



DEGRADAÇÃO E PROTEÇÃO MATERIAIS

Formas de corrosão:

Corrosão galvânica, em frestas, Corrosão por pites e intergranular

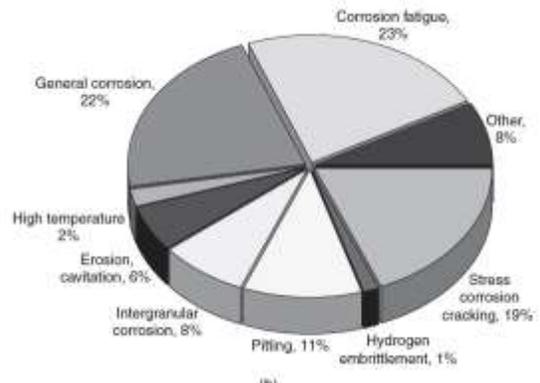
Profa. Maria Ismenia Sodero



Formas de corrosão

- Os tipos de corrosão são denominadas considerando-se a **APARÊNCIA** ou **FORMA** de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos.

- MORFOLOGIA:** uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- CAUSAS E MECANISMOS:** por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (sob tensão), em torno do cordão de solda, seletiva (grafítica ou dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- FATORES MECÂNICOS:** sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- MEIO CORROSIVO:** atmosférica, pelo solo, induzida por microorganismos, pela água do mar, por sais fundidos;
- LOCALIZAÇÃO DO ATAQUE:** por pite, uniforme, intergranular, transgranular.



Fonte: Corrosion Engineering Principles and Practice Pierre R. Roberge, Ph.D.



MORFOLOGIA



UNIFORME



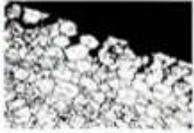
EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE



INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO

EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIOCORDÃO DE
SOLDA

MORFOLOGIA - UNIFORME



UNIFORME



EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE

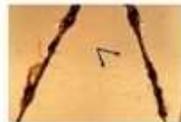


INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR

Corrosão se processo em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO

EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIOCORDÃO DE
SOLDA



MORFOLOGIA - PLACAS

A Corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.



UNIFORME



EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE



INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO

EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIOCORDÃO DE
SOLDA

MORFOLOGIA - ALVEOLAR

A Corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade menor que o diâmetro.



UNIFORME



EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE



INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO

EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIOCORDÃO DE
SOLDA



MORFOLOGIA – PUNTIFORME – POR PITES

A corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.



UNIFORME



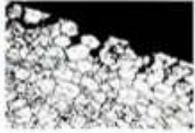
EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE



INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO



EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIO



CORDÃO DE
SOLDA



Corrossão por pite

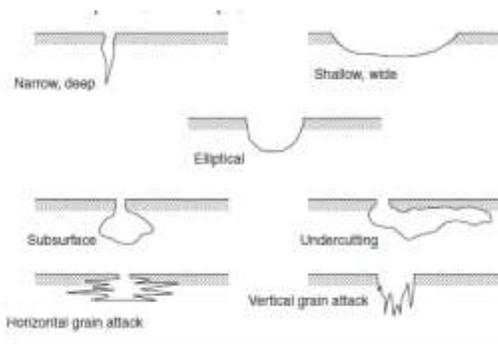


FIGURE 6.11 Typical cross-sectional shapes of corrosion pits.

Varias formas de pites



FIGURE 6.9 Pits in the galvanized water pipe that contributed to the erosion-corrosion of the gas line and the subsequent leak in a sewer main that caused the Guadalajara 1992 explosion [6]. (Courtesy of Dr. Jose M. Malo, Electric Research Institute, Mexico)

Fonte: Corrosion Engineering Principles and Practice Pierre R. Roberge, Ph.D.



MORFOLOGIA - INTERGRANULAR



UNIFORME



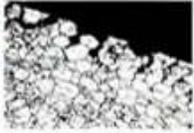
EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE



INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR

A corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo a **corrosão sob tensão fraturante (CTF)**.



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO

EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIOCORDÃO DE
SOLDA

MORFOLOGIA - TRANSGRANULAR



UNIFORME



EM PLACAS



ALVEOLAR



PUNTIFORME / PITE



INTERGRANULAR



TRANSGRANULAR

A Corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas características mecânicas e poderá fraturar à menor sollicitação.



MORFOLOGIA - FILIFORME

A Corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções. Ocorre geralmente em superfície metálicas revestidas com tintas ou metais, ocasionando o deslocamento do revestimento.

Podem estar relacionadas com a umidade do ar, geralmente maior do que 85%.

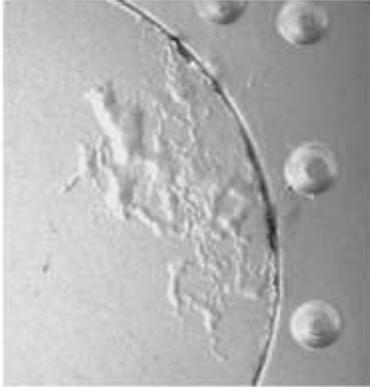


Figura 6.28 Filiform corrosion on an aircraft. (Courtesy of Kingston Technical Software)



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO



EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIO



CORDÃO DE
SOLDA

Fonte: Corrosion Engineering Principles and Practice Pierre R. Roberge, Ph.D.



MORFOLOGIA – POR ESFOLIAÇÃO

A Corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, criando condições para que inclusões ou segregações, presentes no material, sejam transformadas, devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas. O produto de corrosão tem um certo volume e leva a separação das camadas contidas entre as regiões que sofrem ação corrosiva.

Observada em ligas de alumínio das series 2000, 5000 e 7000.



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO



EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIO



CORDÃO DE
SOLDA



MORFOLOGIA – GRAFÍTICA

A Corrosão se processa no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente e o ferro metálico é convertido em produtos de corrosão, restando a grafita intacta



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO



EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIO



CORDÃO DE
SOLDA



Ferro Fundido Cinzento

Ferro fundido cinzento: com a presença da grafita pode produzir significativo amortecimento de vibrações devido ao movimento relativo entre a grafita e matriz, resultando em série de aplicações em que a utilização do ferro fundido é muito mais vantajoso do que o aço.

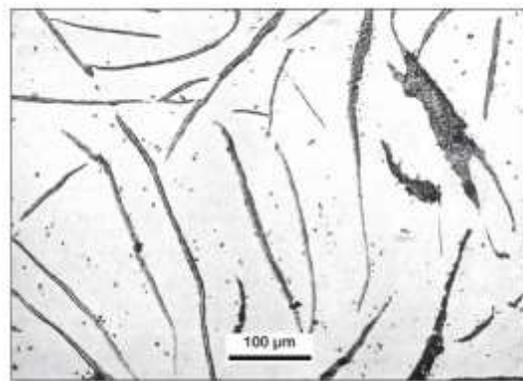


Figura 17.20
Ferro fundido cinzento, com vaços de grafita relativamente grandes. Inclusões não metálicas também são visíveis. Sem anotação.

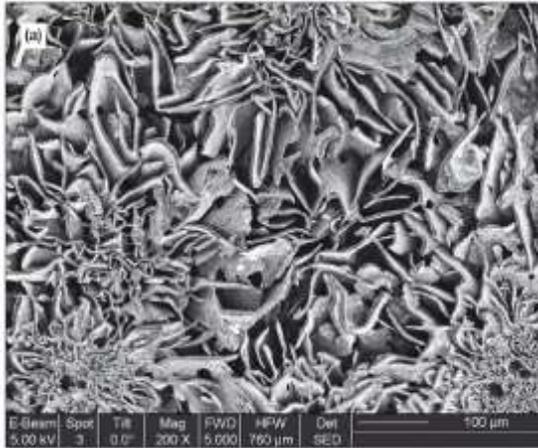


Figura 17.23(a)
Grafita lamelar em ferro fundido cinzento, submetido a ataque químico profundo, para dissolver todo o metal. Ataque: Nital 10%, 2 h. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha.

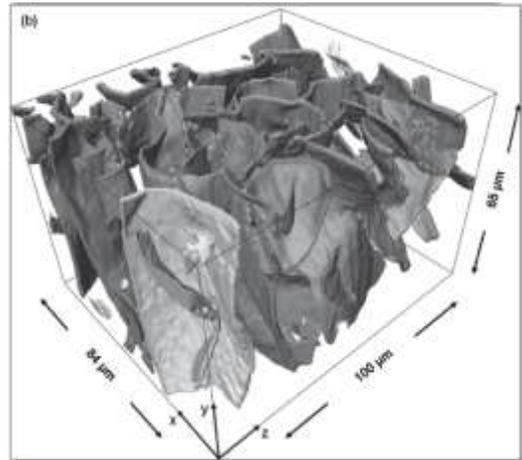


Figura 17.23(b)
Reconstrução tridimensional da grafita lamelar em ferro fundido cinzento. Cortes produzidos por FIB e imagens obtidas por MEV. Cortesia A. Velichko e F. Mücklich, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Alemanha.

Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns –
Hubertus Colpaert



MORFOLOGIA – DEZINCIFICAÇÃO

A Corrosão que ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), sendo uma corrosão preferencial do zinco, restando o cobre com sua cor avermelhada. A dezincificação e a corrosão gráfitica são exemplos de corrosão seletiva.





MORFOLOGIA – EMPOLAMENTO HIDROGRÊNIO

O hidrogênio atômico penetra no material metálico e, como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente, e em regiões com descontinuidades, como inclusões e vazios, ele se transforma em H molecular, H_2 , exercendo pressão e originando a formação de bolhas, daí o nome de empolamento.



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO



EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIO

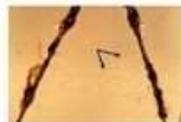


CORDÃO DE
SOLDA



MORFOLOGIA – CORDÃO DE SOLDA

A ocorre em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono acima de 0,03% e a corrosão se processo intergranularmente.



FILIFORME



POR ESFOLIAÇÃO



GRAFÍTICA



DEZINCIFICAÇÃO



EMPOLAMENTO
HIDROGRÊNIO



CORDÃO DE
SOLDA



CORROSÃO POR PITE CARACTERÍSTICAS

- CORROSÃO PERFURANTE
- DIFÍCIL PREVISÃO
- ALTA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

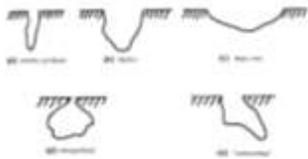
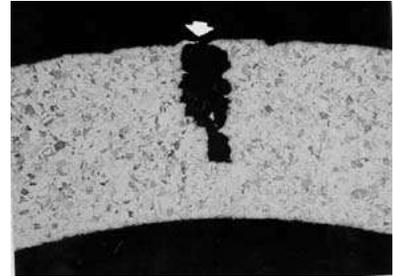
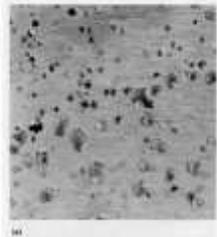


Figura 2.13. Diferentes formas de pite conforme norma ASTM G-46



Relação entre a área do Catodo e Anodo

O princípio fundamental da corrosão, que estabelece que a soma das velocidades de todas as reações anódicas deve ser igual a soma das reações catódicas, é também aplicável ao fenômeno de corrosão localizada, isto é:

$$\sum I_c = \sum I_a$$

onde I_c e I_a são as correntes catódicas e anódicas.

Corrosão uniforme - Assumindo que a área total exposta é tanto anódica quanto catódica:

$$\frac{I_a}{A_a} = i_a = \frac{I_c}{A_c} = i_c$$

Corrosão localizada, a área das regiões predominantemente anódica é menor do que a área das regiões predominantemente catódicas,

$$A_a < A_c$$

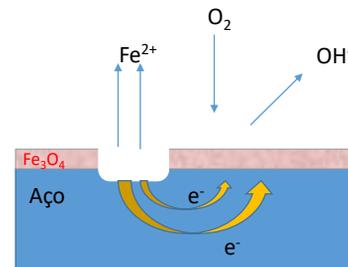
Uma vez que as correntes totais anódicas e catódicas são iguais, a densidade de corrente anódica é maior que a densidade de corrente catódica

$$i_a > i_c$$

Quanto maior a diferença entre i_a e i_c , mais intensa é a corrosão localizada

Exemplo

Superfície de um aço coberta com uma película de Fe_3O_4 condutora, com descontinuidades, é imersa em meio aquoso corrosivo



Superfície de um aço coberta com uma película descontínua de Fe_3O_4 .



CORROSÃO POR PITE MECANISMO

Mecanismo de formação dos pites:

NUCLEAÇÃO:

- adsorção de Cl^-
- concentração crítica de Cl^-
- ruptura das ligações da película passivadora
- região anódica localizada;

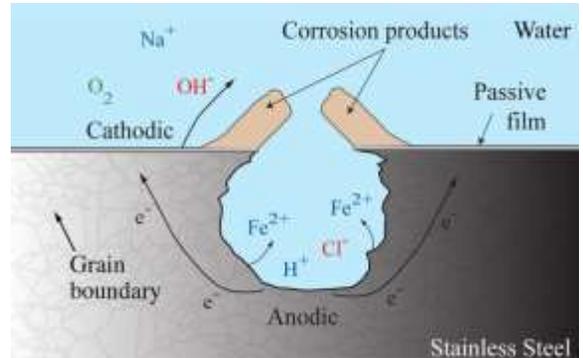
PROPAGAÇÃO

Ocorrem as seguintes reações:

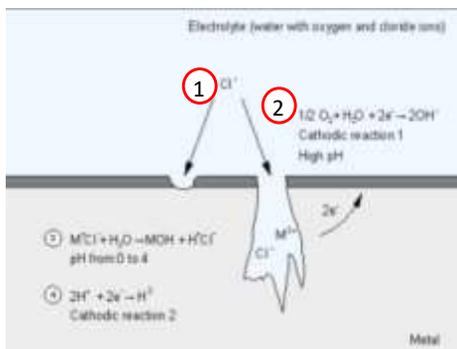
Reação anódica: interior do pite – $\text{M} = \text{M}^{+2} + 2\text{e}$

Reação catódica: filme passivante: $\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e} = 2\text{OH}^-$

Os íons M^{+2} gerados provocam a migração do íons Cl^- por dentro do pite (devido à mobilidade dos íons Cl^- ser superior à mobilidade dos íons OH^-) levando ao aumento da concentração de MCl_2 dentro do pite. O pH diminui dentro do pite - processo autocatalítico.



CORROSÃO POR PITE MECANISMO



1- Existe a quebra da passividade em termos de uma competição entre a adsorção de íons cloreto e de oxigênio em solução. No caso de exemplo, um certo metal M está sofrendo corrosão por pites em uma solução aerada de NaCl. Enquanto ocorrer a reação de redução do oxigênio, ocorrerá a dissolução do metal dentro do pite. Por si só esse mecanismo se auto-propaga.

Dentro do pite, ocorre a reação anódica: interior do pite:
 $\text{M} \rightarrow \text{M}^{+2} + 2\text{e}$

Essa dissolução do metal gera um excesso de carga positivas, e para manter a neutralidade elétrica do meio, íons cloreto migram para o pite.



CORROSÃO POR PITE FATORES QUE INFLUENCIAM

- O aumento da temperatura diminui a resistência a corrosão por pites.
- Ao contrário, o aumento do pH e a adição de elementos como Cr, Ni e Mo aumentam a resistência a este tipo de corrosão.

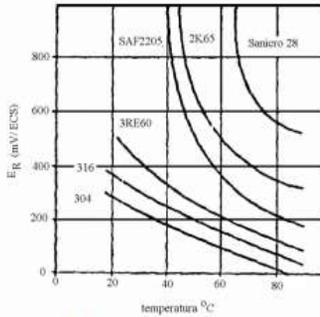


Figura 2.13.: Efeito da temperatura

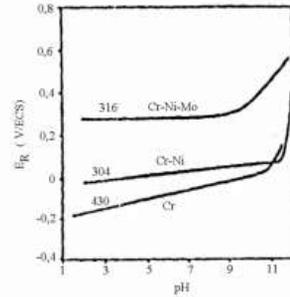


Figura 2.12.: Efeito do pH



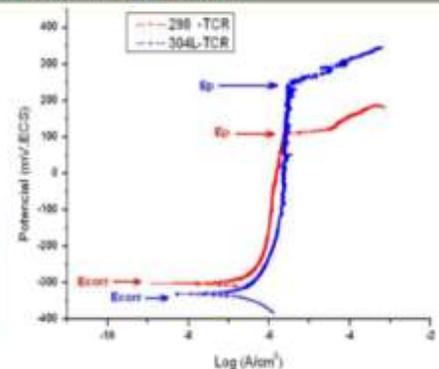
CORROSÃO POR PITE AVALIAÇÃO

- Exame visual
- Ensaio Acelerado – Câmara nevoa salina
- Ensaio eletroquímicos
 - Polarização cíclica
 - Potenciostático

Curvas de polarização potenciodinâmica para os aços inoxidáveis UNS S304L e 298 em eletrólito de 3,5% NaCl. Varredura a 1 mV/s.

Elemento	UNS S30403	298
C	0,0170	0,0290
Mn	0,0060	0,0020
Cr	18,530	17,170
Ni	8,038	4,648
N2 (ppm)		0,10
Ca	0,05	1,36

Observa-se que o aumento no teor de Cr e de Ni melhora a resistência à corrosão por pites do aço UNS S30403, aumentando o potencial



J.W. Calderon Hernandez, Efeito da temperatura de solubilização e da concentração de íons cloreto e sulfato sobre a resistência à corrosão por Pite dos aços inoxidáveis austeníticos 17Cr-6Mn-5Ni e UNS S30403. Dissertação, São Paulo, USP, 2012.



CORROSÃO POR PITE PREVENÇÃO

Por ser mais provável a formação de pites em soluções estagnadas, a agitação da solução inibe a formação de pites.

Também, mantendo-se o potencial do metal abaixo do potencial de formação dos pites, estes são inibidos.

A formação dos pites também pode ser detida pela proteção catódica e pelo uso de inibidores químicos que alteram as reações de eletrodo da célula de ação local e removem sua força motriz.

Revestimento da superfície metálica com uma camada de outro metal mais anódico (Zinco sobre aço)



CORROSÃO POR PITE REGRAS PRÁTICAS

- API 510

Uma área com pites será aceita se os itens a seguir forem atendidos:

- Nenhum pite pode ter profundidade maior do que a metade da espessura de projeto do vaso de pressão;
- Em um círculo de diâmetro igual a 200mm, a soma das áreas da superfície do vaso com pite não pode ser superior a 45cm²
- A soma das dimensões dos pites em uma linha reta aleatória traçada no interior de um círculo de 200mm não pode ser maior do que 50mm.

- ASME B31G

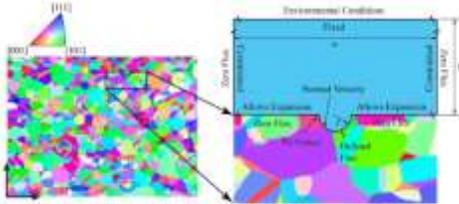
Recomendações:

- se o processo corrosivo já tiver cessado e a profundidade do defeito for inferior a 20% da espessura nominal da parede do tubo, não há obrigatoriedade de reparo do defeito;
- todos os defeitos com profundidade de 80% da espessura nominal devem ser reparados, mesmo que o processo corrosivo tenha sido eliminado.



PARA SABER MAIS...

- <https://br.comsol.com/video/modeling-pitting-corrosion-microstructural-scale>



Incorporating metal microstructure in a pitting corrosion model

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9781845692155500073?token=525DC513A2324BFC1A60AAEF8108894B8269320FD3A6D1231BC627CFC3865FB2E6BFA352249A159F8ED17D799F95267A>

II.4

Prediction of loss of corrosion resistance in
austenitic stainless steels

MATS HILLERT and CAIAN QIU