

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PQI 5760 Corrosão na Indústria Química: Mecanismos e Prevenção.

Aula Revestimentos
poliméricos -Tintas

Aula Proteção Catódica

**METODOS DE
CONTROLE OU DE
PROTEÇÃO
CONTRA A
CORROSÃO**

Métodos de Proteção contra a Corrosão

Os métodos de controle do processo de corrosão ou de proteção contra ele podem ser classificados em:

Método termodinâmico – altera-se o potencial do metal de modo que ele não possa corroer.

➤ **Proteção catódica**

Proteção por barreira – o metal é protegido recobrimo-o com uma camada não metálica que funciona como barreira física entre ele e o meio agressivo.

- Revestimentos cerâmicos
- **Revestimentos orgânicos**
 - camadas espessas (lining)
 - tintas
- **Revestimentos de conversão**
 - Fosfatização
 - Anodização
 - Cromatização

Proteção por revestimentos metálicos -

- De sacrifício
- Nobres
- Alta dureza e resistência à abrasão

Proteção por cuidados em projeto – na fase de projetar uma planta ou equipamento pode-se tomar alguns cuidados para evitar a corrosão no futuro como:

- Seleção de materiais
- Desenho de estruturas e componentes

Controle da agressividade do meio

- Remoção de O₂, partículas sólidas, acerto de pH e uso de outros aditivos como antiincrustantes e emulsificantes
- **Uso de inibidores de corrosão**

Tratamentos de Superfície

REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS - TINTAS

Revestimentos poliméricos

O **emprego de tintas ou camadas de polímeros** para proteção contra corrosão representam 30% dos gastos diretos com todos os tipos de proteção anticorrosiva.

A causa desse uso massivo se deve a vários fatores, entre eles:

- facilidade de **aplicação**;
- boa relação **benefício/custo**;
- melhoria na **estética** – cor e diminuição da rugosidade
- serve para marcação das tubulações e sinalização geral – **segurança**



Revestimentos poliméricos

Legislação ambiental – grande pressão nesse setor e com conquistas como:

- Banido o uso de jateamento com areia por força de lei estadual (São Paulo e Rio de Janeiro)
- Diminuição da emissão de VOC (compostos orgânicos voláteis) - aumentando o teor de sólidos nas tintas e o desenvolvimento das tintas a base de água
- banido o uso de inibidores à base de chumbo e cromo (VI) – desde julho/2007 - na Europa



Cabines de jateamento abrasivo



hidrojateamento

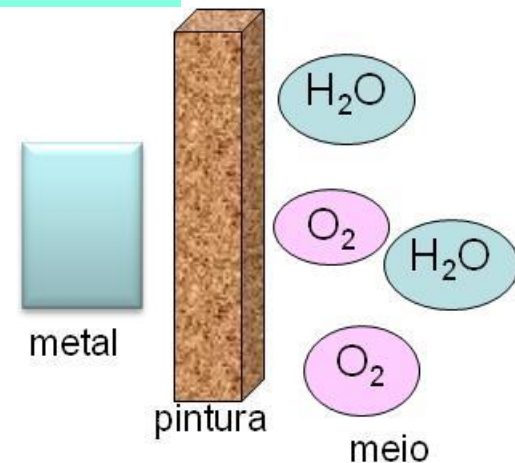
Revestimentos poliméricos

Tipos : Pintura
Camadas de polímeros (lining)

Pintura – camada de filme polimérico de até $600\mu\text{m}$.

Camada de polímero – tem espessura a partir de 1 mm podendo chegar a 30 mm. São aplicados em mantas ou na forma de plastissóis a quente.

Função: isolar o material metálico do substrato do contato com o meio agressivo



Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO

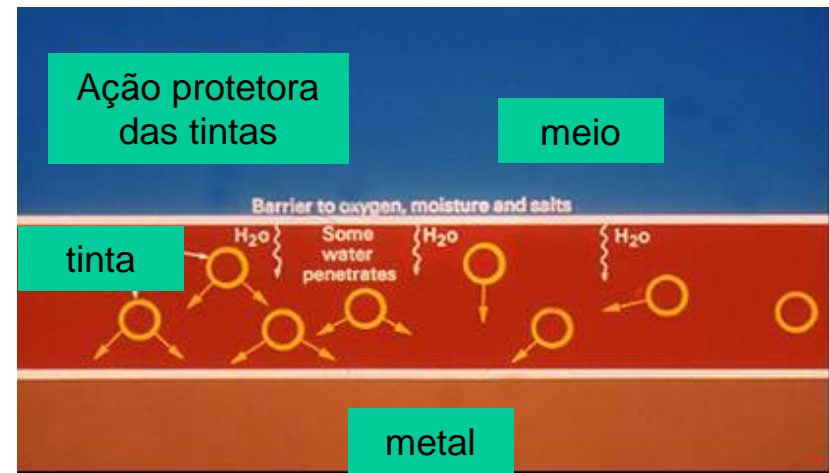
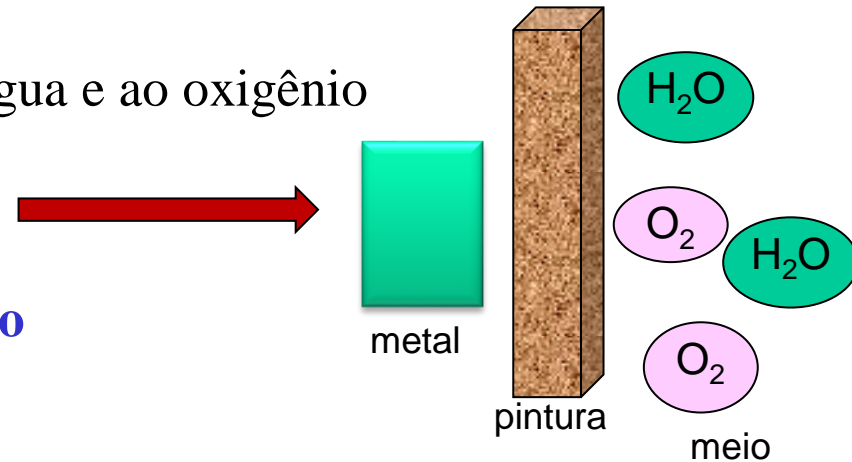
- O uso de tintas, lacas e vernizes é, sem dúvida, a forma mais utilizada para proteger metais da corrosão
- Conferem proteção por longos períodos sob uma larga faixa de condições agressivas, que vão da exposição atmosférica à imersão total em soluções corrosivas
- Devem manter a resistência e a integridade das estruturas

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: FUNÇÃO E PRINCÍPIOS DE ATUAÇÃO

FUNÇÃO: prevenir que meios agressivos entrem em contato com o substrato reativo.

- **Proteção por barreira**
 - Baixa permeabilidade à água e ao oxigênio
 - alta espessura
 - teor de pigmento
- **Proteção anódica e por adsorção**
 - cromato de zinco
 - tetroxicromato de zinco
 - fosfato de zinco
 - zarcão
- **Proteção catódica**
 - tintas ricas em zinco



Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: CONSTITUINTES

- VEÍCULO: RESINA e/ou solvente – formador de filme
- PIGMENTOS: inibidores e/ou reforço ou carga
- ADITIVOS anti-peeling, espessantes, etc

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE FILME

- **Polimerização sob ação do calor**
 - alquídico-melaminas, fenólicas, epóxi-melaminas, acrílicas
- **Evaporação do solvente**
 - acetatos e nitratos de celulose
 - acrílicas termoplásticas
 - vinílicas, borracha clorada
 - asfaltos e alcatrões
- **Oxidação- formação de um peróxido na reação de moléculas com dupla ligação e O₂**
 - alquídicas e alquídicas modificadas a partir de óleos secativos
 - ésteres de epóxi

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE FILME

- **Condensação ou reação entre componentes da tinta**
 - ou sistema de dois componentes: resina e agente de cura
 - epoxi e poliaminas
 - Poliuretanos: polióis e isocianatos
- **Coalescência** - a resina é dispersa na água e há um solvente verdadeiro da resina para formação do filme contínuo após a evaporação da água
 - emulsões em água de poliacetato de vinila
 - emulsões de copolímeros acrílicos

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: PROPRIEDADES BÁSICAS DO REVESTIMENTO ANTICORROSIVO

- **Resistência à permeação de água**
 - os mecanismos envolvem absorção, osmose e gradiente térmico através do revestimento
 - ocorrência de dano vai depender da aderência
 - as resinas epóxi apresentam os menores valores de permeabilidade à água, e as vinílicas os maiores
- **Poder dielétrico**
 - quanto maior a resistência elétrica, menor a chance de se estabelecer a pilha de corrosão

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: PROPRIEDADES BÁSICAS DO REVESTIMENTO ANTICORROSIVO

- **Resistência à passagem de íons**
 - os revestimentos epoxi e vinílicos, com grande número de ligações cruzadas, apresentam boa resistência a íons
- **Resistência química**
 - a ácidos, bases, sais e solventes orgânicos
 - depende das resinas com as quais o revestimento é formulado
 - resinas vinílicas apresentam excelente resistência a ácidos e bases
 - resinas epóxi apresentam boa resistência a bases e à maioria dos solventes orgânicos

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: PROPRIEDADES BÁSICAS DO REVESTIMENTO ANTICORROSIVO

- **Aderência**

- é, sem dúvida, a **principal propriedade de um revestimento resistente à corrosão**
- é promovida por forças físicas e químicas que interagem na interface substrato/revestimento
- a presença de rugosidade, na superfície do substrato, permite a entrada do revestimento, no estado líquido, nas reentrâncias e, na posterior passagem para o estado sólido, a película estará “ancorada”
- a presença de grupos polares na resina, com grande afinidade pela superfície do metal, também promovem adesão da película ao substrato

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: PROPRIEDADES BÁSICAS DO REVESTIMENTO ANTICORROSIVO

- **Resistência à abrasão**
 - filmes elastoméricos (borracha natural ou clorada) apresentam grande resistência a abrasão
- **Resistência às intempéries**
- **Resistência às radiações**
- **Resistência às temperaturas extremas**
 - elevadas
 - compostos inorgânicos de zinco
 - polímeros de silicone
 - baixas
 - borracha butílica e polímeros de poliisobutileno
- **Flexibilidade**
 - acompanhar a expansão e a contração do substrato
 - suportar ciclos térmicos

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: PROPRIEDADES BÁSICAS DO REVESTIMENTO ANTICORROSIVO

- **Flexibilidade**
 - resinas termoplásticas cumprem esse papel com maior facilidade sem apresentar trincas
 - resinas termofixas tendem a serem mais frágeis e a apresentarem trincamento com a ciclagem de temperatura
- **Resistência ao descolamento catódico**
 - falha característica de estruturas revestidas sujeitas à proteção catódica
 - uso de potenciais mais negativos que $-1,1V_{xESC}$, resultam em possibilidade de desprendimento de H_2 criando um pH altamente alcalino se o revestimento apresentar permeabilidade à água e pobre adesão ao substrato
 - revestimentos mistos de alcatrão (piche de carvão mineral) e epóxi são os mais resistentes

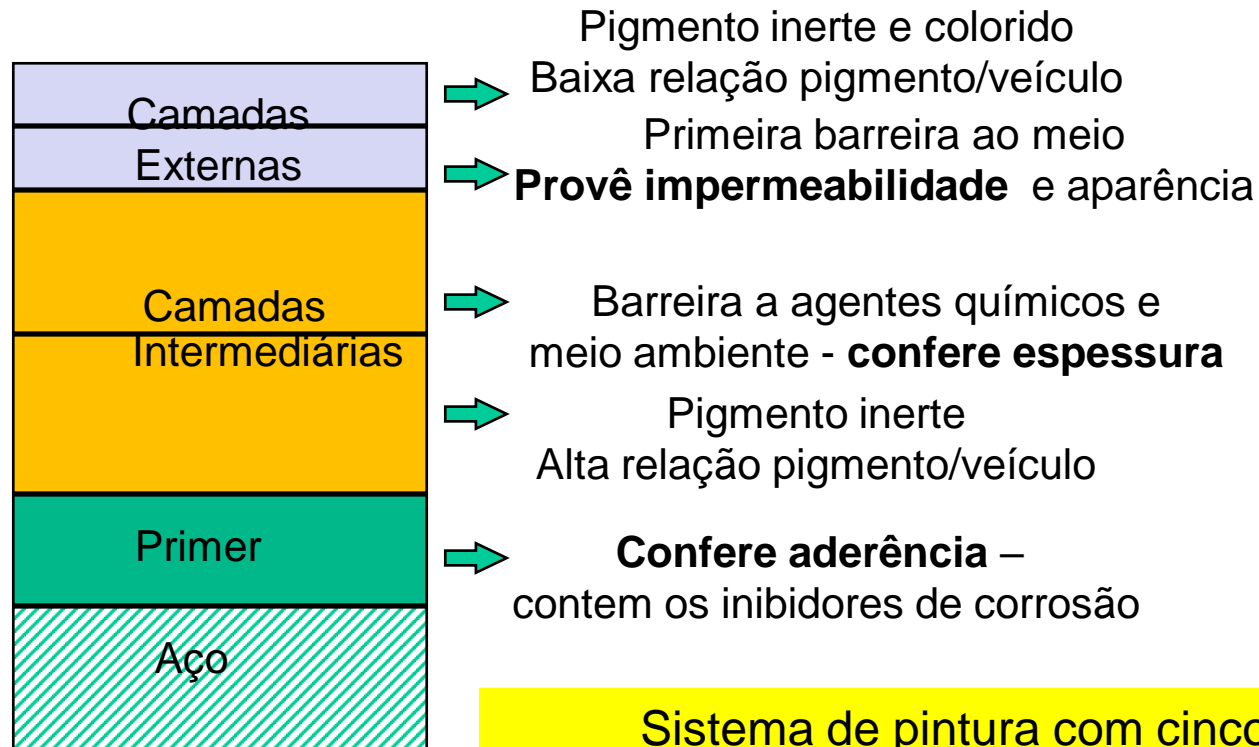
Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA

- Um revestimento não é uma estrutura auto-suportante. Ele é parte de um sistema global que inclui a base (substrato) que o suporta .
- É como um **edifício** que possui três partes principais:
- **fundação, superestrutura e teto.**
- Essas três **partes análogas no revestimento** são:
 - **primer ou tinta de fundo**: primeira camada em contato direto com o substrato
 - **camada intermediária**: responsável pela espessura e resistência química
 - **camada externa ou de acabamento**: deve promover a selagem do sistema e a boa aparência

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA



Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA - PRIMER

- O **uso de primer é universal** para todas as tintas anticorrosivas e é considerado o componente mais importante do sistema de pintura.
- Suas **finalidades** são:
 - promover forte adesão ao substrato
 - possuir grande coesão interna
 - possuir pigmentos inibidores de corrosão
 - grande resistência à corrosão
 - ser uma base adequada às camadas subsequentes
 - flexibilidade adequada

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – CAMADAS INTERMEDIÁRIAS

- As **finalidades** são prover:
 - espessura para o revestimento global
 - forte resistência química
 - resistência à transferência de vapor d'água
 - elevada resistência elétrica
 - forte coesão
 - forte ligação ao primer e à camada externa
 - resistência física

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – CAMADAS EXTERNAS

- **Devem:**
 - prover a selagem do sistema de pintura
 - formar a barreira inicial ao meio agressivo
 - prover resistência a agentes químicos, água e ação climática
 - prover uma superfície resistente ao desgaste
 - prover uma aparência agradável com sua textura, cor e brilho
 - ser mais densa que a camada intermediária, com menor relação pigmento/veículo

Revestimentos poliméricos - Tintas

Resumo das funções de cada camada no sistema de pintura

Camada	Função principal	Requisito específico	Requisito geral
Primer ou de fundo	Adesão	-Adesão ao substrato -Ligação à camada intermediária	Adesão Coesão Resistência Flexibilidade Ligação interna
Intermediária	Espessura e Estrutura	Ligação ao primer Ligação à camada externa	Coesão Ligação entre camadas Espessura Resistência
Externa ou de acabamento	Resistência à atmosfera	Resistência à atmosfera e/ou ao meio Ligação à intermediária	Selar superfície Resistência Flexibilidade Aparência

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

- **ENVOLVE:**

- **Preparo da superfície**

- retirada de ferrugem, poeira, sais solúveis, óleos, graxas, restos de pinturas e carepa; promoção de rugosidade para ancoragem da tinta

- **Escolha do sistema de pintura**

- escolha do primer
 - escolha das camadas intermediárias
 - escolha da camada externa (topcoat)

- **Aplicação (maior custo)**

- imersão, pulverização por pistola; trincha; rolo; em pó; cataforética; anaforética

- **Testar corpos-de-prova revestidos**



Pistola pulverização



em pó



cataforética

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

PREPARO DA SUPERFÍCIE

- Limpeza com solvente -SSPC - SP1
remove graxas e óleos da superfície
- Limpeza manual - ST 2 (SSPC -SP2)
para pequenas superfícies; uso de escovas de fios de aço,
lixas - é pouco eficiente
- Limpeza mecânica - ST 3 (SSPC -SP3)
escovas rotativas, esmeril, pistolas de agulha - mais eficiente que o método anterior
- Limpeza por jateamento - SA
equipamento sofisticado; mais eficiente; alto rendimento
- Limpeza ligeira (Brush-off) - SA 1 (SSPC -SP7) - não aplicável à superfície de grau A de enferrujamento (carepa)
- Jateamento comercial - SA 2 (SSPC - SP6) - remove restos de tinta, carepa solta e ferrugem
- Jateamento quase branco - SA 2.1/2 (SSPC - SP10) - podem restar manchas leves de ferrugem
- Jateamento ao metal branco - SA 3 (SSPC - SP5) - remove por completo todas as impurezas



Jateamento de um reator(parte externa)



Jateamento com areia em câmara fechada

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

ESCOLHA DO SISTEMA DE PINTURA

- Envolve o conhecimento da resistência dos diferentes tipos de resina ao ataque por diferentes agentes agressivos (ver tabelas em anexo)
- É importante a compatibilidade entre as camadas sucessivas que compõem o sistema de pintura (ver tabela em anexo)
- Envolve o conhecimento dos pigmentos inibidores e de reforço (vide tabela em anexo)

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

Escolha do sistema de pintura

7 CARACTERÍSTICAS DOS DIVERSOS SISTEMAS DE PINTURA

As tabelas a seguir, auxiliam na escolha do sistema de pintura mais apropriado.

CARACTERÍSTICAS	Óleo	Acrílico	Borracha clorada	Vinílica	Epóxi poliamina	Epóxi poliamida	Epóxi betuminoso
Dureza	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Alta	Alta
Flexibilidade	Alta	Média	Média	Média	Média	Média alta	Média alta
Resistência à abrasão	Baixa	Média	Média alta	Média alta	Alta	Alta	Alta
Resistência a álcalis	Baixa	Média alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Resistência à água	Baixa	Média alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Resistência à temperatura	Até 90°C	Até 100°C	Até 70°C	Até 65°C	Até 120°C	Até 130°C	Até 120°C
Preparação mínima da superfície	Limpeza mecânica	Sobre Fundo	Jato Sa 2	Jato Sa 2½	Jato Sa 2½	Jato Sa 2½	Jato Sa 2
Resistência às intempéries	Média	Alta	Média alta	Média alta	Média baixa	Média baixa	Média baixa
Resistência a solvente	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média baixa
Espessura µm/demão	30/40	30/40	35/75	25/70	50/ 150	50/ 150	150/ 250
Resistência a ácidos	Baixa	Média	Alta	Alta	Média alta	Média Alta	Alta

TABELA 22.4A CARACTERÍSTICAS DOS DIVERSOS SISTEMAS DE PINTURA

Fonte:
Fazenda, J.
2005.

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

Escolha do sistema de pintura

CARACTERÍSTICAS	Alquídica fenolada	Poliuretano	Epóxi rico em Zn	Silicato rico em Zn	Alquídica	Silicone
Dureza	Média	Alta	Alta	Alta	Média baixa	Média alta
Flexibilidade	Média alta	Média alta	Média	Baixa	Média alta	Média
Resistência à abrasão	Média	Alta	Alta	Alta	Média baixa	Média baixa
Resistência a álcalis	Média alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média alta
Resistência à água	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta
Resistência à temperatura	Até 120°C	Até 120°C	Até 250°C	Até 400°C	Até 105°C	Até 600°C
Preparação mínima da superfície	Sobre fundo	Sobre fundo	Jato Sa 3	Jato Sa 3	Limpeza mecânica	Jato Sa 2
Resistência às intempéries	Alta	Alta(*)	Média alta	Média alta	Média alta	Alta
Resistência a solvente	Média baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média baixa
Espessura $\mu\text{m}/\text{demão}$	30/40	30/80	70/80	75	30/40	20/25
Resistência a ácidos	Média alta	Alta	Baixa	Baixa	Média baixa	Média

* Poliuretano alifático

TABELA 22.4B CARACTERÍSTICAS DOS DIVERSOS SISTEMAS DE PINTURA

Fonte:
Fazenda, J.
2005.

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

Escolha do sistema de pintura

8 COMPATIBILIDADE ENTRE CAMADAS

↓ 2ª demão

→ 1ª demão

RESINA	ACRÍLICA	ALQUÍDICA	BORRACHA CLORADA	EPÓXI AMINA	EPÓXI POLIAMIDA	EPÓXI BETUMINOSO	ÉSTER EPÓXI	LÁTEX	ÓLEO	ALQUÍDICA FENOLADA	SILICONE	POLIURETANO	VINÍLICA	SILICATO RICO EM ZINCO	EPÓXI RICO EM ZINCO
ACRÍLICA	B	D	B	B	B	NR	D	NR	NR	B	NR	B	B	B	B
ALQUÍDICA	D	B	B	B	B	NR	B	D	B	B	NR	B	B	NR	NR
BORRACHA CLORADA	D	NR	B	B	B	D	B	NR	NR	D	NR	B	B	B	B
EPÓXI AMINA	NR	NR	NR	B	B	NR	NR	NR	NR	NR	NR	B	NR	B	B
EPÓXI POLIAMIDA	NR	NR	NR	B	B	NR	NR	NR	NR	NR	NR	B	NR	B	B
EPÓXI BETUMINOSO	NR	NR	NR	B	B	B	D	NR	NR	NR	NR	B	NR	B	B
ÉSTER EPÓXI	D	NR	B	B	B	D	B	NR	NR	B	NR	B	B	NR	NR
LÁTEX	D	D	D	D	D	D	D	B	D	D	NR	D	D	D	D
ÓLEO	D	B	B	B	B	D	B	D	B	B	NR	B	B	NR	NR
ALQUÍDICA FENOLADA	D	B	B	B	B	D	B	D	D	B	NR	B	B	NR	NR
SILICONE	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	B	NR	NR	B	B
POLIURETANO	NR	NR	NR	B	B	NR	D	NR	NR	NR	NR	B	D	B	B
VINÍLICA	D	NR	D	B	B	D	NR	NR	NR	NR	NR	B	B	B	B
SILICATO RICO EM ZINCO	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	D	NR
EPÓXI RICO EM ZINCO	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	B	B

B=BOM RESULTADO; D=DUVIDOSO; NR=NÃO RECOMENDADO

TABELA 22.5 COMPATIBILIDADE ENTRE CAMADAS

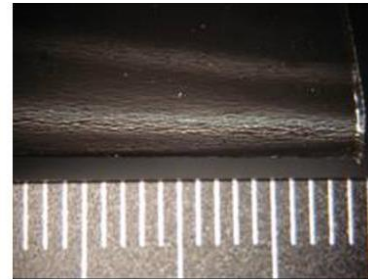
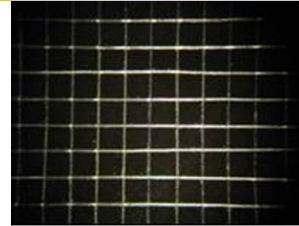
Fonte:
Fazenda, J.
2005.

Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

TESTE DOS CORPOS-DE-PROVA REVESTIDOS

- **Aderência** - propriedade mais importante com relação à resistência à corrosão
 - corte em grade - ABNT MB 985 e ASTM D 3359
 - corte em X - a fita adesiva deverá ser testada segundo a ASTM D 1000
 - Teste pull off
- **Flexibilidade**
 - mandril cilíndrico e mandril cônico
ASTM D 1373, ISO R 1519
- **Exposição em meios agressivos**
 - testes acelerados
 - Névoa salina (salt spray) - ASTM B 117 e NBR 8094 e DIN 50021
 - com incisões - ASTM D 1654
 - Umidade - ASTM D 2247



Revestimentos poliméricos - Tintas

TINTAS: SISTEMA DE PINTURA – BOA PRÁTICA DE PINTURA

TESTE DOS CORPOS-DE-PROVA REVESTIDOS

- **Dióxido de enxofre** (SO₂) - NBR 8095 *Kesternich*- para simular atmosfera industrial
- **Intemperismo artificial** - sol, chuva, radiações UV e IV - ASTM G 23 e ASTM G 26
- **Imersões**
 - água destilada - ASTM D 870
 - agentes químicos - ASTM 1308
- **testes em campo** - demorados, mas confiáveis
 - em estações de corrosão atmosférica NBR
- **Bibliografia**
 - Munger, C. Corrosion Prevention by Protective coatings. NACE, Houston, Texas, 1984.
 - Fazenda, J.M.R. Tintas e Vernizes. ABRAFATI, São Paulo, 2005.
 - A Working Party Report on Practical Corrosion Principles. Publ. by European Federation of Corrosion by The Institute of Metals, London, 1989.

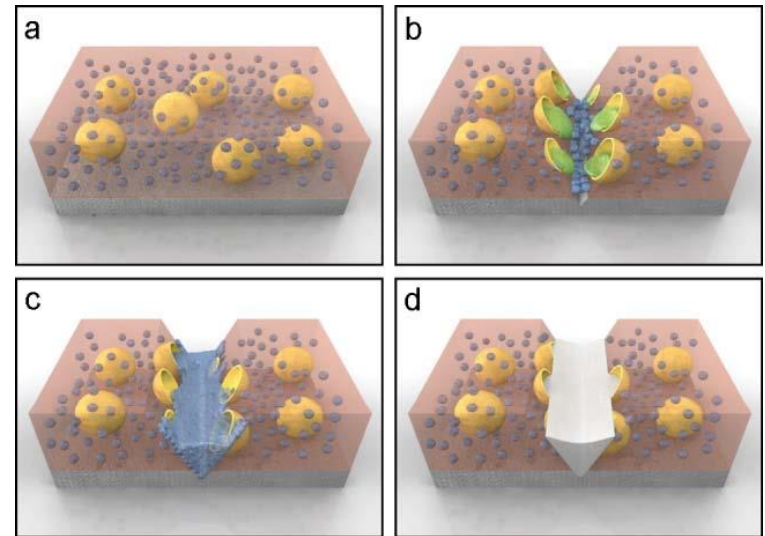
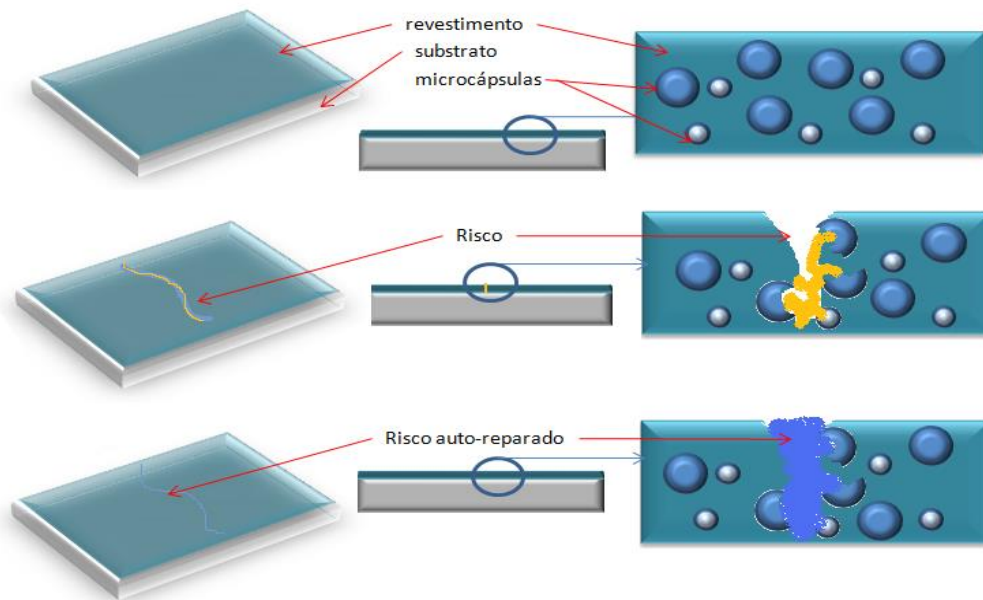
Tintas com poder de autorreparação

Proteção passiva – por barreira



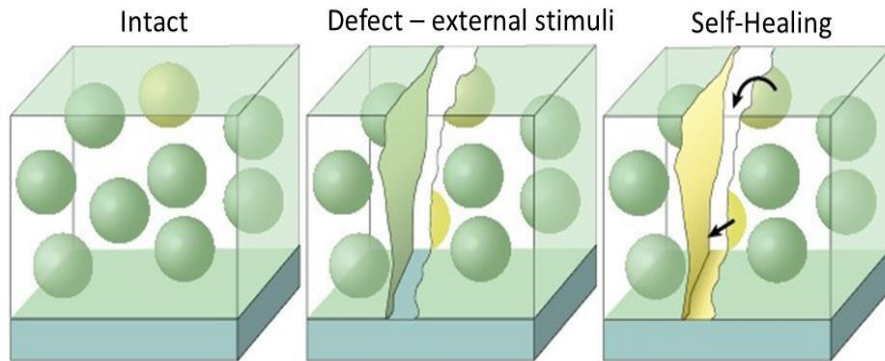
Proteção ativa

Aditivação adequada e estímulo externo para liberação das espécies ativas (formadores de filme ou inibidores de corrosão)

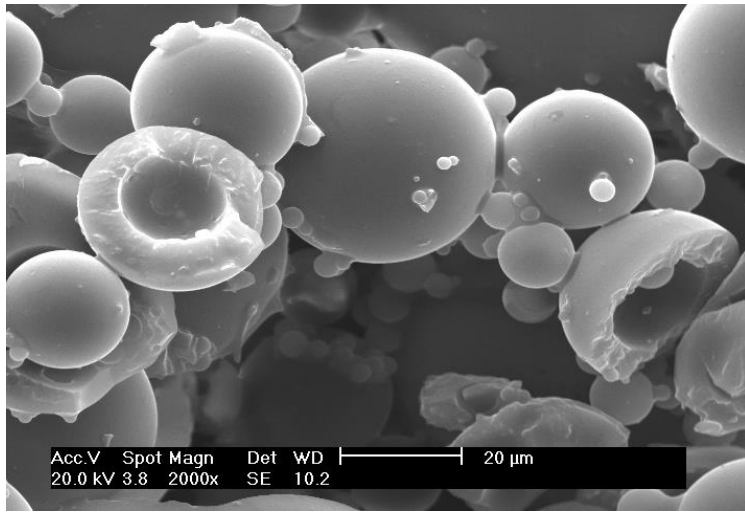
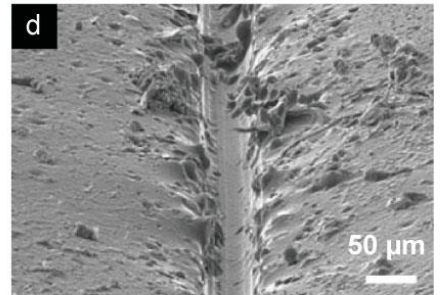
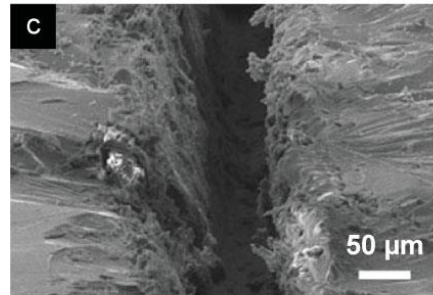
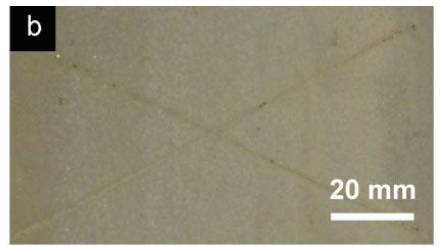
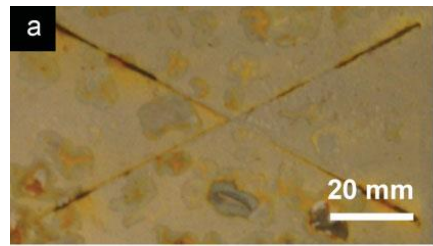


Esquemas do processo de autorreparação contendo diferentes microcápsulas contendo multicomponentes. Microcápsulas menores contendo inibidor de corrosão e microcápsulas maiores contendo um formador de filme

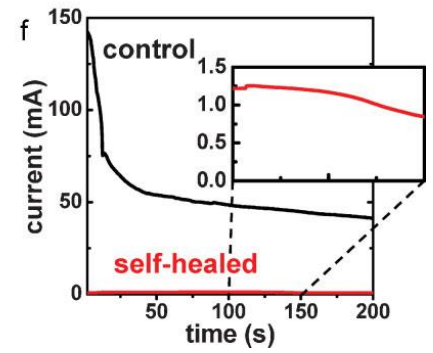
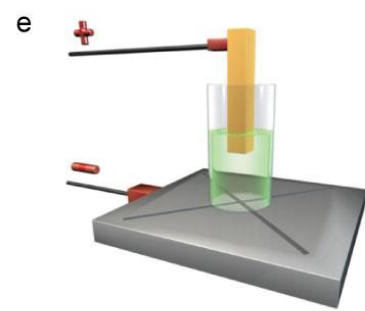
Atuação de revestimentos com propriedades de autorreparação ou self-healing



Fonte: HUGHES *et al.* Designing green, self-healing coatings for metal protection. *NPG Asia Mater.* 2(4) 142–151 (2010)



F. Cotting – tese 2018



PROTEÇÃO CATÓDICA

Proteção catódica

O método de proteção foi estudado em 1823 por Sir Humphray Davy (trabalhava com Faraday) no intuito de desenvolver método para proteger a frota da marinha mercante inglesa – chapas de cobre dos cascos dos navios - da corrosão provocada pela água do mar.

Ele percebeu que ao ligar pedaços de ferro aos cascos de cobre, estes eram protegidos da corrosão

No Brasil o método passou a ser utilizado em larga escala com o início das atividades da **Petrobrás**, ao instalar oleodutos e gasodutos, na **década de 60**.

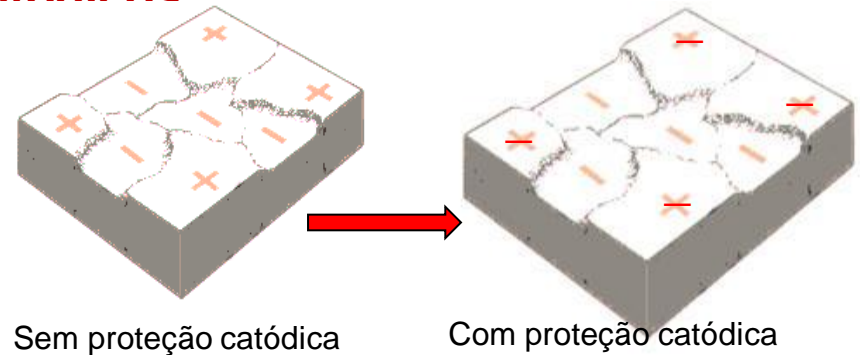
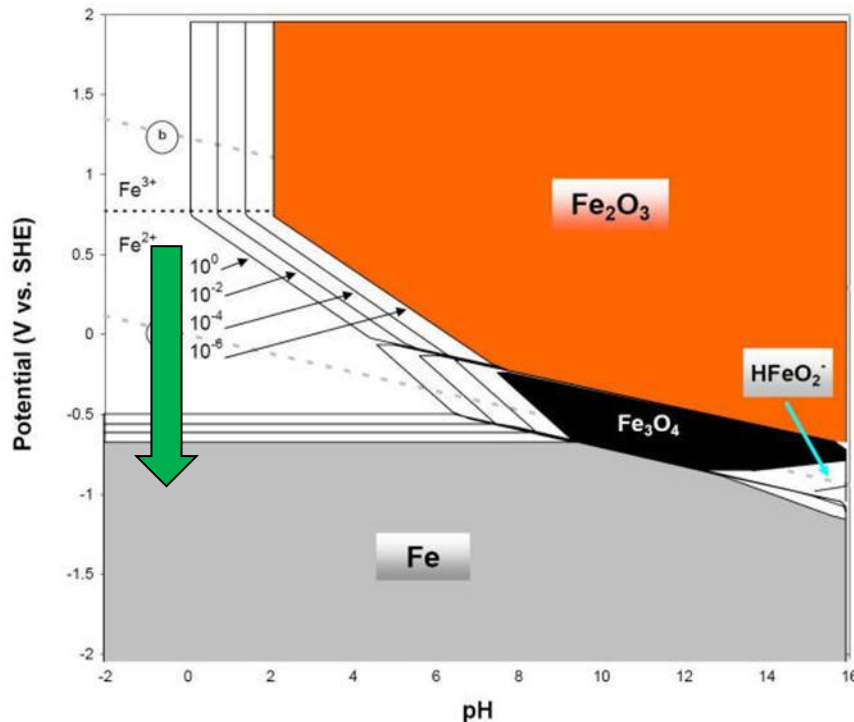
O que se protege com esse método?

Tanques de aço com aterramento de cobre, oleodutos e gasodutos, adutoras para abastecimento de água potável, sistema de tubulações para distribuição de GLP e gás natural, tanques de combustível em postos de serviço, etc

Proteção catódica

Princípio do método

Trata-se de **método termodinâmico** em que o metal tem a sua tendência natural a corroer alterada, por modificação do seu potencial no meio agressivo, de modo que **na sua superfície só existam sítios catódicos**



O metal deve ter seu **potencial alterado no sentido catódico**, de modo que atinja valor abaixo da linha de equilíbrio M⁺/M, saindo do domínio de corrosão e **entrando no domínio de imunidade à corrosão.**

Proteção catódica

Princípio do método

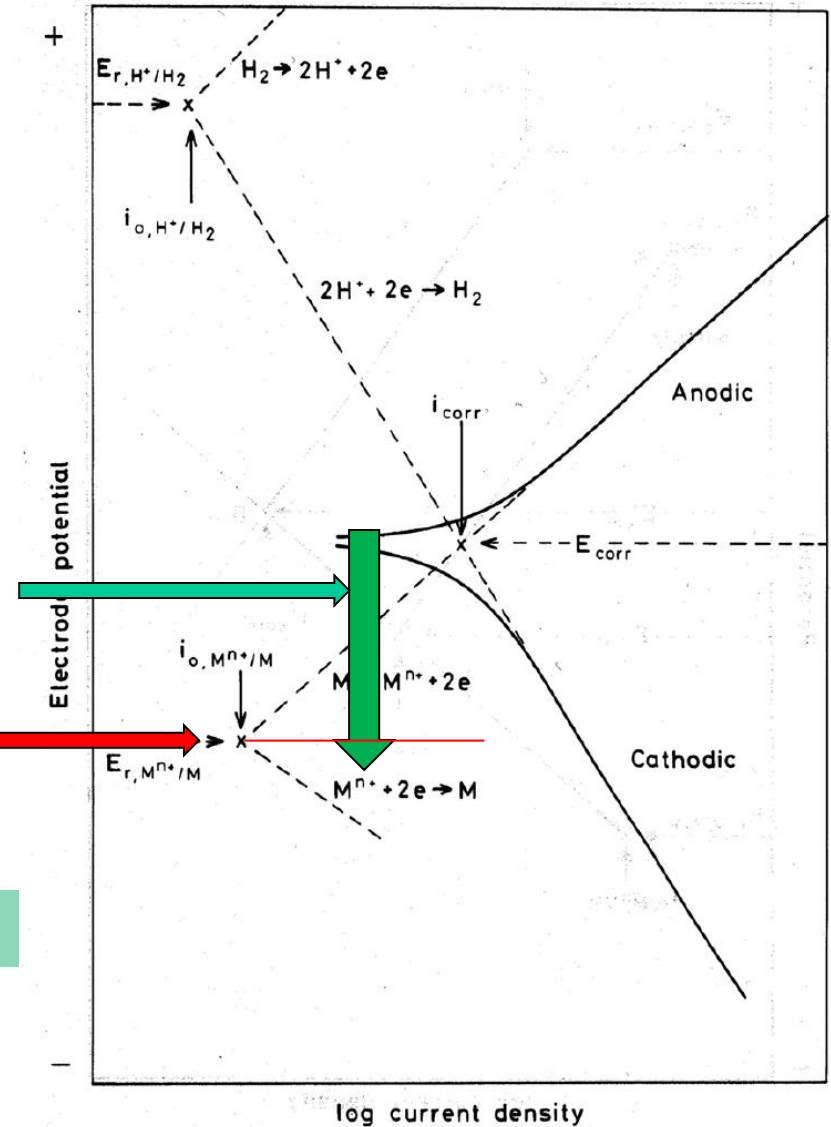
Critério de proteção

A estrutura a ser protegida deve ser **polarizada catódicamente** a potencial abaixo do seu potencial de corrosão, mas para estar totalmente protegida deve ir até **o potencial de equilíbrio do metal** a ser protegido, no meio em questão

Polarização catódica até potencial abaixo do E_{eq}

Potencial de equilíbrio

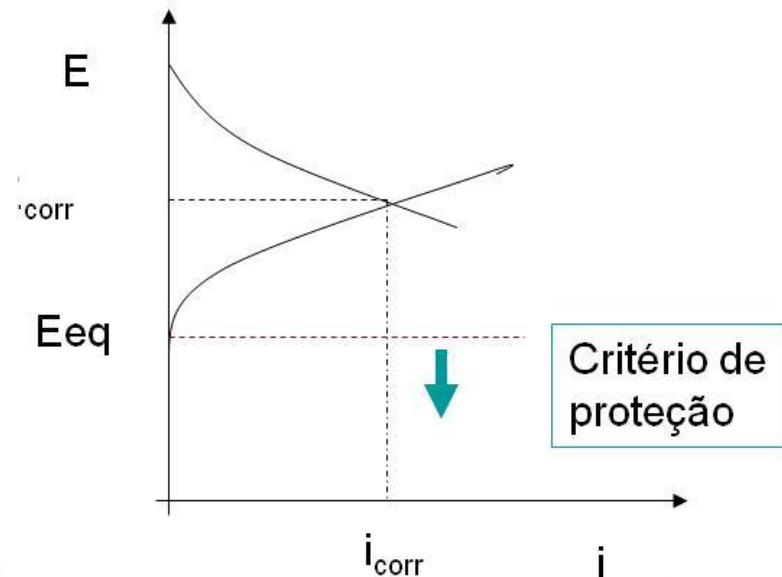
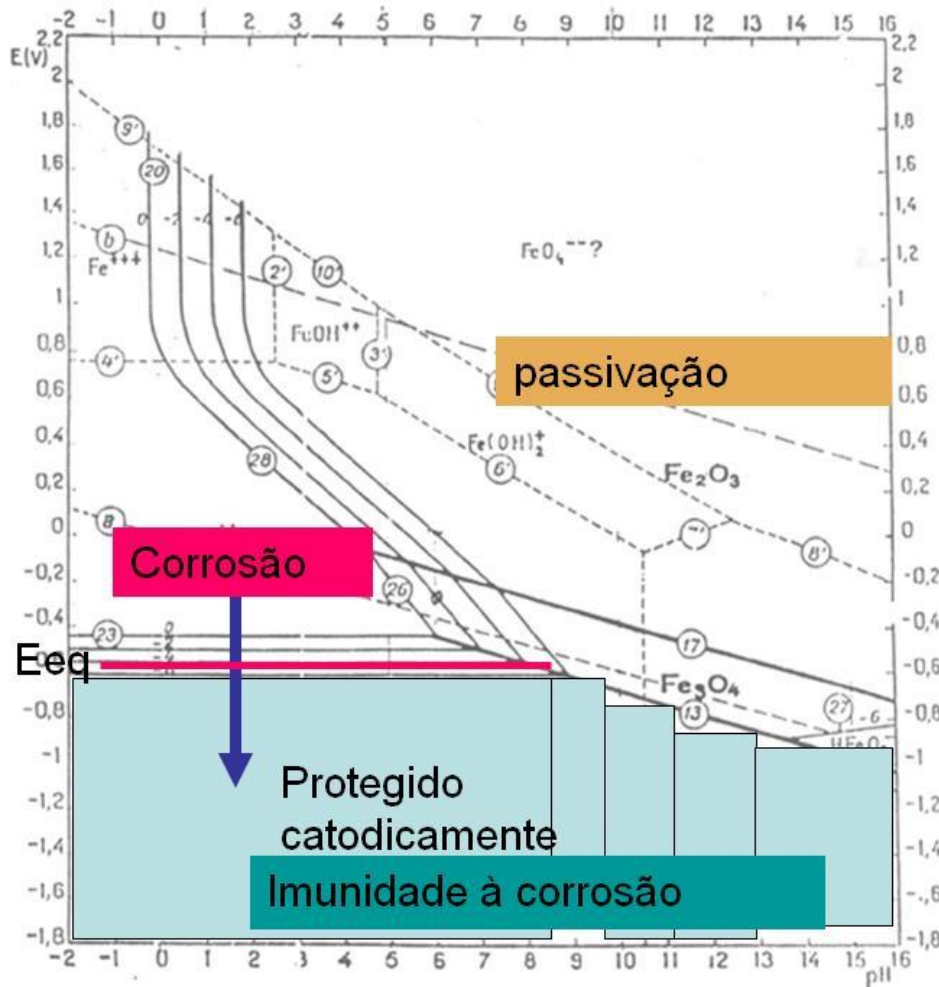
$E_{proteção}$ para aço = $-0,850V_{xCu/CuSO4}$



Proteção catódica

Princípio do método - resumindo

Proteção Catódica – princípios e critérios de proteção



Todas as regiões da superfície do metal precisam sentir um potencial mais negativo que o E_{eq} do metal no meio

$$E \leq -0,85V \times Cu/CuSO_4$$

Proteção catódica

Tipos

Condição necessária: contato direto da estrutura a ser protegida com um eletrólito, no qual se instalam os anodos.

Tipos: (a) Galvânica ou por anodos de sacrifício;
 b) Por corrente impressa

Galvânica

A corrente de proteção se origina na diferença de potencial entre o metal a ser protegido e o metal do anodo.

Anodos mais usados: magnésio, zinco e alumínio. São chamados de **anodos de sacrifício**

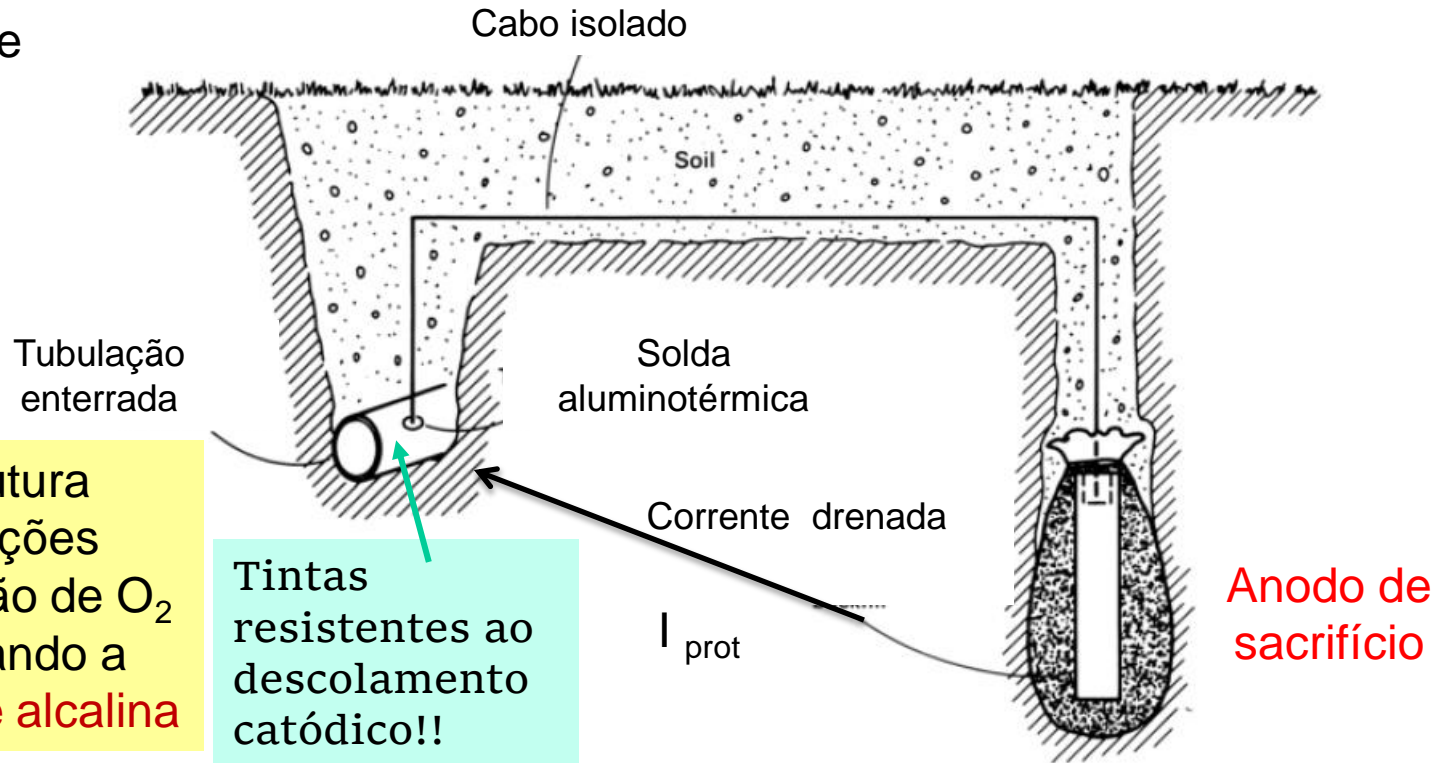
Motivo:

- maior diferença de potencial entre anodo e o metal a ser protegido;
 - menor polarização anódica (dissolve com facilidade).

Proteção catódica - galvânica

Como é realizada

Os **anodos galvânicos** ou de sacrifício drenam a corrente e esta adentra a tubulação que se sentirá o cátodo



Sistema de proteção catódica galvânica em tubulação enterrada usando anodos de sacrifício, de magnésio, com enchimento condutor.

Proteção catódica - galvânica

Características dos anodos de sacrifício

Limitação:

- Diferença de potencial é pequena, no máximo 1,2 V, logo é preciso ter baixa resistência no circuito.

Mg ⇒ usado em meios de resistividade, ρ , até 6.000 $\Omega \cdot \text{cm}$. (água doce ou solo)

Zn ⇒ usado em meios de resistividade, ρ , até 1.500 $\Omega \cdot \text{cm}$. (água do mar)

Anodos galvânicos: são distribuídos ao longo da estrutura para manter boa distribuição de corrente. São usados com enchimento condutor para evitar contato direto com o solo natural (formação de macropilhas de corrosão) e para baixar a resistência do circuito.

Tabela 1 – Composição de Enchimentos Condutores para anodos galvânicos

Tipo	Gesso Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) %	Bentonita (%)	Sulfato de sódio(%)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)
1	25	75	-	250
2	50	50	-	250
3	75	20	5	50

Tipo 1 – usado em solos de baixa umidade, pois bentonita retém água.

Tipo 2 – usado em condições gerais.

Tipo 3 – usado em solos de alta resistividade.

Proteção catódica - galvânica

Características do anodos galvânicos ou de sacrifício

Material do anodo	Massa específica (g.cm-3)	Potencial x Cu/CuSO ₄	Corrente drenada A.h/kg	Densidade de corrente típica do anodo
Zn	7,1	-1,10	780	0,5-2,0
Al	2,7	-1,15	2700	0,6-2,5
Mg	1,7	-1,55	1230	1,5-5,6

Usos

Anodos de Zn – em água doce ou em água do mar

Anodos de Al – em água do mar (não pode ser liga passiva!!!!)

Anodos de Mg – em solos ou em água doce

Proteção catódica - galvânica

Características

- ✓ **Reposição de anodos após o consumo;**
- ✓ **Não funciona quando há correntes de interferência;**
- ✓ **Para meios de baixa resistividade;**
- ✓ **Não permitem regulagem da corrente injetada;**
- ✓ **Para correntes de até 5 A (pequenas estruturas).**

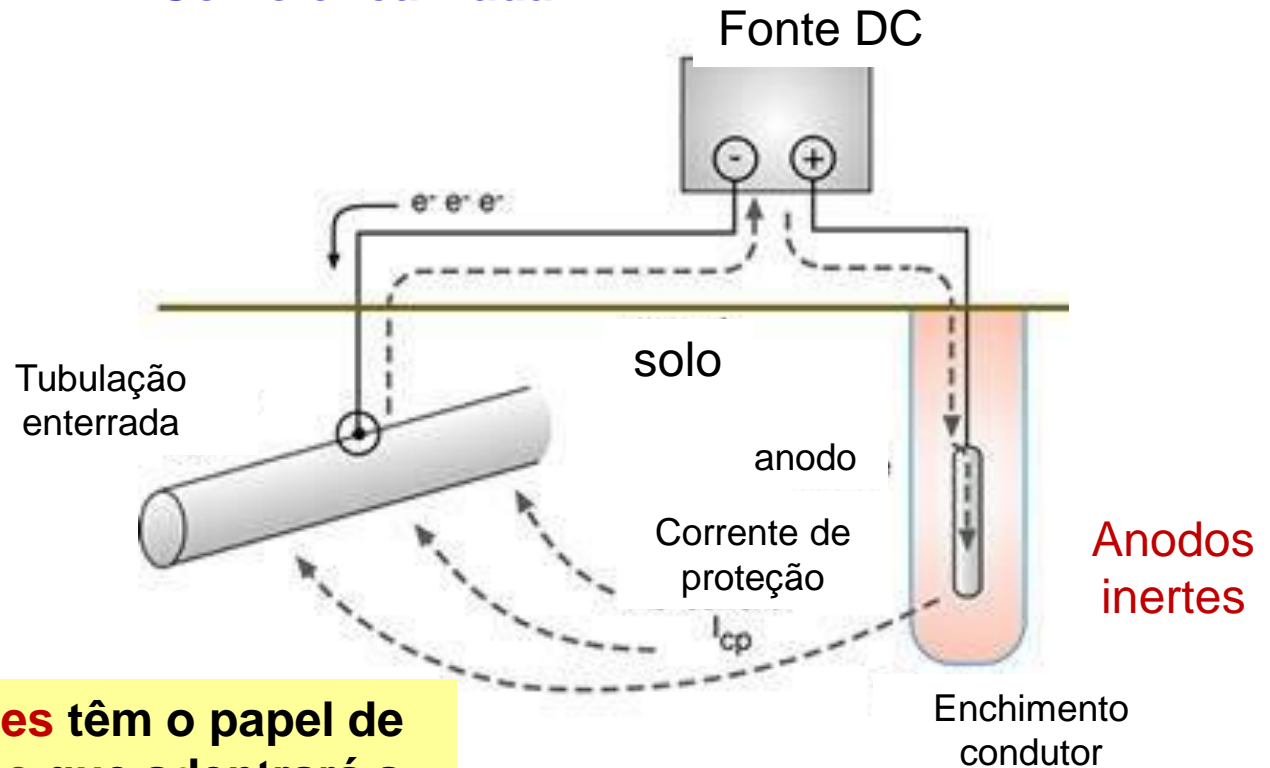
Proteção catódica – por corrente impressa

Como funciona?

A corrente provem de uma **fonte** externa geradora de **corrente contínua** (retificador, bateria ou gerador), usando um sistema dispersor de corrente no meio, por meio de **anodos inertes.**

Proteção catódica – por corrente impressa

Como é realizada?



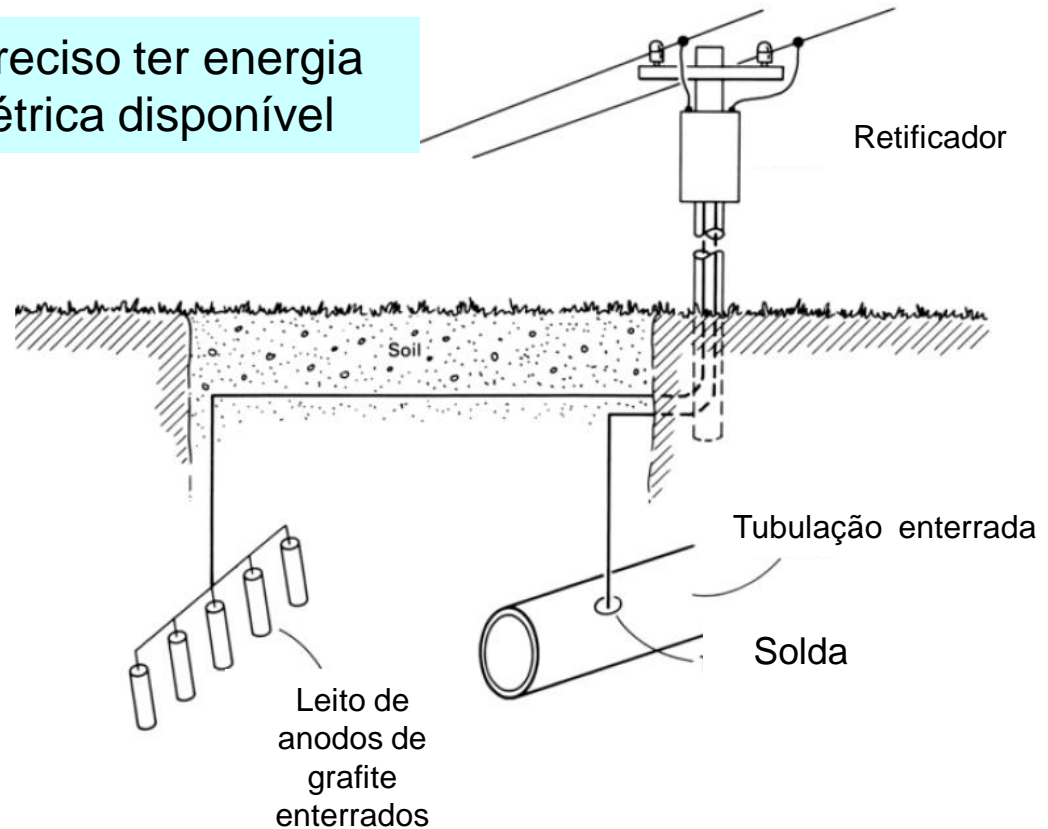
Os **anodos inertes** têm o papel de **drenar a corrente** que adentrará a estrutura a ser protegida e esta se sentirá protegida, ou seja, se sentirá como sendo o cátodo do sistema.

Proteção catódica – por corrente impressa

Como é realizada?

Os anodos inertes são colocados formando um leito (para diminuir a resistência de aterramento) e têm o papel de drenar a corrente que adentrará a estrutura a ser protegida e esta se sentirá protegida, ou seja, se sentirá como sendo o cátodo do sistema.

É preciso ter energia elétrica disponível

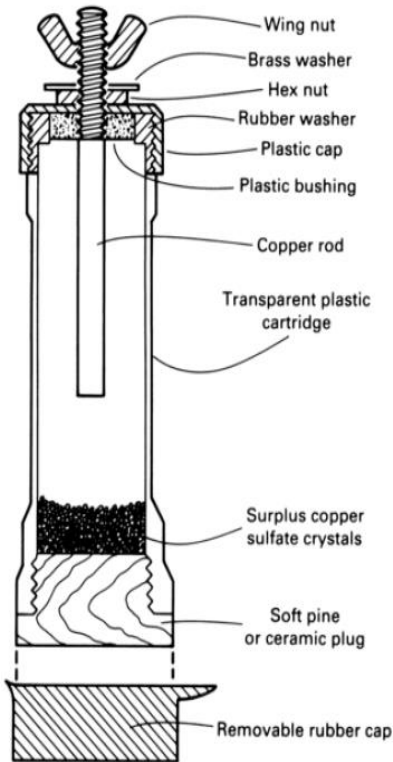


Proteção catódica – por corrente impressa

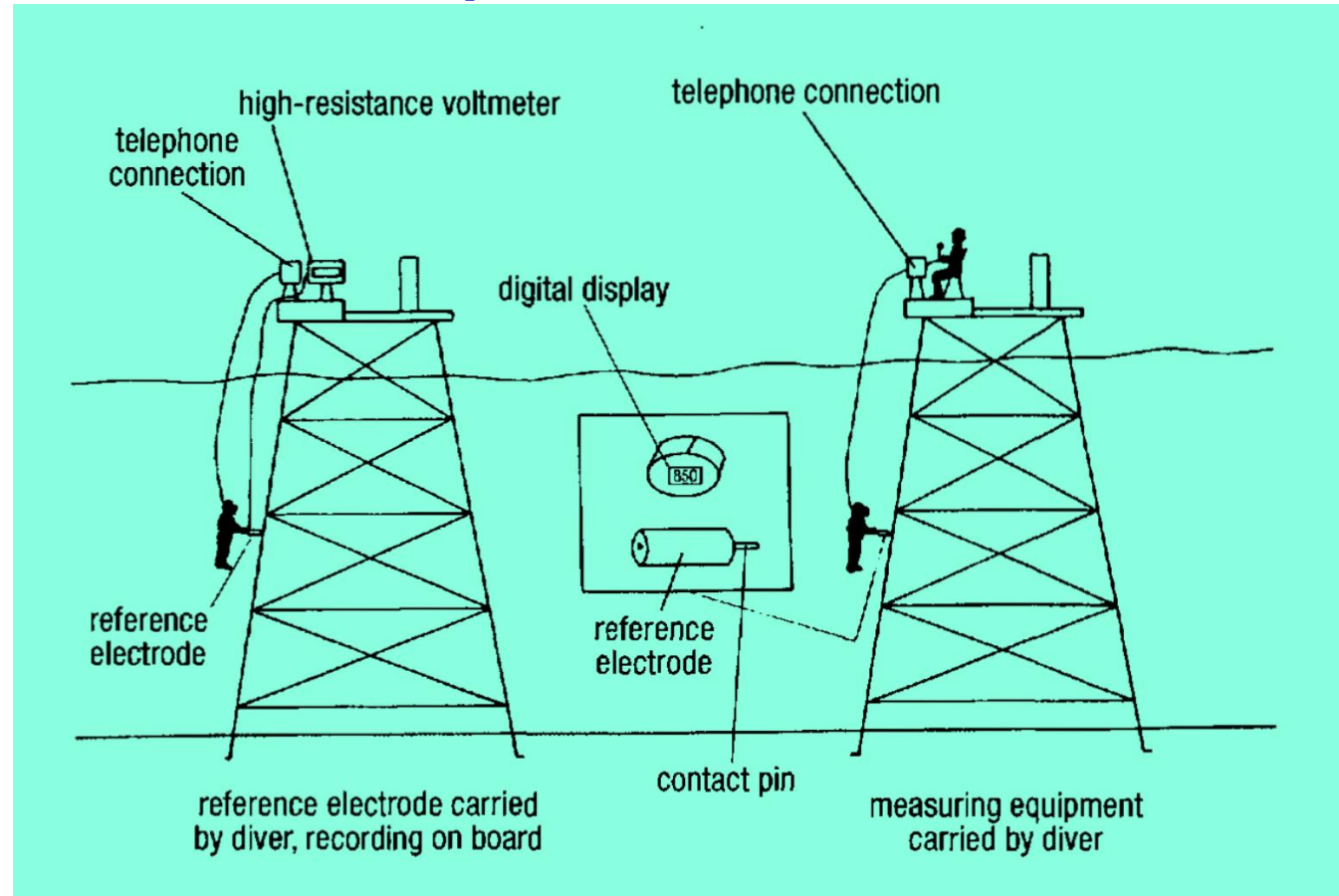
Características do anodos inertes

Material do Anodo	Para uso em	Densidade de Corrente drenada pelo anodo (A/ m ²)	Desgaste (kg/ A. ano)
Grafite	Solos, água doce e água do mar.	3 – 5	0,4
Fe-Si	Solos e água doce.	10 – 15	0,2
Fe-Si-Cr	Solos, água doce e água do mar.	10 – 15	0,4
Pb-Sb-Ag	Água do mar	50 – 100	0,1
Ti platinizado	Água do mar	Ampla faixa	Desprezível
Nióbio platinizado	Água do mar	Ampla faixa	Desprezível

Proteção catódica – por corrente impressa monitoramento do potencial da estrutura

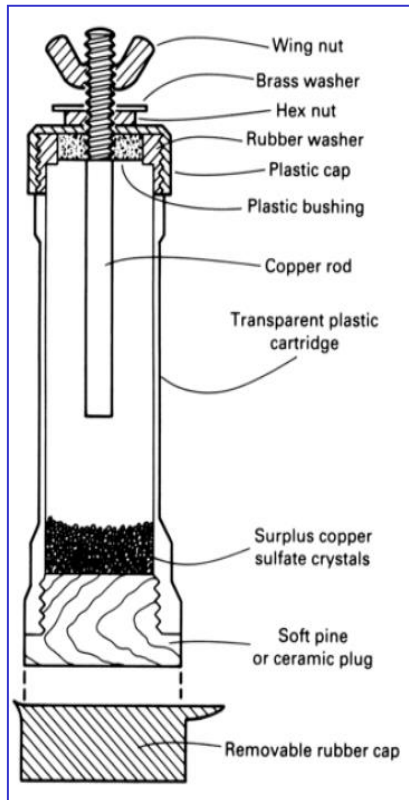


Eletrodo de referência
Cu/CuSO₄ para solo

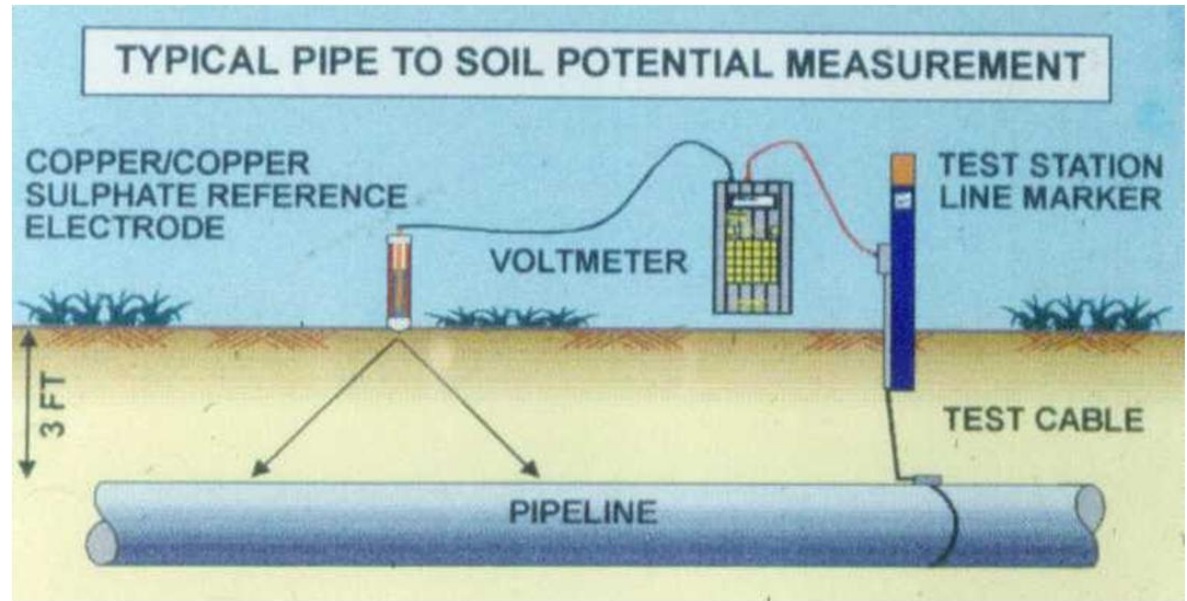


Monitoramento do potencial da estrutura em relação ao eletrodo de referência Ag/AgCl feito por um mergulhador.

Proteção catódica – por corrente impressa monitoramento do potencial da estrutura



Elétrodo de referência
Cu/CuSO₄ para solo



Monitoramento do potencial da estrutura em relação ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄, no solo.

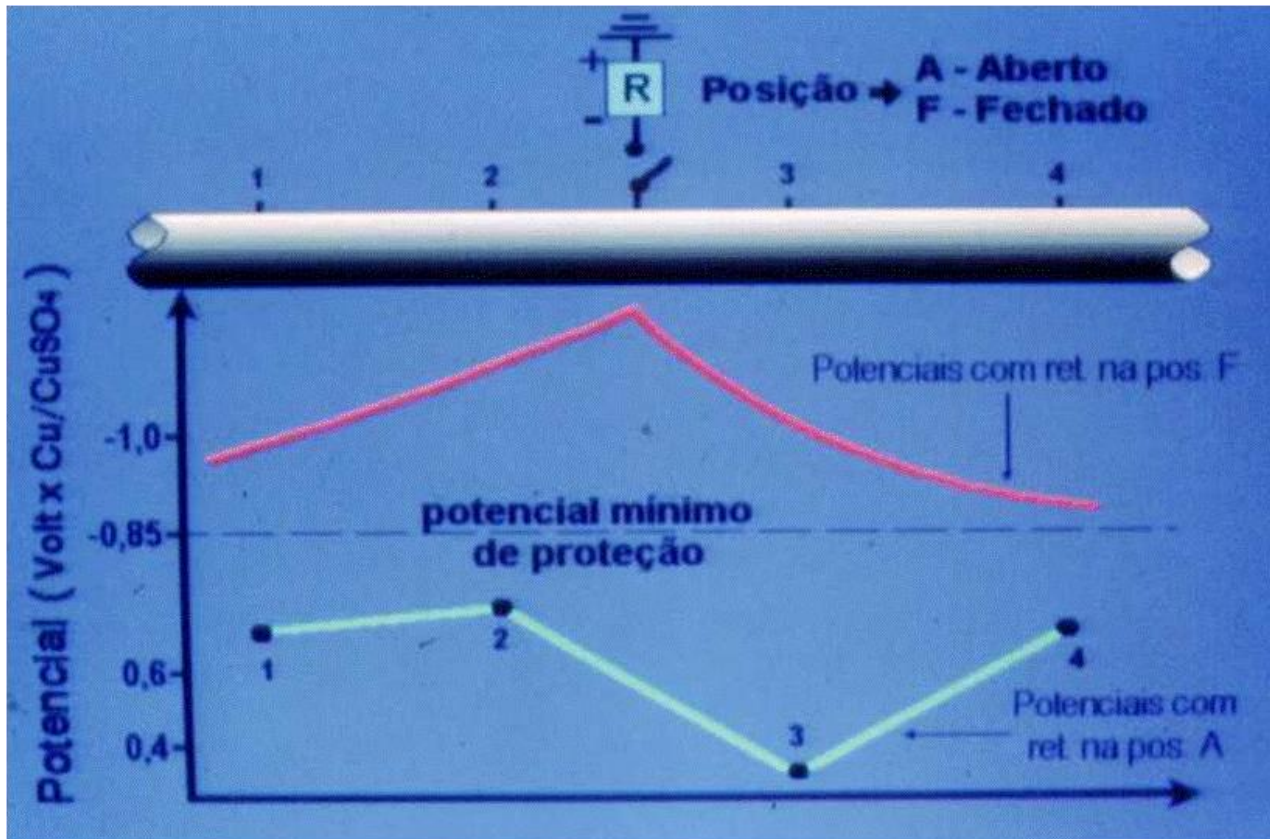
Proteção catódica – por corrente impressa

Densidades de corrente necessárias para
proteção de aço carbono

Meio	Densidade de corrente/ $A.m^{-2}$
Soluções ácidas	350 - 500
Soluções salinas	0,3 - 10
Água do mar	0,05-0,15
Lama salina	0,025-0,05

Proteção catódica – por corrente impressa

Distribuição de potencial ao longo da tubulação quando a proteção catódica está operando, ou não.



Legenda:

Linha vermelha = distribuição de potencial - ligado

Linha Verde = distribuição de potencial quando a proteção não está operando - desligado

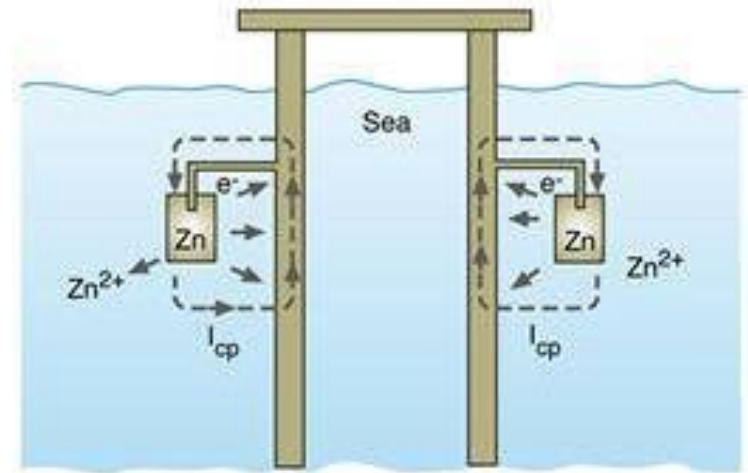
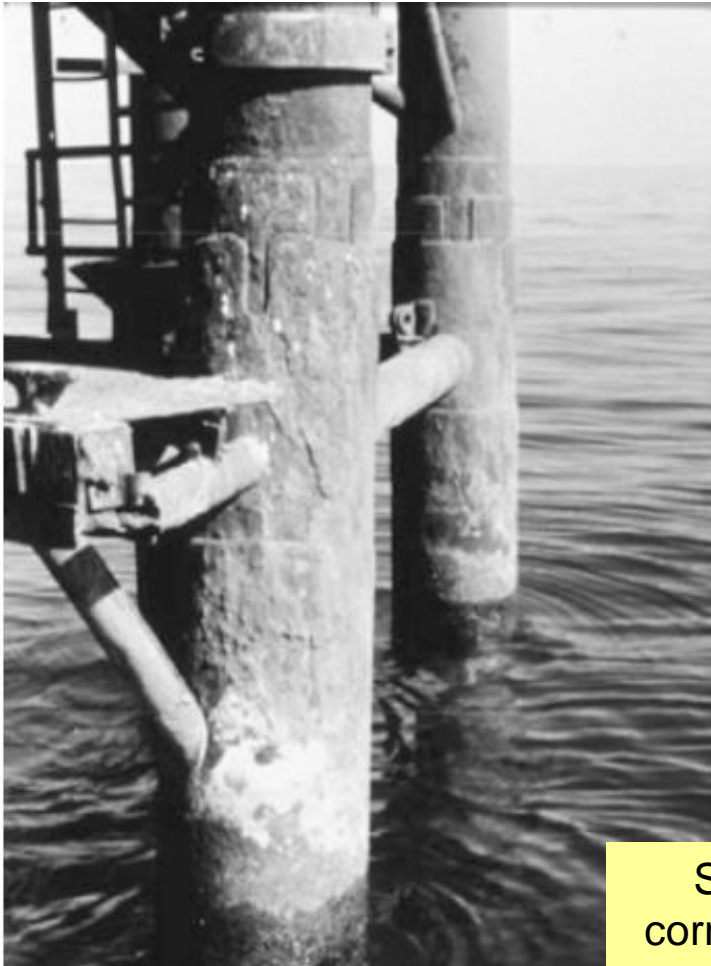
Fonte: IEC

Proteção catódica – por corrente impressa

Características

- ✓ A resistividade do meio não é entrave;
- ✓ Para estruturas de médio e grande porte;
- ✓ Recomendado quando há correntes de interferência;
- ✓ Permite regulagem;
- ✓ Necessita acompanhamento operacional;
- ✓ Custo inicial maior;
- ✓ Sujeito a interrupção;
- ✓ Pode haver inversão de polaridade (catastrófica).

Proteção catódica – exemplos de uso



Sistema de proteção catódica galvânica em estrutura submersa, por anodos de sacrifício de zinco.

Sistema de proteção catódica por corrente impressa em que a pintura da estrutura precisa resistir à elevada alcalinidade que se forma na estrutura polarizada catodicamente. Ocorre a incrustação de organismos marinhos.

Proteção catódica – galvânica - exemplo



Plataforma offshore mostrando dois (vide setas) de centenas de anodos. Cada anodo pesa 375 kg e drena 5 A . Note que a parte que fica fora da água é pintada e a que fica submersa não necessita de pintura porque estará protegida catodicamente. Sistema de proteção catódica por corrente impressa.

Proteção catódica – usos

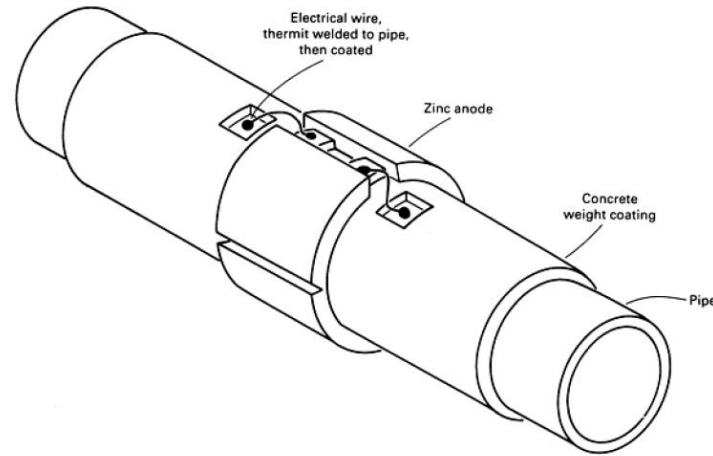


Tanques de estocagem para serem enterrados parcialmente , com os seus anodos de sacrifício já colocados

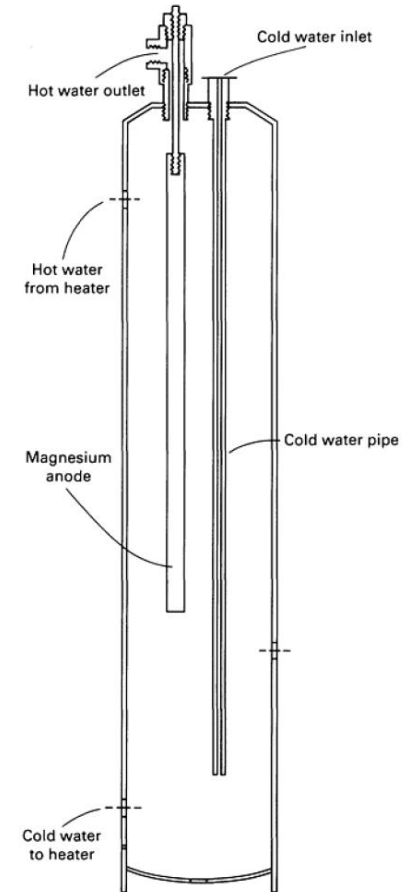
Proteção catódica – galvânica - usos



Anodos de zinco na parte inferior de um barco



Anodo de zinco na forma de abraçadeira em tubulação de sistema offshore.



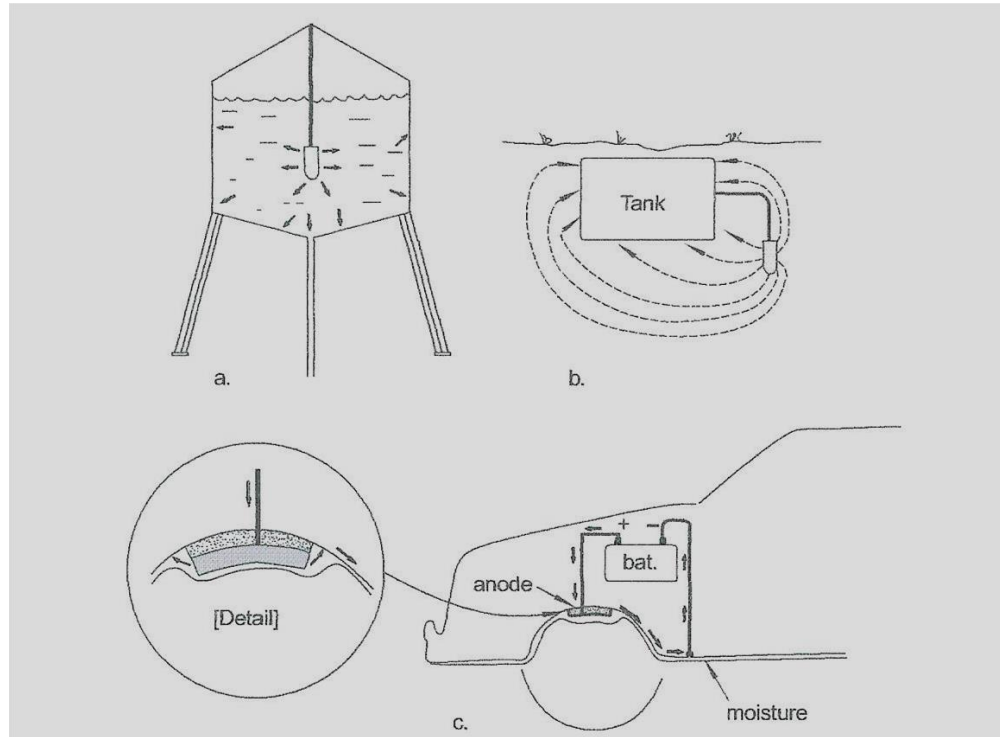
Folha de Mg como anodo de sacrifício na proteção de um aquecedor de água.

Proteção catódica

Comparação entre os dois tipos – galvânica e corrente impressa

Proteção catódica galvânica	Proteção por corrente impressa
Simple	Complexa
Pouca manutenção	Requer manutenção
Atua bem em meios condutores	Pode atuar em meios resistivos
Anodos próximos à estrutura	Anodos podem ficar longe (remotos)
Grande capital de investimetno para grandes estruturas	Pouco capital de investimento para grandes estruturas
	Pode causar: <ul style="list-style-type: none">- Correntes de fuga que interferem em outras estruturas próximas- Descolamento de revestimento da tubulação- Fragilização por hidrogênio (excesso de proteção)

Proteção catódica – limitação do uso



- O anodo de magnésio **só protege o reservatório** de água potável , mas **não dentro do tubo de distribuição!!!**
- O **tanque enterrado não terá sua parte superior protegida**, pois a corrente não chega até lá.
- O carro não pode ser protegido catodicamente**, ligando-se a carroceria ao terminal negativo da bateria e um anodo num dáo local ,pois não há eletrólito (apenas pequena extensão com umidade adsorvida) colocando toda a chapa do carro e os anodos no mesmo eletrólito