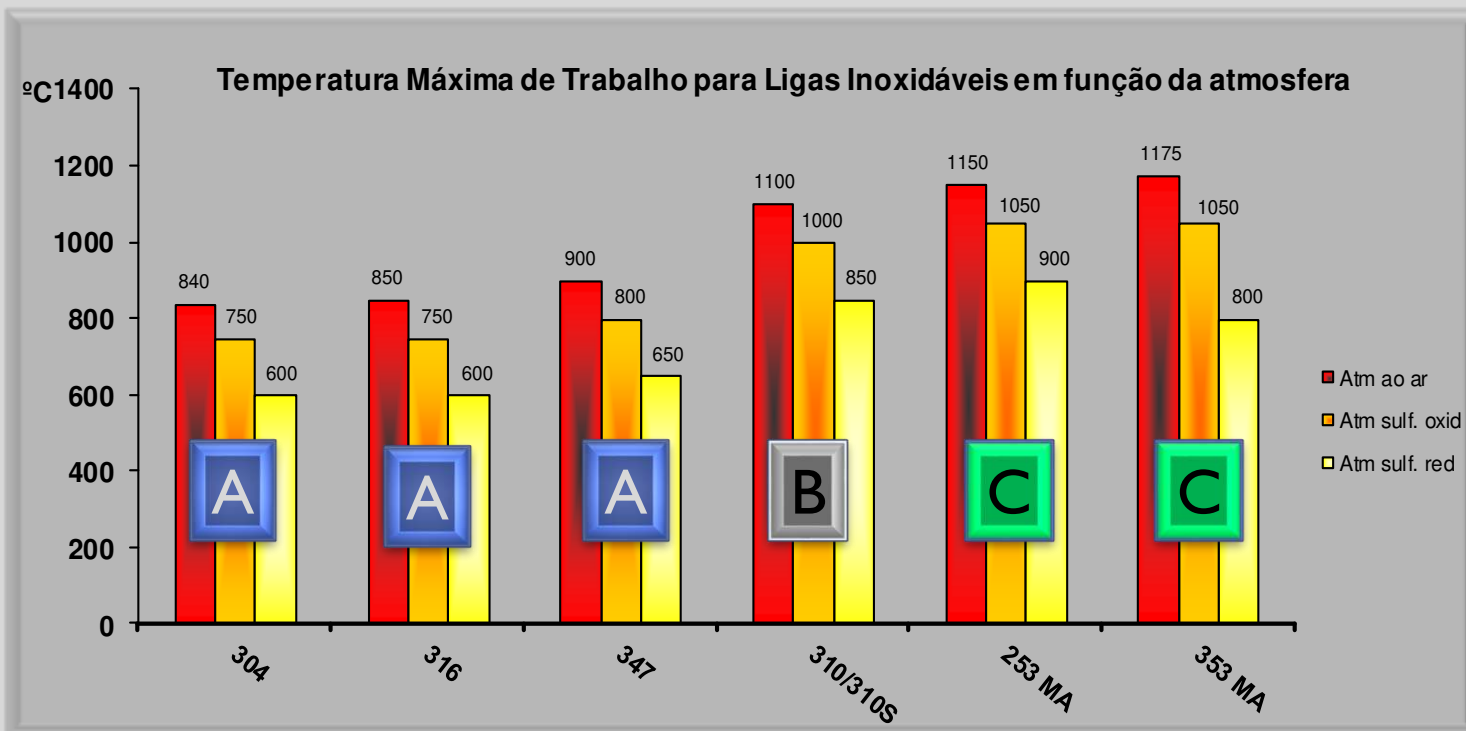
←  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$



253MA; 353MA

Fe - Cr - REM  
REM additions

←  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{REM (ex. Ce)}$





**CURSO FECHADO ON-LINE**

**CURSO COMPLETO**  
**SOBRE AÇO INOXIDÁVEL**



ÚNICO NO BRASIL

