


 Ministério da Educação
 Universidade Federal do Paraná
 Setor de Tecnologia
 Departamento de Construção Civil

**Materiais de Construção
 (TC-030)
 ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA**

Professores
 José de Almendra Freitas Jr. - freitasjose@terra.com.br
 Laila Valduga Artigas - artigas@ufpr.br

Versão 2019


 ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Introdução:

Materiais metálicos = metais e ligas metálicas:
 Substância inorgânica com um ou mais elementos metálicos (e não metálicos)


Elementos metálicos: Ferro, cobre, alumínio, níquel, titânio...

Não metálicos em ligas: Carbono, o nitrogênio e o oxigênio.



Ponte sobre a gruta do São João, Estrada de Ferro Curitiba-Paranaguá, (1885)

Aço = 99,7% Fe + 0,3% C


 ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Introdução:


Minérios de metais - em geral formas oxidadas do metal.

Qtde significativa de **energia** p/ reduzir minério ao metal puro.

Fundição e conformação posterior do metal envolvem processos onde mais energia é gasta.


Corrosão - tendência do metal reverter ao seu estado original, o de mais baixa energia.

A tendência de decréscimo energético é a principal encorajadora à corrosão metálica.



 ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Introdução:

CICLO DO FERRO



Transformação Minério → Metal absorve energia
 Corrosão → libera energia


 ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Introdução:

Corrosão - problemas para:

- Indústrias - química, petroquímica, etc.
- Meios de transporte - aviões, automóveis, navios, etc.
 - Medicina – implantes
 - Monumentos
 - Construção civil

Gera perdas econômicas imensas.

É importante compreender os fenômenos que envolvem a corrosão para que se possa melhor combatê-la.

Custos do combate à corrosão - 1,8 % do PIB


 ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA
 Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Conceito de Corrosão:

Deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica, pode ou não associada a esforços mecânicos.

Corrosão dos materiais metálicos = corrosão metálica.



José de A. Freitas, Jr.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Conceitos:

Nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não metálicos: O₂, S, H₂S, CO₂

Produz compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos.

(G. S. Pimenta, 2006)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Conceito de Corrosão:

Processos corrosivos classificados em dois grupos:

- **Corrosão Química**
- **Corrosão Eletroquímica**

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão química:
(corrosão ou oxidação em altas temperaturas)

Processo menos freqüente na natureza
Sob temperaturas são elevadas.

Caracteriza por:

- Ausência da água líquida;
- Temperaturas acima do ponto de orvalho da água;
- Interação direta entre o metal e o meio corrosivo.

Corrosão química não se necessita de água líquida.

Corrosão química = Corrosão seca.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão química:

Interação direta entre o metal e o meio corrosivo.
Conhecidos por corrosão ou oxidação em altas temperaturas.
Ocorre em equipamentos que trabalham aquecidos:
fornos, caldeiras, unidades de processo, etc.

O aquecimento do aço carbono a temperaturas entre 575°C e 1370°C forma uma camada de óxidos denominada carepa de laminação.

Caldeira industrial

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão química:

Os casos mais comuns são a reação com o oxigênio (OXIDAÇÃO SECA), a dissolução e a formação de compostos.

OXIDAÇÃO DO FERRO AO AR SECO

$$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO} \quad T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \quad T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$2\text{Fe} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

(hematita)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão eletroquímica:
(mais freqüente na natureza)

Caracterizada por:

- Necessidade da presença de água no estado líquido;
- Forma uma pilha ou célula de corrosão, com a circulação de elétrons na superfície metálica.

Como o eletrólito contém água líquida, a corrosão eletroquímica é denominada:

Corrosão eletroquímica = Corrosão em meio aquoso

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Elementos fundamentais:

- **Área anódica:** (metal que perde ou cede elétrons)
Superfície onde ocorre a corrosão (oxidação);
- **Área catódica:** (metal que recebe os elétrons)
Superfície protegida onde não há corrosão (reações de redução);

• **Eletrólito:**
Solução condutora – envolve as áreas anódica e catódica. (Em geral solução de água c/ ácidos ou bases);

• **Ligação elétrica** entre as áreas anódica e a catódica.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Existindo os elementos fundamentais, a corrosão ocorre quando há a diferença de potencial (ddp)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Causas para a diferença de potencial:

- **Metais diferentes** → Corrosão galvânica

Ânodo (corrosão) Elétrons e^- Cátodo

(pilha galvânica)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Metais diferentes: (pilha galvânica)
Dois metais ou ligas diferentes em contato elétrico na presença de eletrólito.

SÉRIE GALVÂNICA PRÁTICA

METAL	VOLTS (*)
Magnésio comercial puro	-1,75
Liga de Magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio comercial puro	-0,80
Aço acalmado (limpo e brilhante)	-0,5 a -0,8
Aço acalmado (enferrujado)	-0,4 a -0,55
Aço fundido (não grafitado)	-0,50
Chumbo	-0,50
Aço acalmado em concreto	-0,20
Cobre, Latão e Bronze	-0,20

O metal com menor potencial torna-se o ânodo, isto é, perde elétrons para o metal de maior potencial.

(*) Potenciais em solos neutros e água

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Metais diferentes: (Corrosão galvânica)

Aço inox

Aço carbono

Aço inoxidável = liga de Ferro e Cromo (mín.11%), podendo conter também Níquel, Molibdênio e outros.

Incompatibilidade do aço inox do corrimãocom o aço carbono do apoio.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Metais diferentes: (Corrosão galvânica)

Tubulação em aço galvanizado unida com tubulação de cobre.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Metais diferentes: (Corrosão galvânica)



Aço
 liga metálica formada por ferro e carbono (%C 0,008 a 2,11%)

Gradil unido por solda às armaduras de aços diferentes. Aço carbono comum com aços para concreto armado.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Metais diferentes: (Corrosão galvânica)


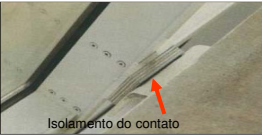


Brise unido por solda às armaduras (aços diferentes)



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Metais diferentes: (Corrosão galvânica)

Telhas galvanizadas ou de alumínio em contato com a estrutura de ferro.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Metais diferentes: (Corrosão galvânica)



Detalhe de fixação de tubo de cobre com alça de aço galvanizado com afastador de PVC p/ evitar a corrosão galvânica.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Metais diferentes: (Corrosão galvânica seletiva)

Formação de um par galvânico devido à grande diferença de nobreza entre dois elementos de uma liga metálica.
 Tipos : grafítica e deszincificação.

Deszincificação da parte interna de uma válvula de latão

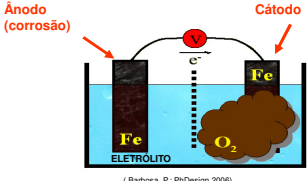


Latão = liga metálica de cobre + 3 a 45% de zinco

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:
 • **Em metais iguais**

Aeração diferencial
 Concentrações diferentes de oxigênio causa diferença de potencial.



(Barbosa, P.; PhDesign, 2006)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais** **Aeração diferencial**
 Concentrações diferentes de oxigênio. Eletrólito no interior de uma fresta, concentra menos oxigênio (área anódica) que na parte externa (área catódica). O desgaste se processará **no interior** da fresta.

(Panorini, F. D.)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais** **Concentração salina diferencial**
 Concentrações diferentes de íons salinos levam a diferenças de potencial.

(J.Freitas Jr.)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais** **Concentração salina diferencial**
 Concentração de íons salinos na parte submersa da peça de aço levam a formação do ânodo na área ligeiramente acima do nível da água.

(Rodrigues, 2000)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais** **Concentração salina diferencial**

Ex.: Concreto armado úmido, contaminado por cloretos.

RODRIGUES, 2000

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais** **Concentração iônica diferencial**
 Quando um metal é exposto a concentrações diferentes de seus próprios íons.

(J.Freitas Jr.)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais** **Concentração iônica diferencial**
 Freqüente em frestas quando o meio corrosivo é líquido. O interior da fresta concentra íons de metal (área catódica), a parte externa fica menos concentrada (área anódica), **Corroí as bordas da fresta.**

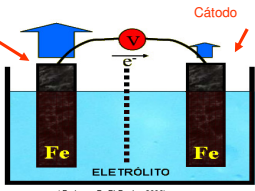
(Panorini, F. D.)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial
 Correntes externas ou situações diversas que levam a deformações reticuladas cristalinas do metal, causam diferença de potencial.



(Barbosa, P., PhDesign, 2006)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial

Diversas situações podem criar diferenças nos níveis de energia interna no reticulado cristalino dos metais:

- Estados diferentes de **tensões**
- Estados diferentes de **deformações**
 - Acabamento superficial
 - Tratamentos térmicos diferentes
 - Gradiente de **temperatura**

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I


Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial

Estados diferentes de tensões

Extremidades das vigas sob maior tensão levaram a corrosões localizadas.



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial

Peça com diferentes deformações

Região curvada do tubo tem seu reticulado cristalino deformado. Esta área torna-se o ânodo.



(Gentil, 1996)

Corrosão em aço inoxidável deformado (reticulado cristalino sob tensão)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I


Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial

Peça com diferentes deformações

Região curvada de um vergalhão para concreto armado apresentando início de corrosão na região curvada.



(Freitas Jr., J.)

(reticulado cristalino sob tensão)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I


Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial

Acabamentos superficiais diferentes

Corte na extremidade da telha cria uma área da chapa sem tratamento superficial



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:
Causas para a diferença de potencial:

- **Em metais iguais**

Energia diferencial

Acabamentos superficiais diferentes

Tubulação parcialmente pintada sofrendo corrosão.



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Pilha de Corrosão Eletroquímica:

Há condições para o desenvolvimento do processo corrosivo

↓

Não há corrosão

↓

Há passivação

(Paulo Barone - FIBR/UNICAMP)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Passivação:

Termo que significa que o metal está **passivo** ao processo de corrosão.

Decorrente da formação de uma película fina de óxido estável e aderente na superfície do metal.

Alguns metais são formadores desta película protetora, como: cromo, alumínio, aço inoxidáveis, aço patináveis, titânio....

Em geral metais onde não há crescimento significativo de volume com a oxidação.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Passivação:

Uma fina camada de óxido que atua como barreira contra a continuação da corrosão. (aços *corten*)

Exemplos:

- Aço inoxidável;
- Aço patinável;
- Ligas de alumínio.

Óxido do metal
metal




Barreira de óxido recristalizado em aço patinável

Estação do metro Santo Amaro SP

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

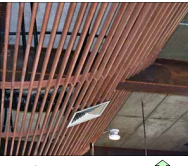


Passivação:

Aço Patinável – adição de 0,2 a 0,5% de Cobre

Tipo de aço	Teor (% em peso)							
	C	S	Al	Cu	Mn	P	Si	Cr
Carbono	0,037	0,009	0,062	<0,005	0,27	0,020	0,011	<0,005
Patinável	0,056	0,007	0,017	0,26	0,59	0,023	0,23	0,52

Fachadas em aço patinável

Aços *corten*

Edifício Kaze (São Paulo-SP)

Aços *corten*

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Passivação:

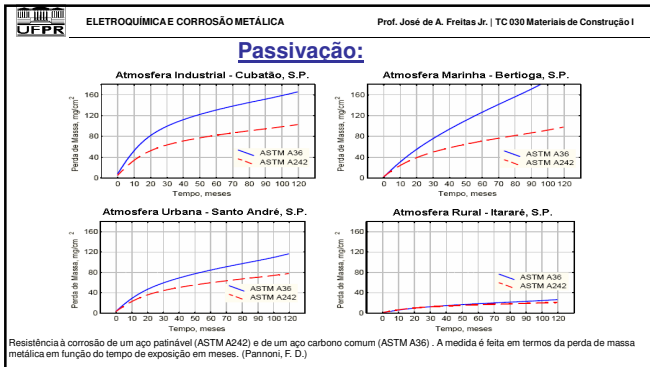
Aço Patinável – adição de 0,2 a 0,5% de Cobre

Ponte Pedro Ivo Campos – Florianópolis SC




Ponte Pedro Ivo Campos

Ponte Colombo Salles

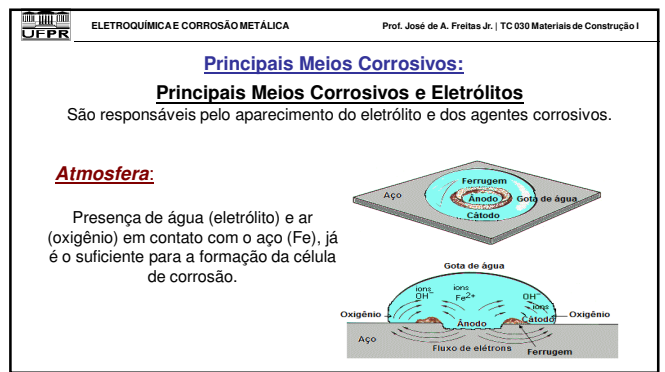
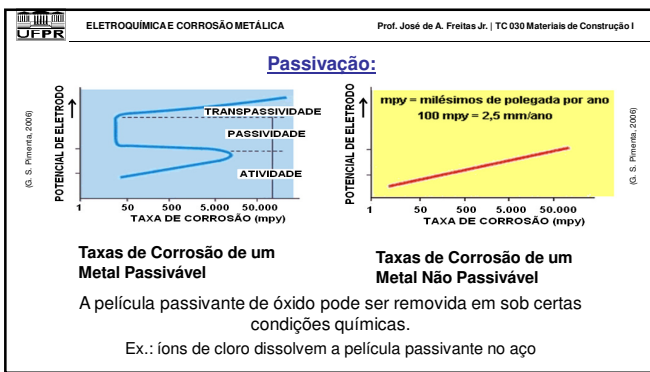


ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Passivação:

Elementos de liga num aço de Alta Resistência e Baixa liga (ARBL, BLAR ou HSLA)		
Elemento	Percentagem (%)	Efeito nas propriedades
Cobre	0,2 – 1,5	Melhora a resistência à corrosão atmosférica
Níquel	Ao menos a metade do % de cobre	Beneficia a qualidade superficial
Nióbio	0,02	Aumenta o limite de resistência e o limite de escoamento.
Nitrogênio	0,003 – 0,012	Contribui para a resistência e pode melhorar a soldabilidade.
Vanádio	Até 0,12	Melhora a resistência sem reduzir a soldabilidade

OBS: Pequenas quantidades de cálcio, terras raras e zircônio podem estar presentes para controle da forma de inclusões de sulfetos (globulização)



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Meios Corrosivos:

Água do mar:

Contém quantidade apreciável de sais. (Cloretos, sulfatos, bicarbonatos...)
 Água do mar: Eletrólito por excelência.



Corrosão em pilar instalado no mar.

(Gentil, 1996)


ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Meios Corrosivos:

Produtos químicos:

Produtos químicos em contato com água ou com umidade, formam um eletrólito, podendo provocar corrosão eletroquímica.

Corrosão em chaminé exposta a uma atmosfera industrial



Um determinado meio pode ser extremamente agressivo, sob o ponto de vista da corrosão, para um determinado material e inofensivo para outro.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Velocidade de corrosão:

Taxa de corrosão: Massa desgastada / Área x Tempo.

Intensidade da corrente de corrosão depende de:

- Diferença de potencial entre áreas anódicas e catódicas;
- Resistência de contato das áreas anódicas e catódicas.

A diferença de potencial **ddp** pode ser influenciada por:

- Resistividade do eletrólito;
- Superfície de contato das áreas anódicas e catódicas;
- Fenômenos de polarização e passivação.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

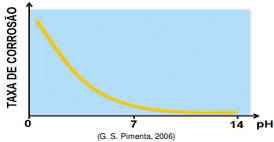
Velocidade de corrosão:

OUTROS FATORES:

Atuam nos fenômenos de polarização e passivação.

Aeração do meio corrosivo: velocidade de corrosão aumenta com o acréscimo da taxa de oxigênio dissolvido.

pH de eletrólito: taxas de corrosão aumentam com a diminuição do pH.



(G. S. Pimenta, 2006)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

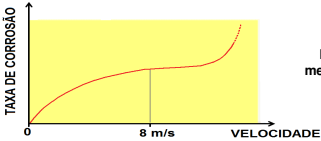
Velocidade de corrosão:

OUTROS FATORES:

Atuam nos fenômenos de polarização e passivação.

Temperatura: aumento acelera as reações químicas.

Efeito da velocidade: velocidade de fluxo do eletrólito. Atua sobre a polarização e sob movimento turbulento tem-se a ação erosiva..



Efeito da velocidade relativa do metal / eletrólito na corrosão do aço em água do mar

(G. S. Pimenta, 2006)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

```

    graph TD
      A[CORROSÃO] --> B[UNIFORME]
      A --> C[LOCALIZADA]
      C --> D[MACROSCÓPICA]
      C --> E[MICROSCÓPICA]
      D --- D_list["Galvânica<br/>Frestas<br/>Pites<br/>Dissolução seletiva<br/>Microbiológica"]
      E --- E_list["Intergranular<br/>Corrosão sob tensão"]
    
```

(F. D. Pannoni)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

Meio
Metal

Sem corrosão Uniforme Galvânica Frestas

Metal mais nobre Metal ou não-metal

Formas comuns de corrosão em aços estruturais

(F. D. Pannoni)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

A perda de massa e modo de ataque sobre o material dá-se de formas diferentes.

Corrosão uniforme:
Aproximadamente uniforme em toda a superfície atacada. Comum em metais que não formam películas protetoras.

CHAPA SEM CORROSÃO CORROSÃO UNIFORME

www.pontalgalvanizacao.com.br

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

Corrosão uniforme:

1 2 3

Cátodos e ânodos são distribuídos aleatoriamente por toda a superfície metálica e conectados eletricamente pelo substrato de aço. Ions ferrosos e hidroxilas são formadas através de reações eletroquímicas, e se difundem superficialmente.

Conforme as áreas anódicas corroem, um novo material, de diferente composição (a ferrugem) vai sendo exposta. Este novo material causa alterações dos potenciais elétricos entre as áreas anódicas e catódicas, causando sua mudança de local.

Com o tempo, as áreas catódicas de tornam anódicas, e toda a superfície acaba se corroendo de modo uniforme.

(F. D. Pannoni)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

Corrosão uniforme

Corrosão atmosférica

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

Corrosão uniforme

ABRACO ABRACO

Corrosão atmosférica

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

Corrosão uniforme **Corrosão atmosférica**

Estátua da Liberdade, estrutura de ferro maleável revestida com chapas de cobre. (NY-USA, 1886)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

Corrosão uniforme



ABRADO

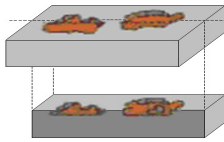

Corrosão uniforme em tubo enterrado

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•Corrosão por placas:

Produtos de corrosão formam placas que se desprendem progressivamente. Metais c/ produtos da corrosão expansivos.

Pilar cujo concreto foi exposto ao cloro da água marinha

(José Freitas Jr.)

www.portataghyntacao.com.br

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•Corrosão por placas:

Comum em metais que formam película inicialmente protetora que, ao se tornar espessa, fratura e perde aderência, expondo o metal a novo ataque.




FOSROC

(Mazoir H. Houe)

Armaduras de concreto armado

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•Corrosão em frestas:

Interior da fresta acumula eletrólito (água), tem menos oxigênio (área anódica) que na parte externa (área catódica).



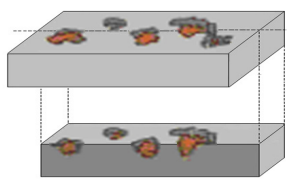
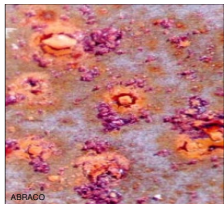
Corrosão no interior da fresta.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•Corrosão alveolar:

Desgaste localizado, com o aspecto de crateras.

ABRADO

www.portataghyntacao.com.br

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•Corrosão alveolar:

Desgaste localizado em regiões onde a película protetora (pintura, cromagem, pátina, ...) encontra-se com falhas





ABRADO

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•**Corrosão alveolar:**
Corrosão induzida por agentes microbiológicos (MIC) em tanque de aço para armazenamento de petróleo após 4 anos. Bactérias redutoras de sulfatos produzem ambiente ácido.



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•**Corrosão por pite:**
Desgaste se dá de forma muito localizada e de alta intensidade, geralmente com profundidade maior que o diâmetro e bordos angulosos. Comum em aços inoxidáveis.



(Tebcherani, C. T.)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•**Corrosão por pite:**



ABRACAO

Corrosão por pite em aço inox

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•**Corrosão por pite:**



(Paulo Barbosa, PhDesign)

Corrosão por pite em vergalhão de concreto armado, causado pela contaminação do concreto por cloro.

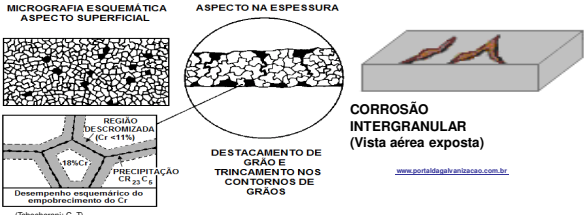
ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•**Corrosão intergranular ou intercrystalina:**
Ataque no contorno dos grãos. Comum em aços inoxidáveis.

MICROGRAFIA ESQUEMÁTICA ASPECTO SUPERFICIAL

ASPECTO NA ESPESURA



CORROSÃO INTERGRANULAR (Vista aérea exposta)

(Tebcherani, C. T.)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

•**Corrosão intergranular ou intercrystalina:**



Corrosão intergranular (sensitização) em bloco fundido de aço inox

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

• **Corrosão intergranular ou intercrystalina:**



Fissura devido a corrosão intergranular por *stress* em um tubo trocador de calor de liga INCONEL (liga de Ni-Cr para altas temperaturas). Mag: 500X

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

• **Corrosão intergranular ou intercrystalina:**



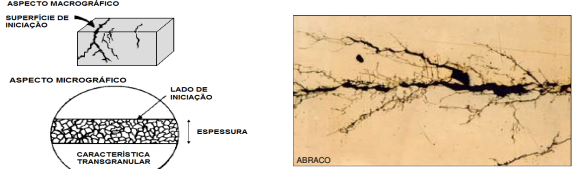
Corrosão intergranular, de dentro para fora, em folhas de alumínio de isolamento térmico

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

• **Corrosão transgranular ou transcristalina (sob-tensão):**

Forma trincas que se propagam pelo interior dos grãos do material, como no caso da corrosão sob tensão de aços inoxidáveis.



Corrosão sob-tensão em aço inoxidável

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

• **Corrosão transgranular ou transcristalina**

• **Corrosão sob tensão**



Corrosão sob tensão em aço inoxidável



Cordoalhas de concreto protendido

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Formas físicas que a corrosão se apresenta:

• **Corrosão transgranular ou transcristalina**

• **Corrosão sob tensão**



ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

CORROSÃO ASSOCIADA AO FLUXO DE MATERIAIS

CORROSÃO-EROSÃO

Erosão é o desgaste mecânico provocado pela abrasão superficial de uma substância sólida, líquida ou gasosa.

- Fluxo de material sólido
- Fluxo de líquido contendo partículas sólidas
- Fluxo de gás contendo partículas líquidas ou sólidas

Remove as películas protetoras constituídas de produtos de corrosão.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

CORROSÃO ASSOCIADA AO FLUXO DE MATERIAIS

CORROSÃO-EROSÃO

(a) (b) (c) (d)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

CORROSÃO ASSOCIADA AO FLUXO DE MATERIAIS

CORROSÃO-EROSÃO

Erosão em rotor de bombas

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

CORROSÃO ASSOCIADA AO FLUXO DE MATERIAIS

CAVITAÇÃO

"Implosão" de minúsculas bolhas, formadas por redução da pressão local de vapor, fluxos sob alta velocidade.

O fluxo de água e pequenas irregularidades das superfícies formam micro-bolhas de vapor instáveis, que na sequência implodem em campos de pressão mais elevada, causando micro-jatos e erosão.

Modelo de colapso da bolha e cavitação (Turton, 1995 [Lush, 1987])

Bolha de cavitação (1) implodindo próximo a uma superfície sólida, projetando um jato (4) de líquido contra a superfície.

Cavitação em bomba centrífuga (Gen1996)H.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

CORROSÃO ASSOCIADA AO FLUXO DE MATERIAIS

CAVITAÇÃO

Desgaste devido a ondas de choque do líquido, oriundas do colapso de bolhas gasosas.

Rotor Pelton

Cavitação em rotor de turbina para hidroeletricidade tipo Pelton

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto

A corrosão de armaduras pode ser classificada em:

- Corrosão generalizada;
- Corrosão por pite (ou puntiforme);
- Corrosão sob tensão fraturante:
 - Ocorre eminentemente em estruturas protendidas;
 - Podem ocorrer em estruturas de concreto armado;
- Sua ocorrência é grande em ambientes ricos em cloretos e com níveis elevados de tensão.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Concreto novo é um meio bastante alcalino ($\text{pH} \cong 12,5$)
As armaduras estão passivas à corrosão.

Com o tempo pode ocorrer a perda de passivação das armaduras por:

- Carbonatação do concreto
- Presença de íons cloreto

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Carbonatação

Nas superfícies expostas a alta alcalinidade devido ao Ca(OH)_2 liberado na hidratação pode ser reduzido pela ação do CO_2 do ar e outros como SO_2 e H_2S .

Este processo é chamado carbonatação e geralmente é condição essencial para o início da corrosão das armaduras.

Felizmente, o processo de carbonatação é lento, atenuando-se com o tempo devido aos produtos de hidratação e pelos próprios produtos da carbonatação (CaCO_3), que colmatam os poros superficiais, dificultando a entrada de CO_2 do ar.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Em concretos novos, ambiente alcalino $\text{pH} \approx 12,5$; sem a presença de cloreto o aço está PASSIVO ao fenômeno.

CARBONATAÇÃO – reduz o pH e despassa o aço.

Carbonatação:
 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

(J.S. Coutinho, FEUP)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Diagrama de Pourbaix Fe-água (sem cloreto)

Limite de pH p/ haver corrosão

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Carbonatação do concreto

Arquivo: Filmes concreto / Filme / c109 Carbonatado

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Seqüência da corrosão das armaduras

Arquivo: Filmes concreto / Filme / v9_Corrosão_espécula

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Cloretos promovem a desp passivação precoce do aço, mesmo em ambientes alcalinos.
 Teor crítico 0,3% m.c. (CYTED, 1997)

Origem dos cloretos:

- Difusão de íons a partir do exterior (atmosfera marinha)
 - Aditivos aceleradores de pega (CaCl_2)
 - Areia ou água contaminada por sal (NaCl)
- Tratamentos de limpeza com ácido muriático (HCl)
 - Sal (NaCl) como agente anticongelante

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Diagrama de Pourbaix Fe-água com Cl

Diagrama de Pourbaix Fe-água com Cl

Corrosão acontece sob qualquer pH

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Areia marinha contaminada com cloro

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Barra de aço revestida com tinta epóxi corroída devido a penetração de cloro no concreto. Qualquer dano na pintura, ocorrido durante o processo da montagem permite o contato do cloro com o aço.

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Ataque por cloretos

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Ataque por cloretos

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Ação dos Cloretos (Cl⁻):

Os íons cloretos eram introduzidos intencionalmente nas estruturas de concreto como agente acelerador de pega e endurecedor. Aparecem também através de agregado ou água contaminados. Em climas frios, podem vir através dos sais anticongelantes. Também através de salmouras industriais e mareasias.

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS
Ação dos Cloretos (Cl⁻):

Mecanismos de transporte dos íons dos cloretos (Cl⁻):

- Permeabilidade sob pressão;
- Absorção capilar;
- Difusão iônica;
- Migração iônica.

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS
Ação dos Cloretos (Cl⁻):

Mecanismos de transporte dos íons dos cloretos (Cl⁻):

Permeabilidade
A permeabilidade é um dos principais parâmetros de qualidade de um concreto e representa a facilidade

Absorção capilar
A absorção capilar é a primeira porta de entrada dos íons cloreto, provenientes, por exemplo, de névoa marítima.
Depende da porosidade, viscosidade e tensão superficial do líquido.

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS
Ação dos Cloretos (Cl⁻):

Mecanismos de transporte dos íons dos cloretos (Cl⁻):

Difusão iônica
A absorção capilar ocorre na superfície do concreto, sendo que a difusão iônica é o principal mecanismo de transporte no interior da estrutura, em meio aquoso.

Migração iônica
Os íons cloretos por serem cargas negativas, promovem migração iônica, o qual pode se dar pelo próprio campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico, como por ação de campos elétricos externos.

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras em concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS



O ânodo formado atrai íons de cloro, de carga negativa, continuamente para o mesmo ponto causando uma corrosão localizada e profunda (pite).

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras em concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS



Corrosão por pites (alta concentração de cloro)

(Paulo Barbosa, PhDesign, 2002)

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras em concreto armado
DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Corrosão por pites (alta concentração de cloro)



Detalhe da seção corroída

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras em concreto armado

DESPASSIVAÇÃO PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Corrosão por pites:
Barra corroida de um pavimento de concreto armado exposto ao uso de sal como anti-congelante.



www.efcweb.org

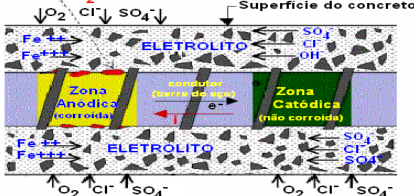
ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

FORMAÇÃO DA PILHA DE CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO

Cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2(OH)^-$
(ar) (água)

Ânodo: $Fe \rightarrow 2 e^- + Fe^+$
(aço metálico)
 $FeO \cdot (H_2O)_x$
(ferrugem)



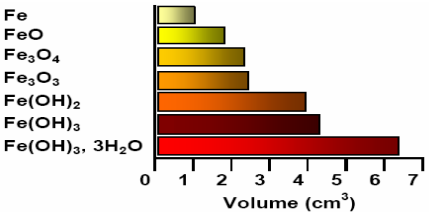
(Adaptação de P.Helene, 1986)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Corrosão do aço carbono – REAÇÃO EXPANSIVA

Ferro, produtos da corrosão e seus volumes relativos:



© Casado, 1977

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão pelo ataque químico



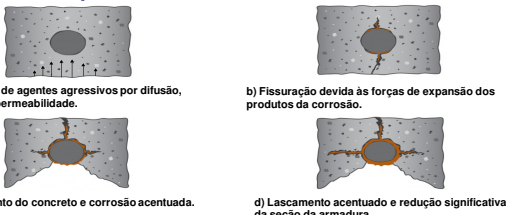
Arquivo: Filmes conceitos / Filmes / 07 - Ataque químico

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Corrosão do aço carbono – REAÇÃO EXPANSIVA

Progressão da deterioração da estrutura devido à corrosão das armaduras



a) Penetração de agentes agressivos por difusão, absorção ou permeabilidade.

b) Fissuração devida às forças de expansão dos produtos da corrosão.

c) Lascamento do concreto e corrosão acentuada.

d) Lascamento acentuado e redução significativa da seção da armadura.

(adapt. de Helene, P. R. L.: 1986)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Lascamento pela expansão



Arquivo: Filmes conceitos / Filmes / 08 - Corrosão - Lascamento

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Corrosão do aço carbono – REAÇÃO EXPANSIVA



LATERAL DAS VIGAS (Moacir H. Inoue)

Viga em ponte rodoviária/ferroviária, BR 101, Laguna-SC

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cuidados Necessários:

- Cobrimento
 - Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço
- Concreto menos permeável
 - Menor relação a/c e maior fck
- Tipo de cimento;
- Cuidados com formas arquitetônicas e drenagem
- Proteção superficial do concreto - revestimentos
- Armaduras especialmente passivas:
 - Aços revestidos (epóxi, galvanização)
 - Aços inoxidáveis
 - Armaduras de fibras (carbono, vidro, kevlar)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cuidados Necessários:

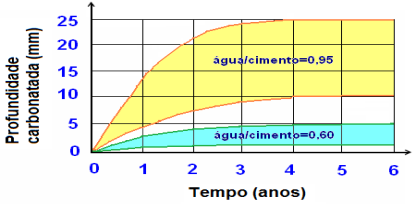
- Cuidados no uso de aditivos que contenham em sua fórmula o cloreto de cálcio;
 - Cobrimento das armaduras adequado a agressividade do meio;
- Cuidados especiais se o concreto estiver sujeito à correntes elétricas;
- Utilizar dosagem adequada, com o mínimo de água para a hidratação.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cobrimento - Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço

Profundidade de carbonatação com o tempo e a relação a/c



(P. Helmh, 1986 de Soretz, 1957)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cobrimento - Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço

NBR 6118 (2007)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 1)			
		I	II	III	IV ²⁾
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

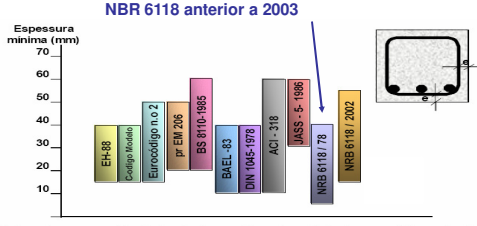
1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob-tensão.
2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento liso como piso de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos antiderrapantes, e outros tanto, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelo item 7.4.7.5 respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
3) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reatrabalho, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, caletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intersetivamente agressivos a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:

Cobrimento - Maior tempo p/ camada carbonatada chegar ao aço

NBR 6118 anterior a 2003



Valores de espessura de cobrimento de armaduras das principais normas internacionais ANDRADE, 1992, modificado.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:
DETALHES CONSTRUTIVOS

União do gradil às armaduras provocou corrosão galvânica nestas.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Prevenção da corrosão das armaduras de CA:
DETALHES CONSTRUTIVOS

Infiltrações nas juntas e apoios de neoprene

Superfícies horizontais acumulam água

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
Avaliação: POTENCIAL DE CORROSÃO

O potencial eletroquímico de corrosão das armaduras imersas no concreto indica a **situação de corrosão ou passividade destas**.
 Fornece **informações qualitativas** que devem ser utilizadas como complemento de outros ensaios.

Medição do potencial de corrosão de um concreto.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
Avaliação: PROFUNDIDADE DA CARBONATAÇÃO

Fenolftaleína reage com o hidróxido de cálcio e fica na cor "vinho" indicando pH > 9,5.

Frente carbonatada

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
Avaliação: POTENCIAL DE CORROSÃO

A medida é a determinação da **ddp elétrico entre as armaduras e um eletrodo de referência** que se coloca em contato com a superfície do concreto.

Não dá informações sobre o quanto corroeu ou está corroendo, fornece somente a **probabilidade do processo** estar ocorrendo ou não.

RISCO DE CORROSÃO: BAIXO (< 5%) ELEVADO (> 95%)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado
Avaliação: POTENCIAL DE CORROSÃO

O potencial de corrosão é **função de** um grande número de variáveis: % **umidade** e **oxigênio** no concreto, **Cobrimento, Fissuras e Correntes erráticas**.

Sensor A and B

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Avaliação: POTENCIAL DE CORROSÃO

Corrosão das armaduras de concreto armado

As medidas podem ser tomadas isoladamente ou em forma sistemática c/ objetivo de obter "mapa de potenciais" da estrutura.

Mapa permite identificar zonas possivelmente corroídas de zonas não corroídas ou passivadas.

POTENCIAL DE CORROSÃO RELATIVO AO ELETRODO DE REFERÊNCIA DE COBRE SULFATO DE COBRE-ESC (mV)	PROBABILIDADE DE CORROSÃO (%)
Mais negativo que -350	95%
Mais positivo que -200	5%
De -200 a -350	Incerta

Potential Map

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Avaliação: RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica do concreto (condutividade iônica do eletrólito) é um parâmetro que em conjunto com a disponibilidade de oxigênio, controla a velocidade de corrosão do aço.

A resistividade depende fundamentalmente da umidade contida nos poros do concreto.

Existem dois métodos:

- Método dos "Quatro Eletrodos" ou método de Wenner
- Método da ABNT que emprega três eletrodos

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Avaliação: RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Corrosão das armaduras de concreto armado

Uma corrente elétrica é aplicada entre os eletrodos externos. A diferença de potencial gerada entre os eletrodos internos propicia a medida da resistividade.

CRITÉRIOS CEB 192

RESISTIVIDADE DO CONCRETO	INDICAÇÃO DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO
> 20 kohm.cm	Desprezível
10 a 20 kohm.cm	Baixa
5 a 10 kohm.cm	Alta
< 5 kohm.cm	Muito alta

$\rho = 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot a$

(Helene, P.; 1986)

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Avaliação: RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Medidas sistemáticas permitem montar o "mapa de resistividade".

Este mapa indica as probabilidades de corrosão nos diversos locais da peça estrutural.

Resistivity Map

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Avaliação: RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

Rp (Rp) representa a inércia do sistema em desenvolver processo eletroquímico de corrosão.

Aço passivado apresenta Rp muito maior que aço sofrendo corrosão.

A técnica é a aplicação de um pequeno sinal à armadura em análise e, que exerce uma pequena polarização no aço, em torno do potencial livre que ele se encontra.

Caso esteja ocorrendo a corrosão, seu potencial livre é o próprio potencial de corrosão.

ELETROQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto armado

Avaliação: RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

P/ obtenção da Rp emprega-se um **potenciostato**.


Interliga-se eletrodo de referência às armaduras e um contra-eletrodo. Fecha o circuito permitindo a circulação de corrente.

Corrosion Risk Map

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I


Corrosão das armaduras de concreto armado

Avaliação:
RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO



Sensor A and B

GRAU DE CORROSÃO	TAXA DE CORROSÃO	
	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{ano}$
Desprezível	0,1 a 0,2	1,1 a 2,2
Início de corrosão ativa	>0,2	> 2,2
Ataque importante mas não severo	~1,0	~11,0
Ataque muito importante	> 10,0	> 110,0



GECOR8

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Corrosão sob-tensão

"Processo destrutivo de um metal ou liga metálica resultante da ação simultânea de um meio agressivo, (específico para cada metal), e de tensões de tração estáticas residuais ou aplicadas sobre o metal ou liga". (Wolyneec, 1979)

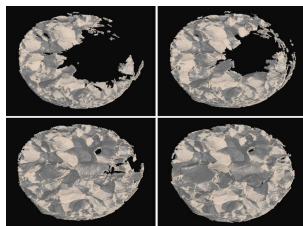


ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Corrosão sob-tensão

Características:
Nem todos os metais ou ligas são suscetíveis (Ex. aço carbono não submetido ao processo de refilação).
Manifesta-se na forma transgranular ou transcristalina.
A fratura não apresenta estriçãoção (fragilidade alta).



4 etapas da propagação de uma fissura devido a corrosão por stress

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Corrosão sob-tensão

Características:
Produtos formados durante o processo corrosivo normalmente são invisíveis. É possível ter peças trincadas ou rompidas por corrosão sob-tensão sem que a superfície denote evidência de processo corrosivo generalizado.






ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Corrosão sob-tensão

Características:
A corrosão sob-tensão somente ocorre quando a tensão de serviço do metal e a concentração do agente agressivo ultrapassam certos valores críticos (somente ocorre em condições altamente específicas).


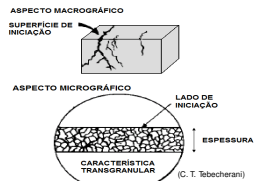



ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Corrosão sob-tensão

Se manifesta em fios e cordoalhas de concreto protendido. Ocorre a formação de trincas no interior dos grãos que rapidamente reduzem a seção da peça de aço.

Cordoalhas Ponte Rio-Niteroi
Corrosão encontrada por RIMT

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I


Corrosão das armaduras de concreto protendido

•CASO: Corrosão transgranular ou transcristalina
Corrosão sob-tensão

Elevado Av. Paulo de Frontin

11/1971, Rio de Janeiro, 122 m do Elevado Paulo de Frontin, em construção, desabaram. Tragédia causou a morte de 28 e deixou 30 feridas, destruindo 17 carros, três táxis, um caminhão e um ônibus.

Desmoronamento aconteceu na hora em que um caminhão, carregado de concreto, passava sobre o trecho.



ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

•CASO: Corrosão transgranular ou transcristalina
Corrosão sob-tensão

Elevado Av. Paulo de Frontin

Conclusões preliminares: Corrosão das cordoalhas de protensão, janela de inspeção mantida aberta.




ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

•CASO: Corrosão transgranular ou transcristalina
Corrosão sob-tensão

Ponte dos Remédios

Em 3/6/97, São Paulo, 29 anos de idade, 26 cabos de protensão rompidos

Tecnologia do CP da época é uma das causas da baixa durabilidade. Aço não era aliviado de tensões, sujeito relaxamento muito maior que o previsto. Bainhas não garantiam a vedação na concretagem, criavam atritos que reduziam sensivelmente a eficiência da protensão. Injeções de nata de cimento, c/ bombas manuais, não garantiam nem a aderência da armadura, nem a proteção contra stress corrosion.





ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Avaliação: AUSCULTAÇÃO DE CABOS PROTENDIDOS

Vistoria quanto aos indícios de corrosão em cabos de C.P.

O total preenchimento das bainhas p/ calda deve ser averiguado.

Detectar corrosão em armaduras de C.A. é simples - aumento do volume do aço, e a expansão da superfície de recobrimento.

É fundamental confirmar o envolvimento pela calda de cimento dos cabos assim como o preenchimento pleno das bainhas.

R.I.M.T. - "Reflectometric Impulse Measurement Technique" verifica o grau de corrosão das armaduras e os vazios das bainhas.

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Corrosão das armaduras de concreto protendido

Avaliação: AUSCULTAÇÃO DE CABOS PROTENDIDOS

O R.I.M.T. se baseia na transmissão e captura de ondas eletromagnéticas de curtíssima duração, mediante o impulso enviado ao longo do cabo protendido pelo equipamento.




(Siqueira, Carlos H.)

ELETRQUÍMICA E CORROSÃO METÁLICA Prof. José de A. Freitas Jr. | TC 030 Materiais de Construção I

Enquanto isso, na sacada com as armaduras corroídas...



Aquilo: Fines concreto / Fines angrazada / Fines expostas



Referências

www.abraco.org.br/corros20.htm - G. S. Pimenta – ABRACO, 2006.

Aulas Prof. José Marques Filho.

Pannoni, F. D.; **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**

Pannoni, F. D.; **Fundamentos da corrosão**

AÇOMINAS Perfis, 2002.

Gentil, V.; **Corrosão**, LTC, Rio de Janeiro, 1996.

www.metalica.com.br

www.cbca-ibs.org.br/biblioteca_apostilas.asp

<http://www.corrosion-doctors.org>