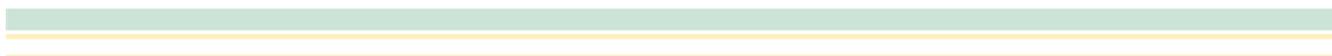




# PROTEÇÃO CATÓDICA

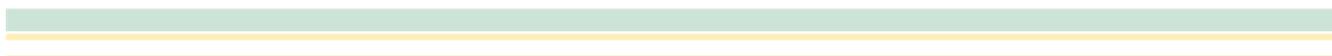
## EFETIVO COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA PARTE 1: INTRODUÇÃO

Este material contém informações classificadas como NP-1

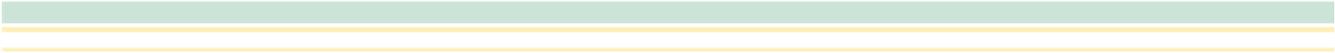


## INSTRUTOR

**João Paulo Klausung Gervásio**  
Engenharia de Dutos Terrestres  
Projeto de dutos terrestres  
Tel.: (21) 3229-3019  
Email: [joaoklausung@petrobras.com.br](mailto:joaoklausung@petrobras.com.br)



## PROGRAMAÇÃO

1. Introdução à proteção catódica (PC);
  2. PC de dutos terrestres;
  3. PC de outras estruturas;
  4. Dimensionamento;
  5. Interferências elétricas;
  6. Técnicas especiais de inspeção.
- 

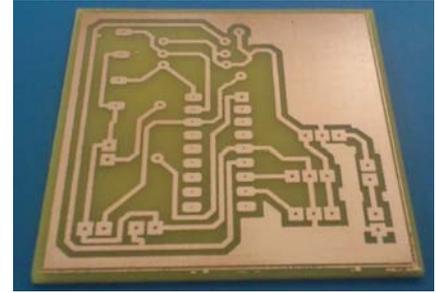
## INTRODUÇÃO

1. Bibliografia;
  2. Aplicações da PC, história e curiosidades;
  3. Medição de potencial e corrosão eletroquímica;
  4. Critério de PC;
  5. Tipos de PC;
  6. Aplicação dos anodos.
- 

# CURIOSIDADES



O que é corrosão?  
Exemplos...



# CURIOSIDADES

O que é Proteção Catódica?  
Aplicações...



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DUTRA, A.; NUNES, L. Proteção catódica - Técnica de combate à corrosão. 5ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
2. NACE INTERNATIONAL. *Cathodic Protection Technologist Course Manual*, 2011.
3. NORMAS TÉCNICAS

## NORMAS TÉCNICAS

Organizações de referência na área de Proteção Catódica:

Internacionais:

- ISO - *International Organization for Standardization*;
- NACE - *National Association of Corrosion Engineers*;
- EN - *European Standard*;
- API - *American Petroleum Institute*;
- DNV - *Det Norske Veritas*.

Nacionais:

- ABNT - *Associação Brasileira de Normas Técnicas*;
- CONTEC - *Comissão Normalização Técnica Petrobras*.

## PRINCIPAIS NORMAS

- Dutos terrestres:
  - NACE SP 0169: 2007
  - ISO 15589-1:2003 (ABNT ISO 15589-1:2011)
  - PETROBRAS N-2298:2013
- Dutos submersos:
  - ISO 15589-2:2012
  - DNV RP F103:2010
  - PETROBRAS N-1935:2011
- Estruturas submarinas:
  - DNV RP B401:2010
  - DNV RP B101:2007
  - PETROBRAS N-2838:2011
- Tanques:
  - NACE RP 0193:2001
  - NACE SP 0388:2007
  - NACE SP 0575:2007
  - API RP 651:2007

## PRINCIPAIS NORMAS

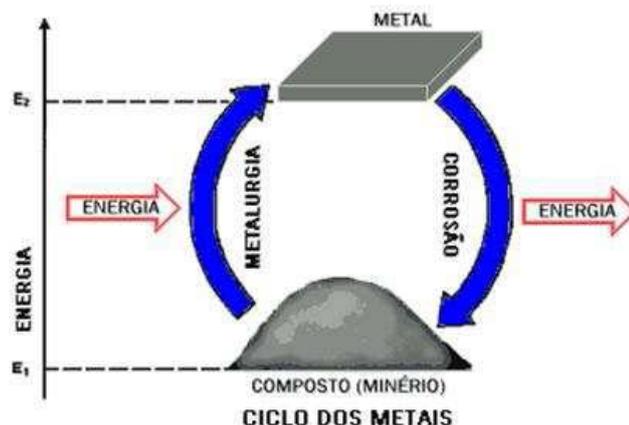
- Estruturas de concreto:
  - NACE SP 0290:2007
- Anodos:
  - ABNT NBR 9240:2012
  - ABNT NBR 9241:2012
  - ABNT NBR 9358:2012
  - ABNT NBR 10387:2012
- Equipamentos elétricos:
  - PETROBRAS N-1493:2012
  - PETROBRAS N-2608:2012
- Interferências elétricas:
  - NACE SP0177:2007
  - EN 14505:2005
  - EN 50162:2004
  - EN 50443:2012

## DEFINIÇÃO DE CORROSÃO

A corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos. Pode incidir sobre diversos tipos de materiais, metálicos ou não metálicos.

## CORROSÃO METÁLICA

O processos de corrosão metálica correspondem ao inverso dos processos metalúrgicos.



## CORROSÃO ELETROQUÍMICA

- Os processos de corrosão eletroquímica são os mais frequentes na natureza.
- Geralmente ocorrem na presença de água no estado líquido e à temperatura ambiente.
- Há formação de uma pilha ou célula de corrosão.

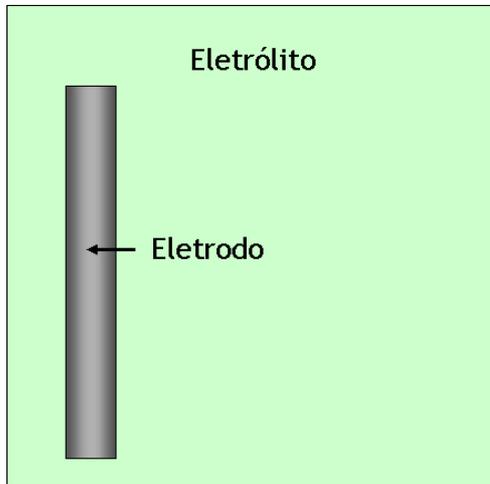
## ELETROQUÍMICA - DEFINIÇÕES

Eletrólito

**Eletrólito:**

Qualquer meio que possui em sua composição íons dissolvidos que conduzem eletricidade.

# ELETROQUÍMICA - DEFINIÇÕES

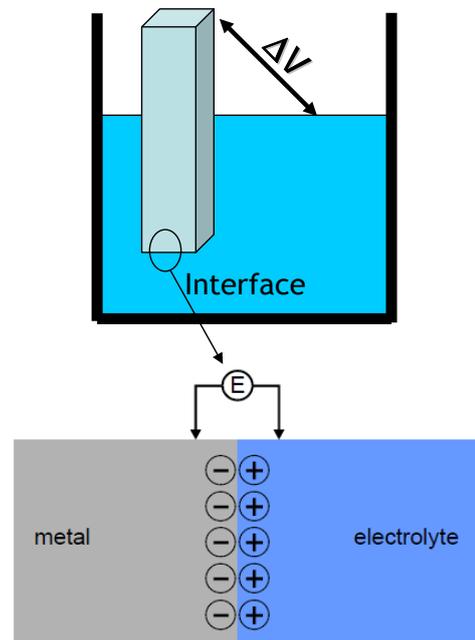


**Eletrodo:**  
Condutor metálico (por exemplo uma barra de aço) dentro de um eletrólito

# ELETROQUÍMICA - DEFINIÇÕES

## Potencial Eletroquímico

- O contato entre um eletrodo e um eletrólito gera uma diferença de potencial (tensão) entre ambos.
- Se deve à presença de cargas opostas no metal e no eletrólito.
- O valor depende do material e do meio.

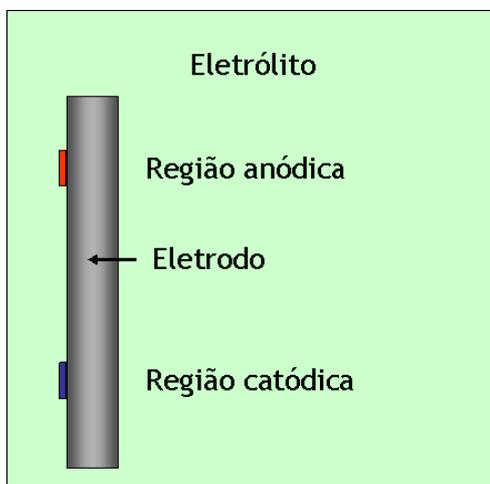


# ELETROQUÍMICA - DEFINIÇÕES

## Potencial Natural ou Potencial de Corrosão

- É o potencial eletroquímico que surge naturalmente entre o eletrodo e o eletrólito. Depende do seguinte:
  - Heterogeneidade do material: composição química, concentração de tensões, variações de temperatura, formato, etc.
  - Heterogeneidade do meio: composição química, pH, teor de oxigênio, temperatura, pressão, resistividade elétrica, presença de microorganismos, etc.
- O potencial natural não é uniforme ao longo do eletrólito, gerando áreas anódicas e catódicas.

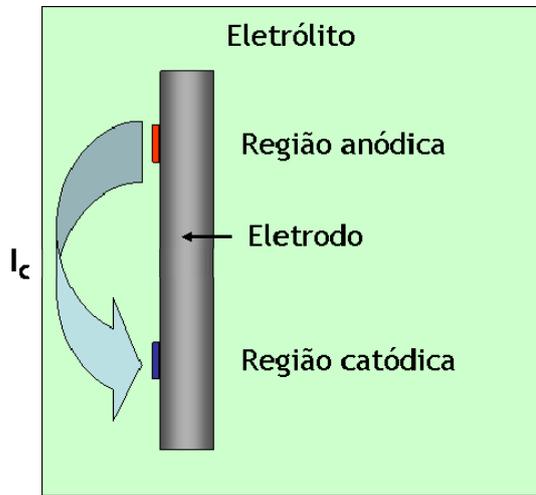
# ELETROQUÍMICA - DEFINIÇÕES



**Região anódica:**  
Área do eletrodo aonde ocorre a oxidação.

**Região catódica:** Área do eletrodo aonde ocorre a redução.

# CORROSÃO ELETROQUÍMICA

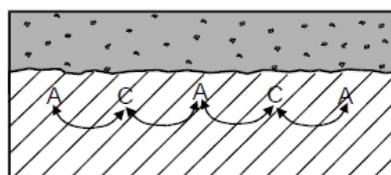


$I_c$ : Corrente de corrosão

A corrosão eletroquímica ocorre em eletrodos aonde há a formação de anodos e catodos (pilha), entre as quais há a circulação de uma corrente.

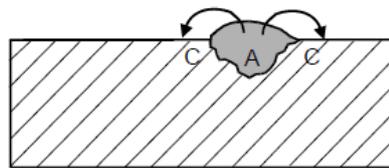
## TIPOS DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA MAIS COMUNS

Corrosão uniforme: Anodos e catodos mudam de posição, resultando em uma perda de metal generalizada. Ex.: corrosão atmosférica.



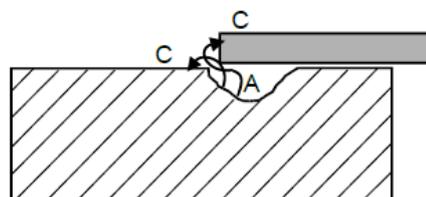
## TIPOS DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA MAIS COMUNS

Corrosão alveolar (ou *pitting*): O anodo permanece fixo em um ponto e a corrosão é localizada. Ex.: aço inox na presença de cloretos.



## TIPOS DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA MAIS COMUNS

Corrosão por fresta: A área anódica próxima à fresta recebe pouco oxigênio em comparação com as áreas catódicas. Ex.: chapas sobrepostas em um tanque.



## TIPOS DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA MAIS COMUNS

Corrosão galvânica: Metais diferentes conectados e expostos ao mesmo meio.  
Ex.: tubulações residenciais.



## COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

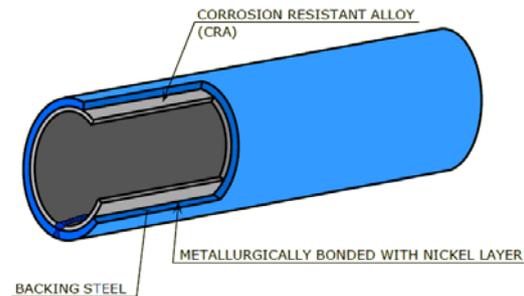
- Métodos de combate à corrosão eletroquímica:
  - Ligas metálicas especiais resistentes à corrosão;
  - Revestimentos protetores;
  - Inibidores de corrosão;
  - Proteção Catódica.

## COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

### Ligas metálicas especiais resistentes à corrosão



Tubos de aço inox 316L



“Liner” de liga resistente à corrosão

## COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

### Revestimentos protetores

- Orgânicos:
  - Tintas;
  - Elastômeros;
  - Polímeros.
- Inorgânicos:
  - Cerâmicos;
  - Metálicos.



# COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

## Inibidores de corrosão

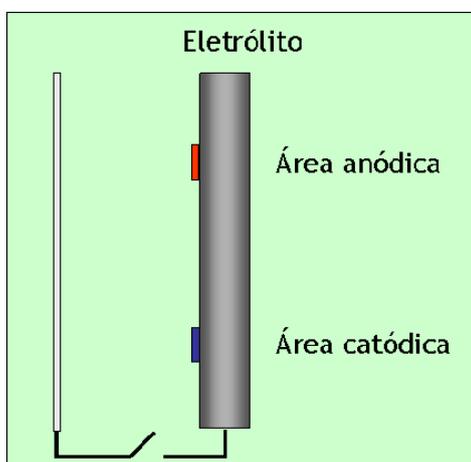
São substâncias químicas que em determinadas condições eliminam ou reduzem significativamente o processo corrosivo.



Utilizados na operação da instalação!

# COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

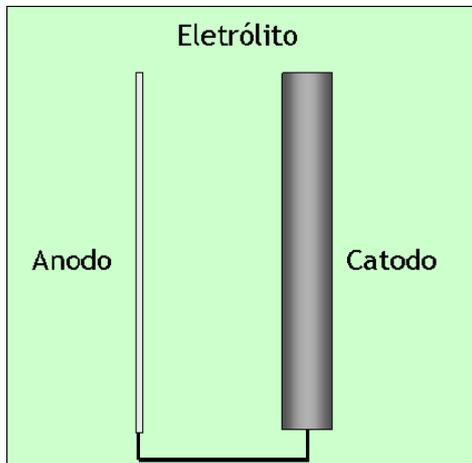
## Proteção Catódica



Aplicação direta da teoria da corrosão galvânica: interligar ao eletrodo uma outra barra, composta por um metal “mais corrosivo” ou “menos nobre”

# COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

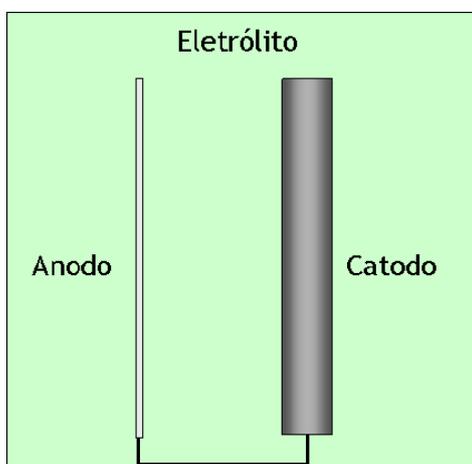
## Proteção Catódica



A barra composta pelo material mais corrosivo passa a se comportar como anodo, enquanto a outra passa a ser o catodo.

# COMBATE À CORROSÃO ELETROQUÍMICA

## Condições para existir Proteção Catódica:



- O anodo e o catodo devem estar dentro do mesmo meio;
- O meio deve ser condutor iônico (eletrólito);
- Existência de uma ligação elétrica entre o anodo e o catodo.

## DEFINIÇÃO DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Proteção catódica é uma técnica para reduzir a corrosão eletroquímica de uma estrutura metálica enterrada ou submersa fazendo com que esta superfície se comporte como o catodo de uma pilha, através da aplicação de uma corrente contínua com intensidade suficiente.

## CURIOSIDADES

A Proteção Catódica repõe o material corroído?



## CURIOSIDADES

A Proteção Catódica protege estruturas da corrosão atmosférica?



## CURIOSIDADES

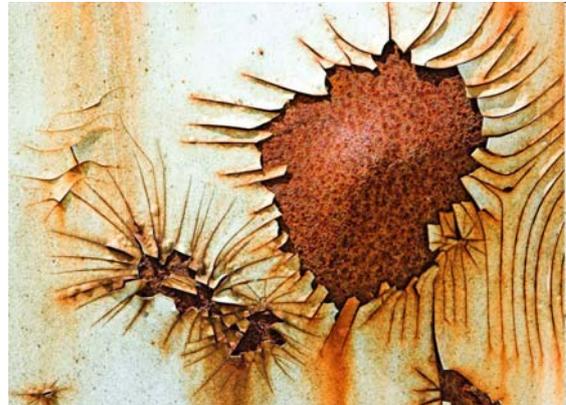
A corrosão atmosférica, embora seja um tipo de corrosão eletroquímica, não pode ser protegida por meio de um sistema de Proteção Catódica tradicional. Mas pode-se usar um revestimento metálico de sacrifício ou um revestimento por barreira.

A atmosfera não é um eletrólito pois não conduz eletricidade em condições normais.

## CURIOSIDADES

A intensidade da corrosão atmosférica depende principalmente:

- Umidade relativa do ar;
- Presença de sais em suspensão;
- Presença de gases poluentes (principalmente enxofre).



Cuidado com falhas no revestimento!

## CURIOSIDADES - HISTÓRIA



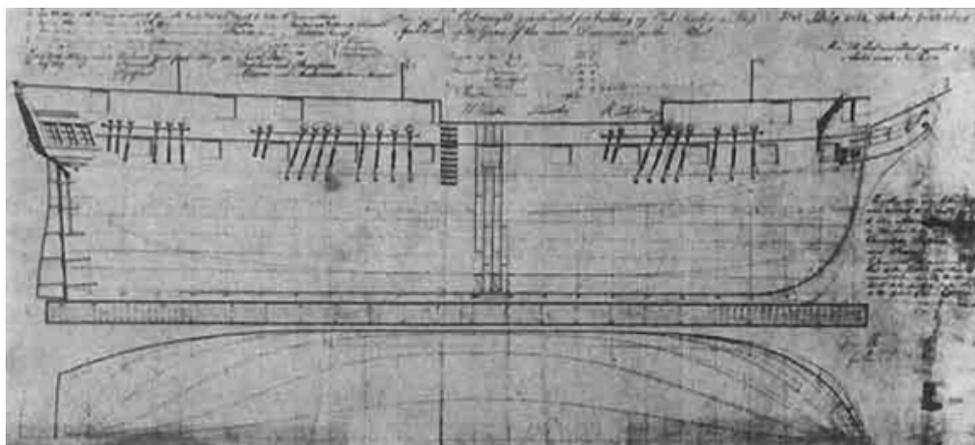
Modelo do “La Gloire” de 1858, primeiro couraçado oceânico da história protegido por chapas ferro de 4”

## HISTÓRIA

- Final do século XVIII: primeiras embarcações a utilizarem chapas metálicas para proteger o casco de madeira. Mas o metal em contato com a água do mar se corroía rapidamente.
- Início do século XIX: Primeiros passos da eletroquímica. Em 1823, *Sir Humphrey Davy*, contratado pela Marinha Britânica, apresentou os primeiros estudos que levam a aplicação de proteção catódica.

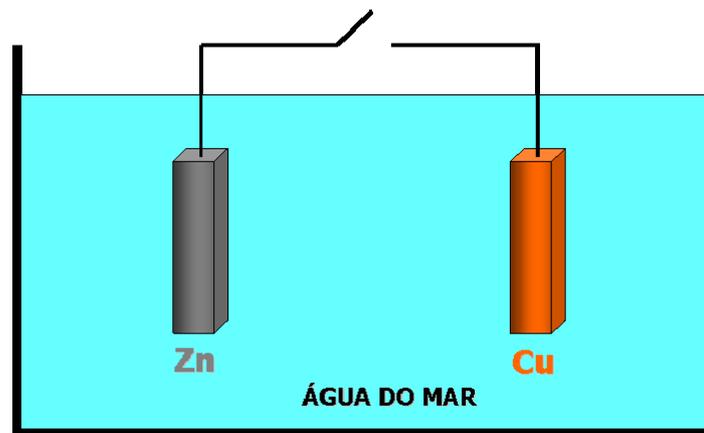
## HISTÓRIA

Este é o desenho do navio Sammarang, o primeiro navio a receber PC em 1824.



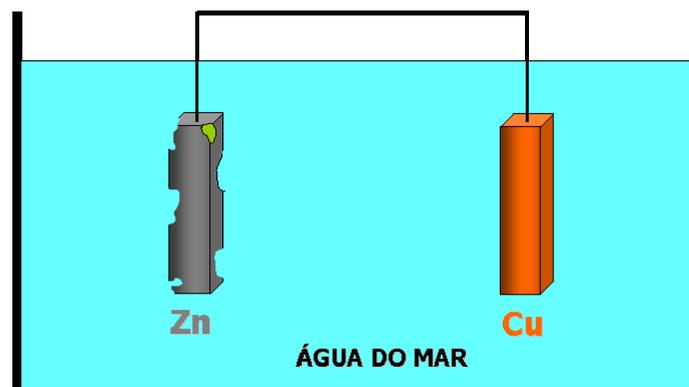
## HISTÓRIA

Em seus experimentos, *Sir Davy* interligou, em um mesmo recipiente com água do mar, diferentes metais, por exemplo cobre e zinco.



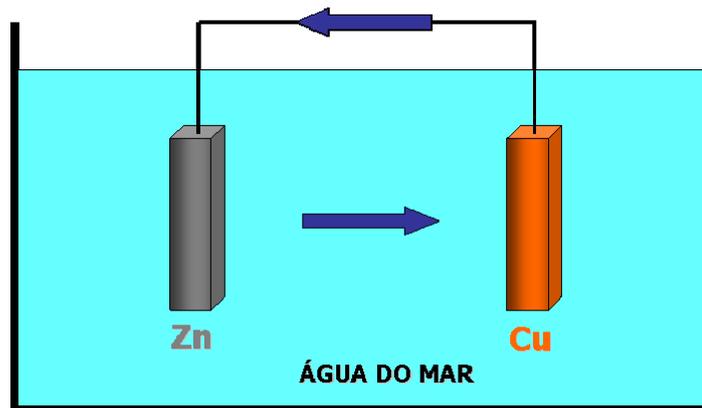
## HISTÓRIA

*Sir Davy* observou que o zinco evitava a corrosão do cobre. Concluiu que metais não-nobres são sacrificados em favor de metais nobres.



## HISTÓRIA

*Michael Faraday*, que era pupilo de Davy, em 1834 descobriu que existe uma relação entre a taxa de corrosão e a circulação de uma corrente elétrica entre as barras.



## HISTÓRIA

- O metal mais utilizado a partir do século XIX é o ferro, na forma de ligas de aço.
- Por muito tempo o zinco foi material empregado na PC de navios, porém, restrito a áreas críticas de corrosão: regiões vizinhas à hélice e a locais de admissão e descarga de águas.
- Qual o motivo de não usá-lo em todo o navio?

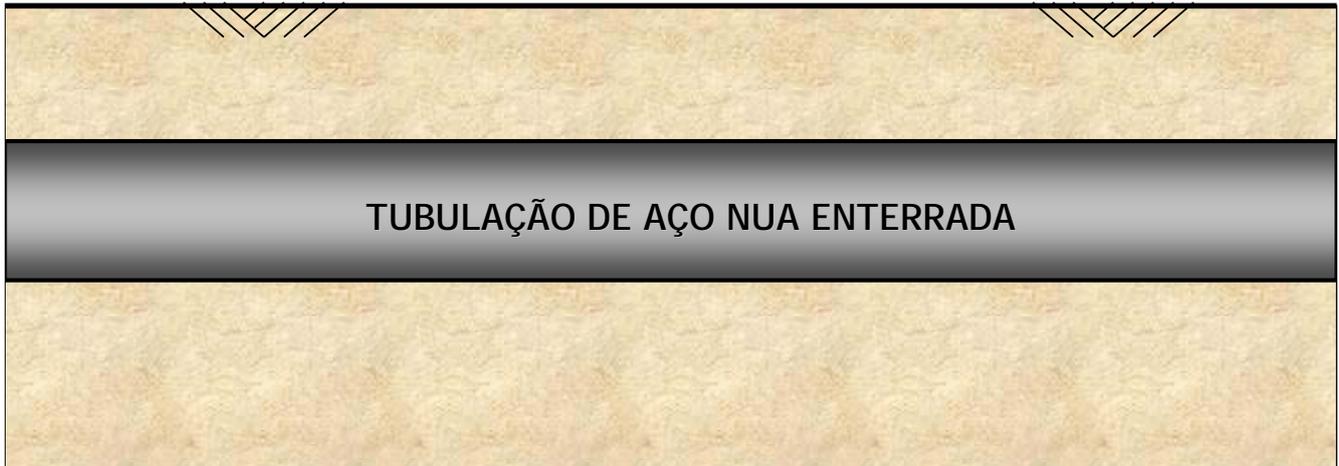




# HISTÓRIA

Com o desenvolvimento da indústria do petróleo (década de 1920) e o surgimento de longos oleodutos e gasodutos, surgem sérios problemas de corrosão.

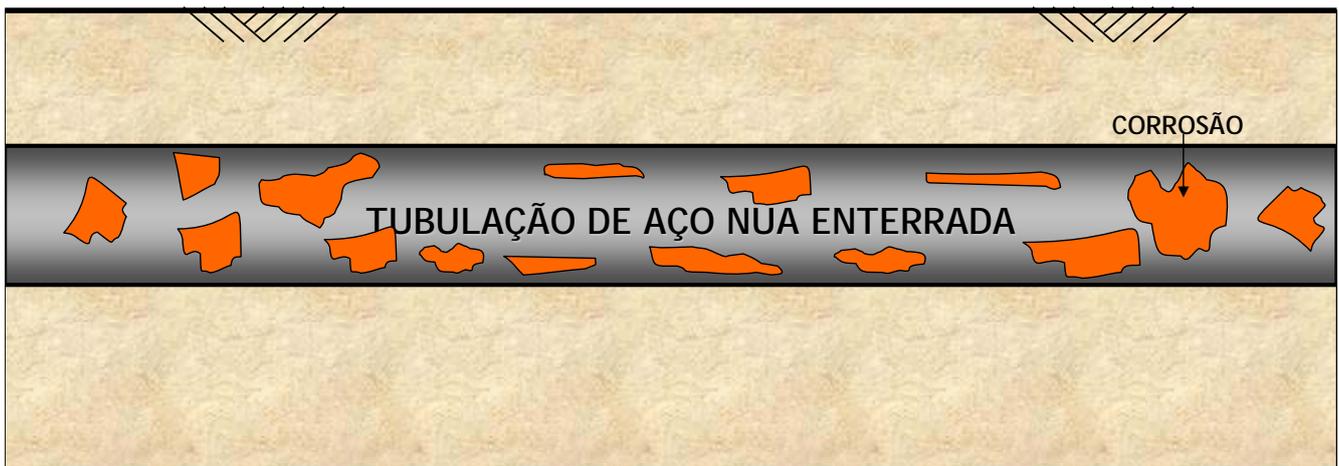
NÍVEL DO SOLO



# HISTÓRIA

Contato do aço com o solo (eletrólito):  
**CORROSÃO!**

NÍVEL DO SOLO



## HISTÓRIA

Solução encontrada a partir da década de 30:  
isolar o aço do solo (revestimento).

NÍVEL DO SOLO

**TUBULAÇÃO DE AÇO REVESTIDA ENTERRADA**

## HISTÓRIA

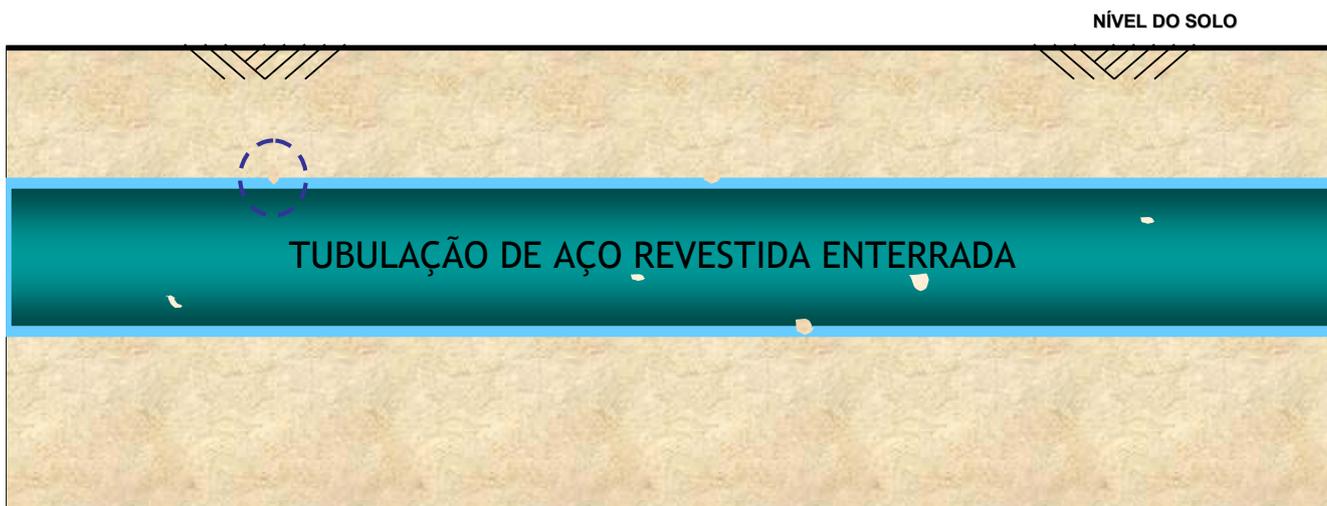
Aplicação de betume em uma fábrica de dutos  
em Düsseldorf, Alemanha (1935)





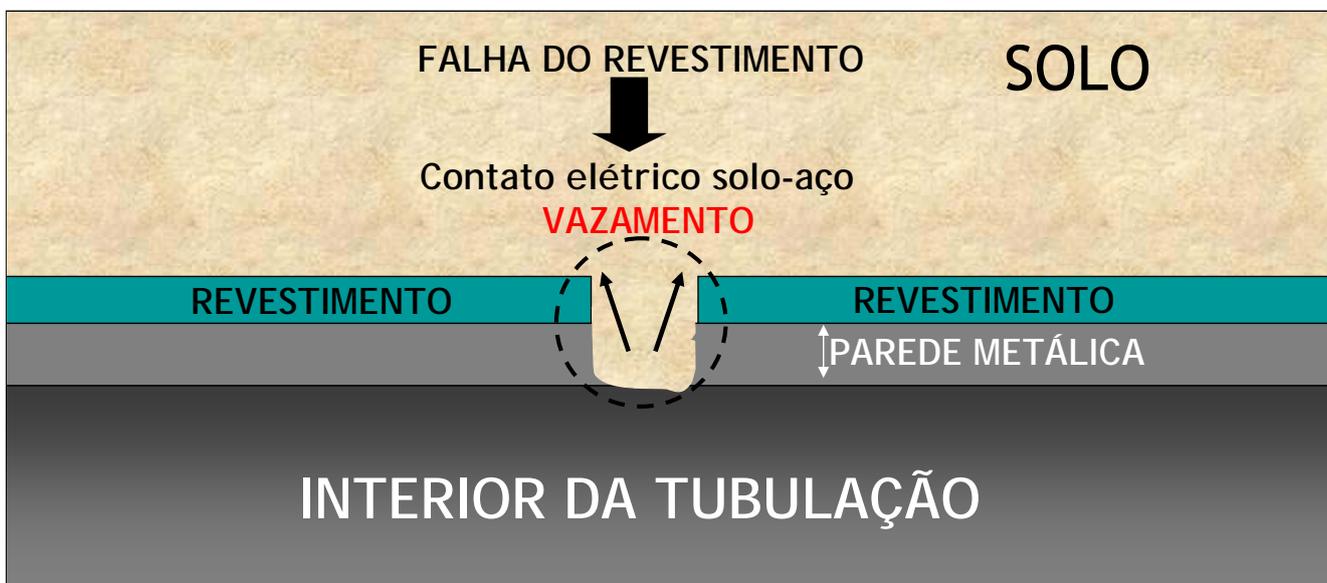
# HISTÓRIA

Porém, por mais cuidado que se tenha, o revestimento possui FALHAS...



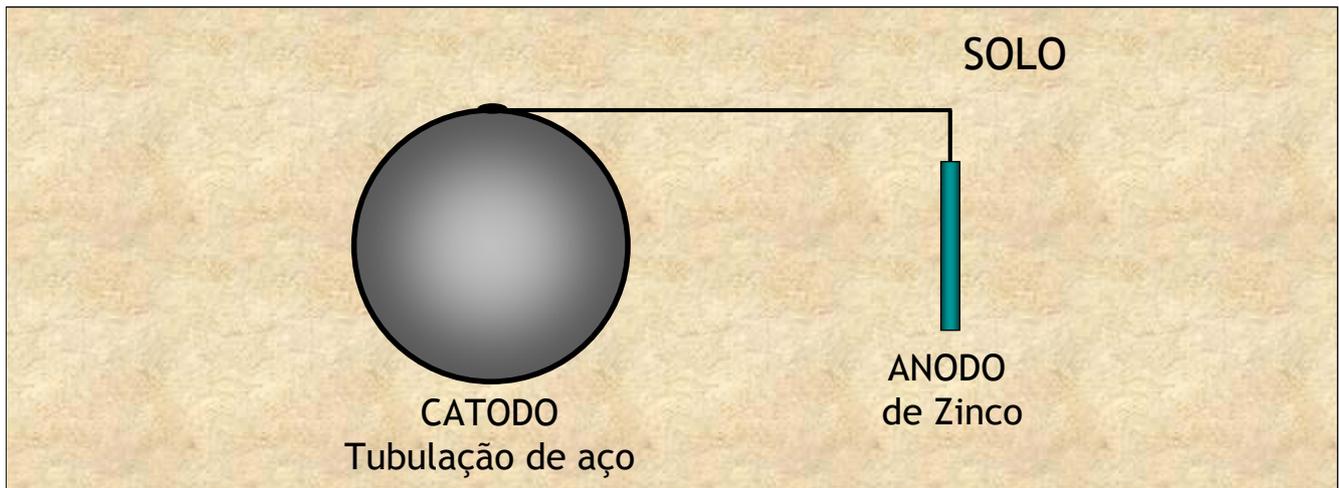
# HISTÓRIA

O revestimento reduz, mas não elimina o problema



## HISTÓRIA

Surgiu então a idéia de usar proteção catódica para COMPLEMENTAR a cobertura oferecida pelo revestimento anticorrosivo!



## HISTÓRIA

1º projeto de Proteção Catódica no Brasil



1966 - Píer de São Sebastião

# HISTÓRIA

## 1º duto com Proteção Catódica no Brasil



1967 - ORBEL I

Interferências elétricas: antes da implantação da PC,  
eram encontradas 5 falhas por mês no oleoduto!

# CONCEITOS DE ELETRICIDADE

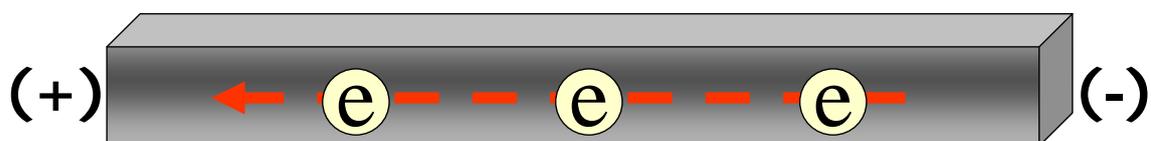


## DEFINIÇÕES

- Tensão "E" (V - volt)
  - É a diferença de potencial elétrico entre dois pontos.
- Corrente "I" (A - àmpere)
  - Fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica (*íons ou elétrons*).
- Resistência "R" ( $\Omega$  - ohm)
  - Capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem de corrente elétrica.

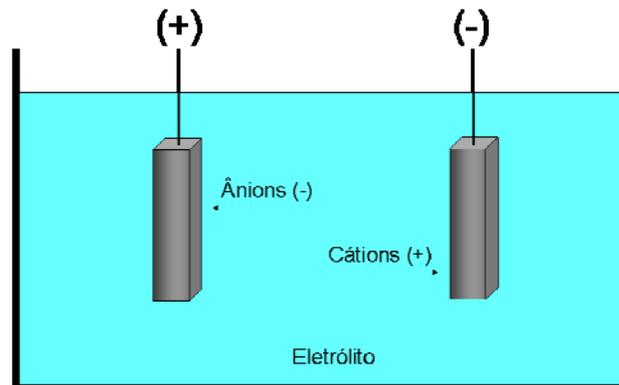
## CORRENTE ELÉTRICA REAL

Nos metais existe grande quantidade de elétrons livres. Quando submetidos à uma tensão elétrica os elétrons passam a ser ordenados em direção ao maior potencial.



## CORRENTE ELÉTRICA REAL

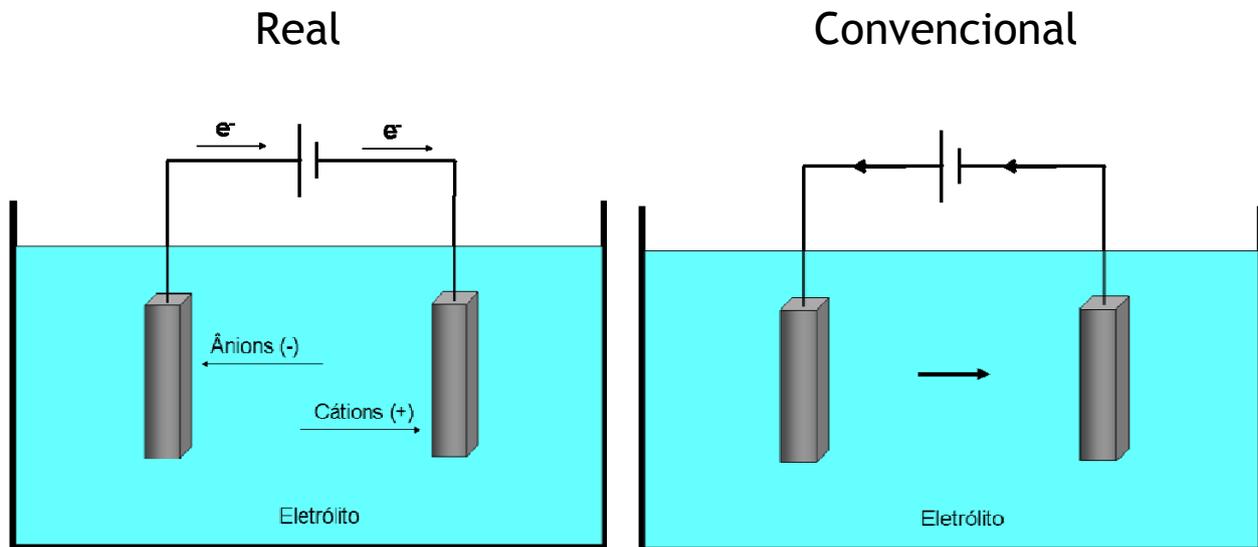
Quando uma solução eletrolítica é submetida à uma tensão elétrica, os cátions passam a ser ordenados em direção ao menor potencial e os ânions, ao maior potencial.



## CORRENTE ELÉTRICA CONVENCIONAL

- No início da história da eletricidade, assumiu-se erroneamente que a corrente no condutor era produzida pelo movimento de elétrons do potencial positivo para o negativo.
- Essa suposição continua a ser utilizada até os dias de hoje e é chamado “sentido convencional da corrente”.

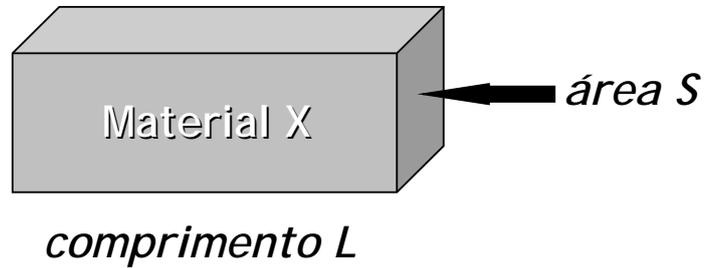
## CORRENTE ELÉTRICA REAL x CONVENCIONAL



## RESISTIVIDADE ELÉTRICA

- Característica intrínseca de um material. Quanto mais baixa for a resistividade mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica.
- Unidade SI: ohm metro ( $\Omega.m$ )
- Unidade PC: ohm centímetro ( $\Omega.cm$ )

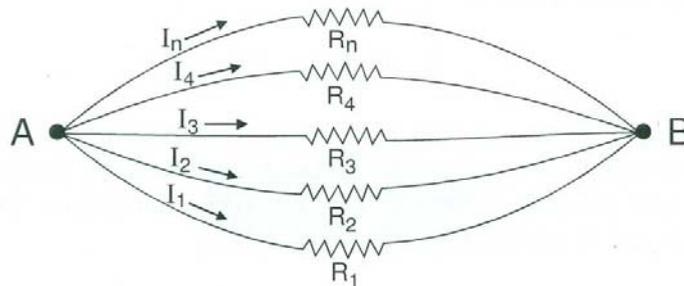
## RESISTIVIDADE x RESISTÊNCIA



$$R_x [\Omega] = \rho_x [\Omega m] \times \frac{L[m]}{S[m^2]}$$

## RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM ELETRÓLITOS

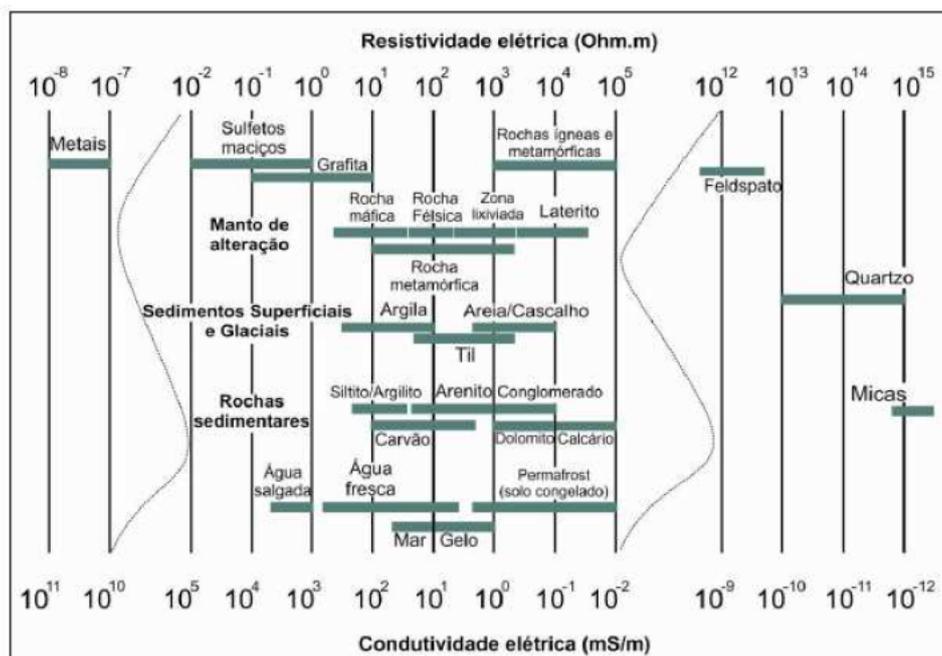
Em um meio condutor iônico (solo ou água do mar, por exemplo), a corrente não é confinada e se divide em vários caminhos paralelos.



## RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM ELETRÓLITOS

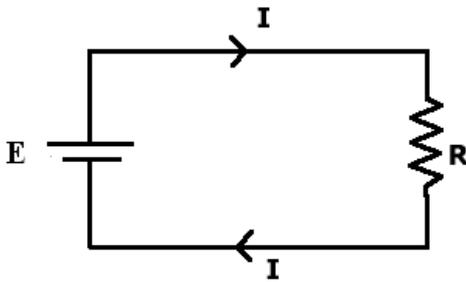
- A natureza e a quantidade de sais, juntamente com o teor de água (umidade) do eletrólito, determinam a sua capacidade de conduzir corrente elétrica.
- Quanto maior for a capacidade do meio conduzir corrente elétrica (resistividade mais baixa), maior será sua corrosividade!

## RESISTIVIDADES TÍPICAS



## CIRCUITO ELÉTRICO

- É a ligação de elementos elétricos de modo que formem um caminho fechado para a corrente elétrica.

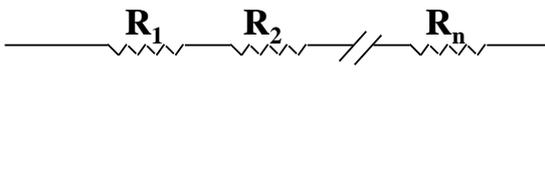


LEI DE OHM:

$$I_{[A]} = \frac{E_{[V]}}{R_{[\Omega]}}$$

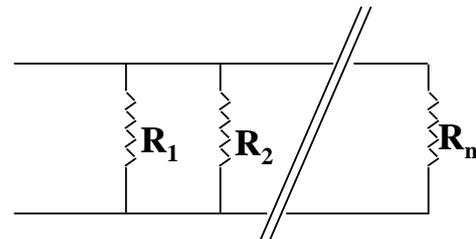
## RESISTÊNCIAS SÉRIE E PARALELO

Resistências em SÉRIE



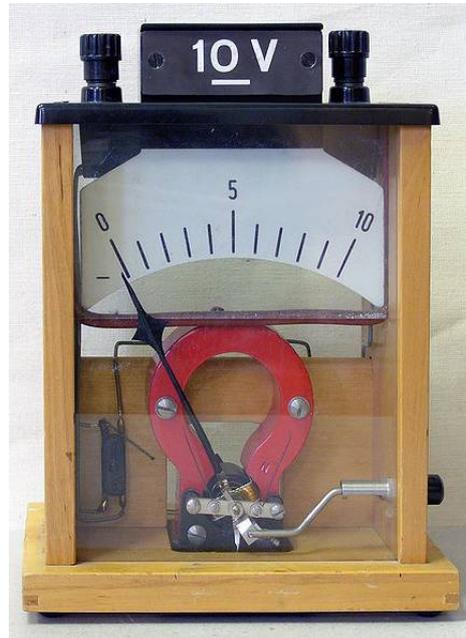
$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Resistências em PARALELO



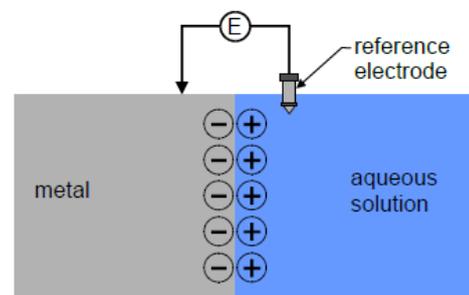
$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

# POTENCIAL ELETROQUÍMICO



## MEDIÇÃO DO POTENCIAL ELETROQUÍMICO

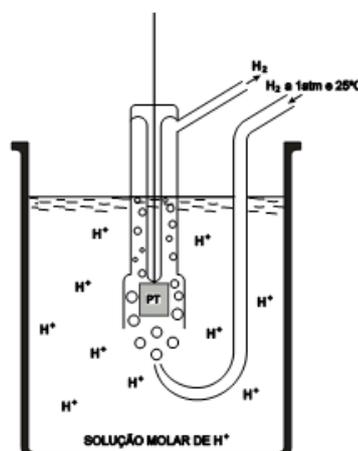
- É impossível medir diretamente o potencial eletroquímico entre o eletrodo e o eletrólito.
- Deve-se comparar o potencial do eletrodo a ser medido ao de outro eletrodo, de referência. Este eletrodo precisa ser o mais estável possível.



O potencial do eletrodo de referência é sempre arbitrado como NULO.

## ELETRODO PADRÃO DE HIDROGÊNIO

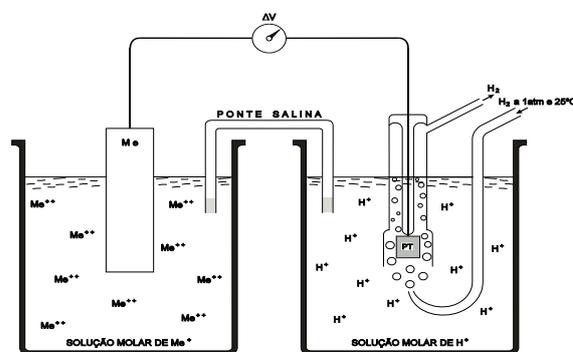
O Eletrodo de Referência de Hidrogênio (*Standard Hydrogen Electrode - SHE*) é composto de um fio ou placa de platina submersa em uma solução molar de íons de hidrogênio. A platina é um metal inerte e adsorve (retém) o hidrogênio que é borbulhado sobre ela.



## ELETRODO PADRÃO DE HIDROGÊNIO

O *Eletrodo Padrão de Hidrogênio* é usado para determinar os POTENCIAIS DE REDUÇÃO de outros metais.

Para se determinar os valores padrões de potencial, é necessário controlar todas as variáveis envolvidas (temperatura, pressão, soluções).

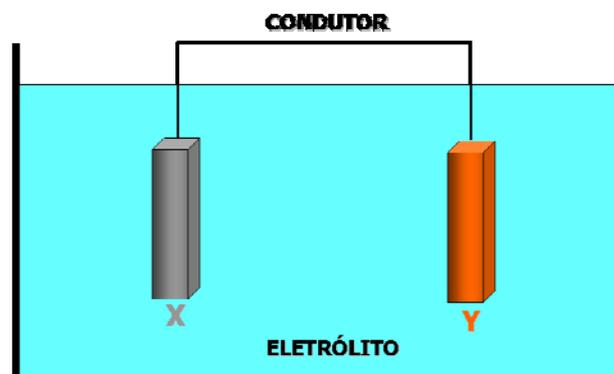


# POTENCIAS DE REDUÇÃO ( $V_{SHE}$ )

Reação de Eletrodo	Potencial $E_0$ (volts)
$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	- 2,34
$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	- 1,67
$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	- 1,03
$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	- 0,76
$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	- 0,44
$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	- 0,13
$2H^+ + e \rightleftharpoons H_2$	0,00
$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	0,34
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0,80

Quanto mais negativo o potencial do eletrodo, maior a tendência ao elemento ser oxidado.

## EXERCÍCIO



Qual material será corroído?

X - Ferro

Y - Magnésio

X - Chumbo

Y - Cobre

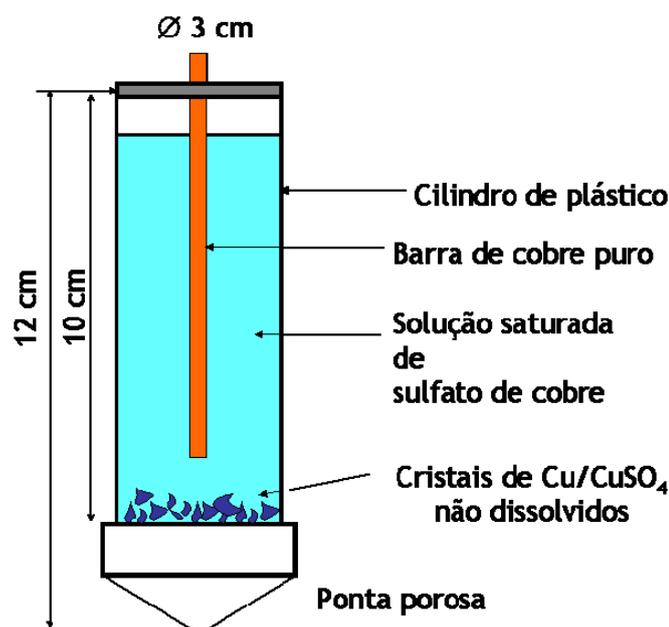
X - Ferro

Y - Chumbo

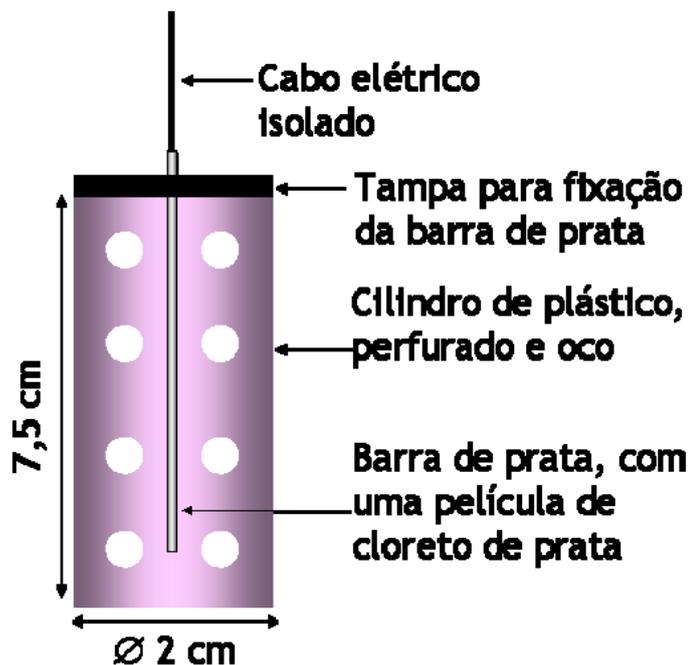
## ELETRODOS DE REFERÊNCIA PORTÁTEIS

- Para trabalhos de campo, é comum a utilização de eletrodos de referência diferentes do hidrogênio.
- Em Proteção Catódica, são normalmente empregados:
  - Cobre/Sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ );
  - Prata/Cloreto de prata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ );
  - Zinco ( $\text{Zn}$ ).
- Eletrodo de referência também é conhecido como semi-célula.

### $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$



## Ag/AgCl



## COMPARAÇÃO ENTRE SEMI-CÉLULAS

Referência	Potencial (V/SHE) @25°C	Coefficiente de Temperatura (mV/°C)	Uso Típico
Cu/CuSO <sub>4</sub>	+0,316	0,9	Solos, água doce
Ag/AgCl	+0,266	-0,33	Água do mar
Zn	-0,80 ± 0,1	---	Água do mar, solos

Correção de temperatura:

$$E_t = E_{25^\circ\text{C}} + k_t(t - 25^\circ\text{C})$$

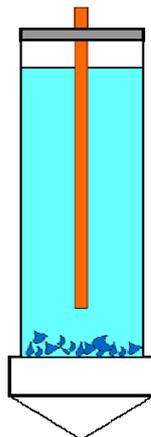
# MEDIÇÃO DO POTENCIAL



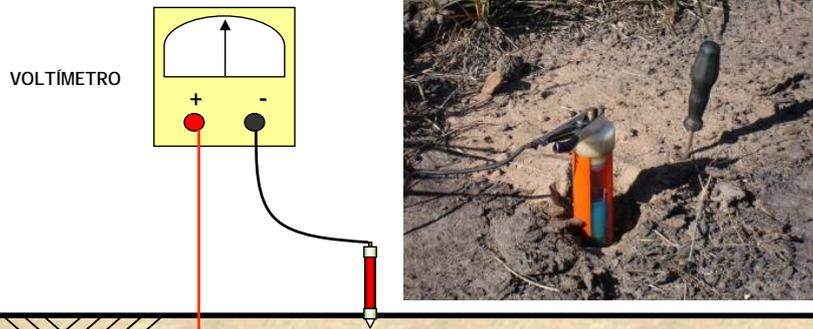
Multímetro  
Função:  
Voltímetro *cc*

# MEDIÇÃO DO POTENCIAL NO SOLO

Semicélula ou eletrodo  
de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$



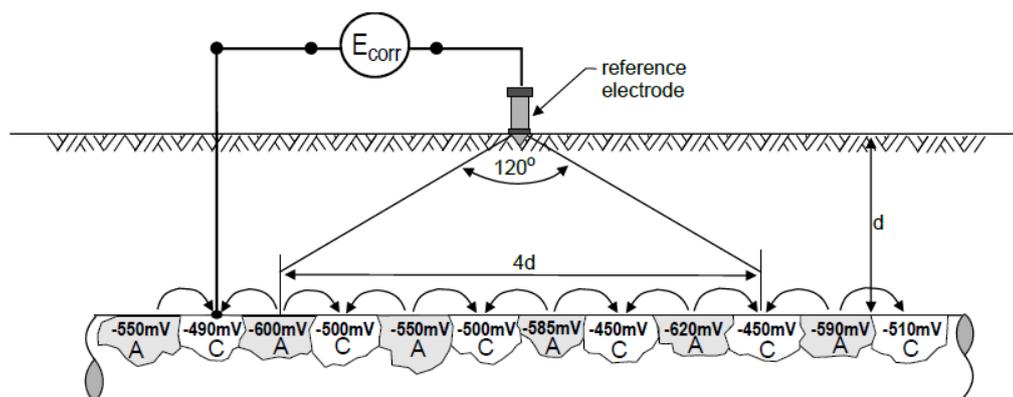
# MEDIÇÃO DO POTENCIAL NO SOLO



Convenção de polaridade:  
 Terminal positivo → estrutura  
 Terminal negativo → semicélula

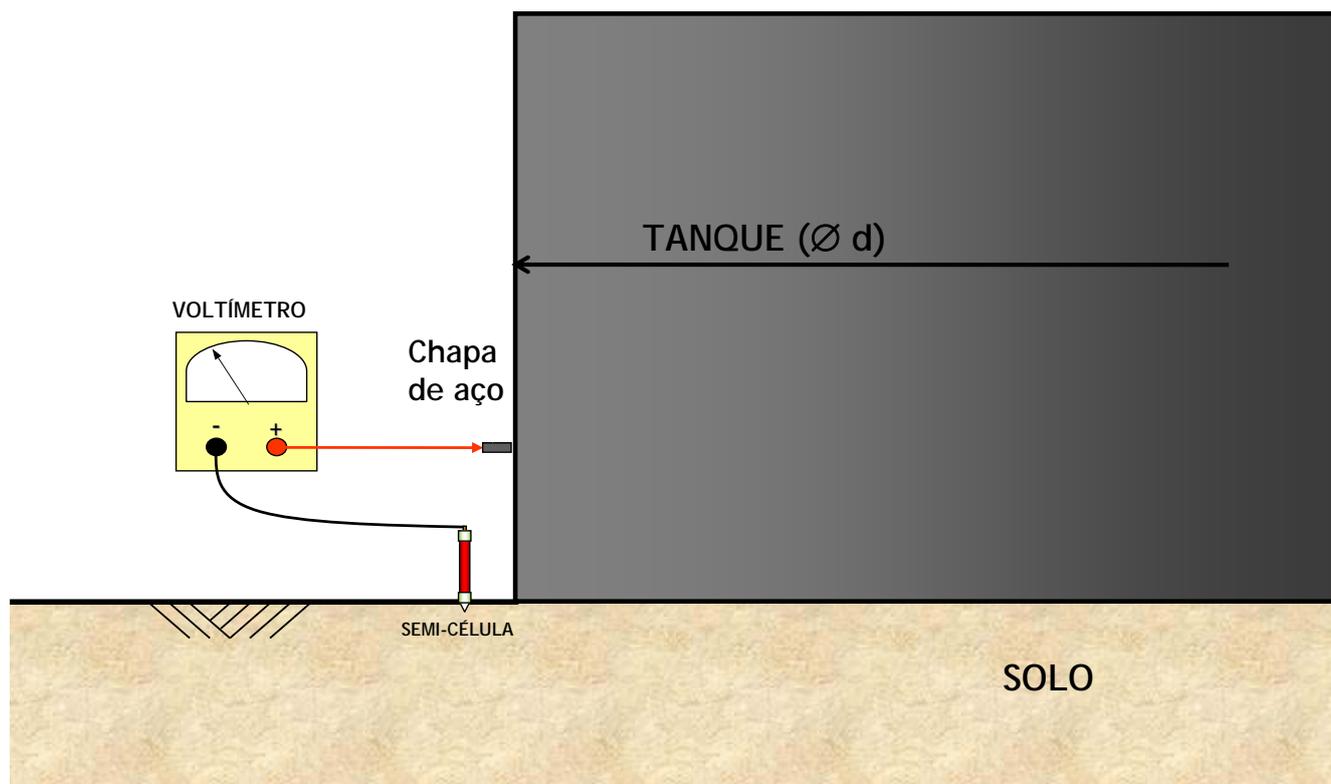
Tubulação enterrada

# MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO



Measurement of Corrosion Potential (Mixed Potential)

# MEDIÇÃO DO POTENCIAL NO SOLO

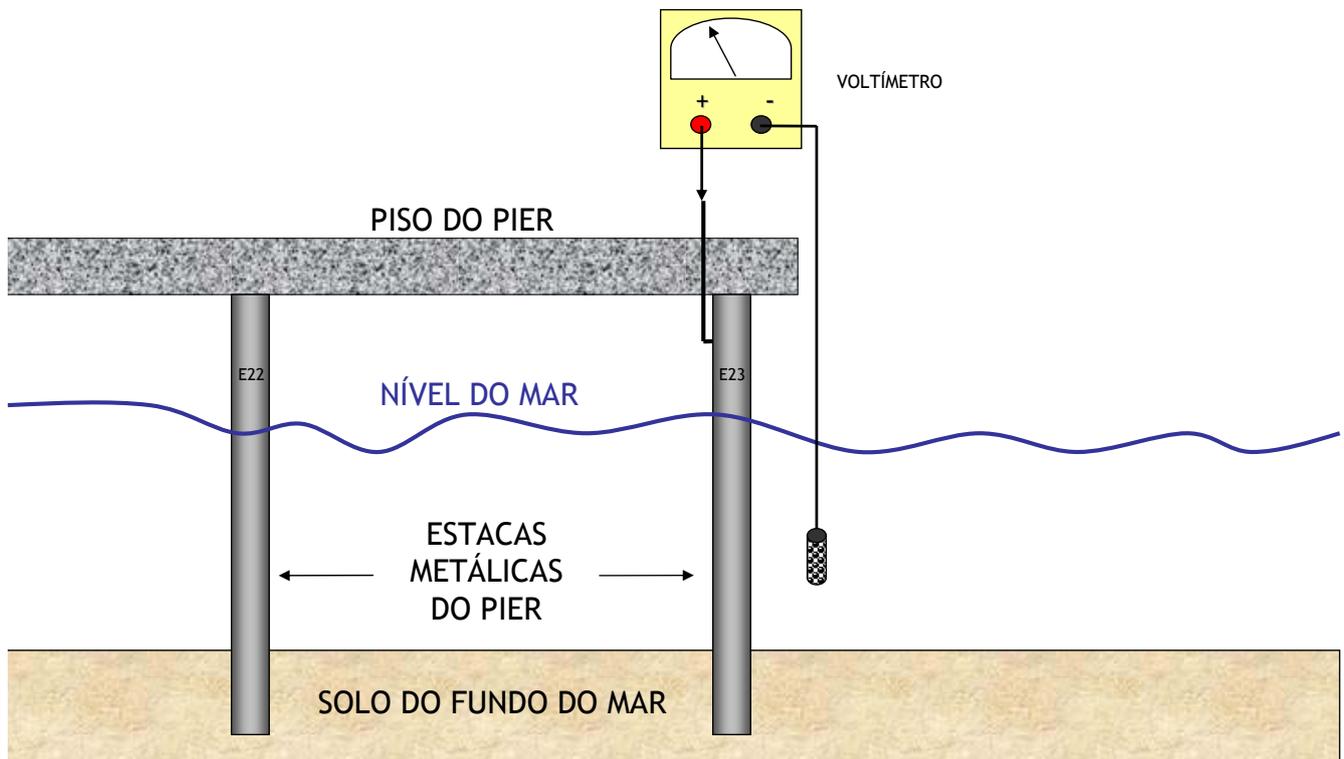


# MEDIÇÃO DO POTENCIAL NA ÁGUA DO MAR

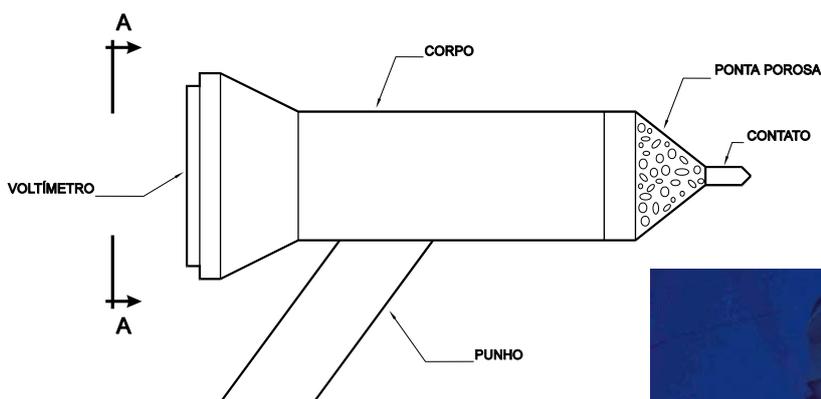
Semicélula ou  
eletrodo de  
Ag/AgCl



# MEDIÇÃO DO POTENCIAL NA ÁGUA DO MAR



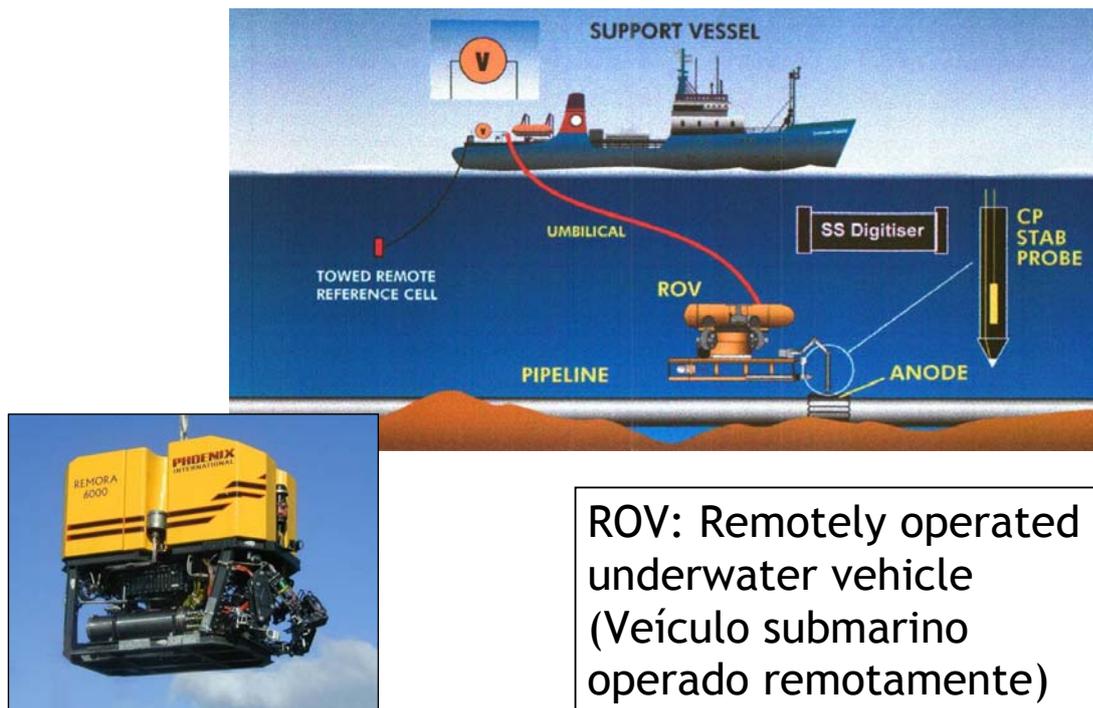
# MEDIÇÃO DO POTENCIAL NA ÁGUA DO MAR



**BATHYCORROMETER**  
 Medição de potencial  
 de uma estrutura  
 metálica submersa



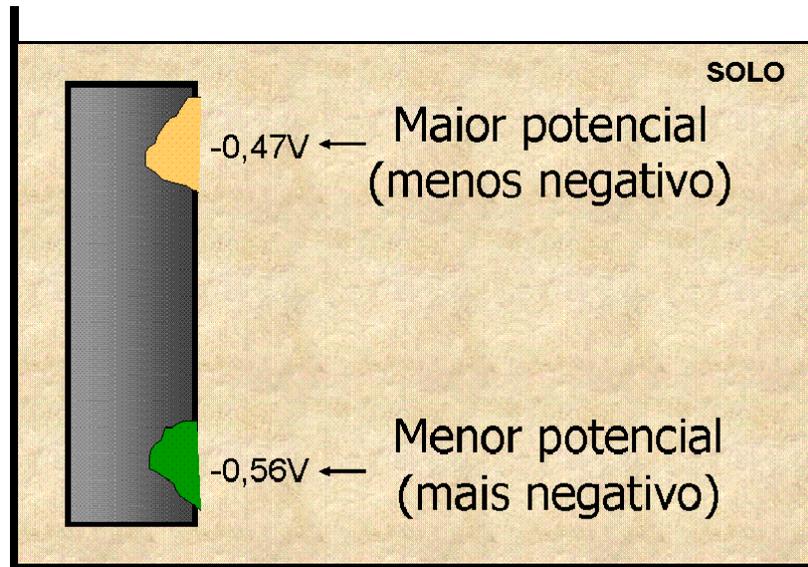
## MEDIÇÃO DO POTENCIAL NA ÁGUA DO MAR



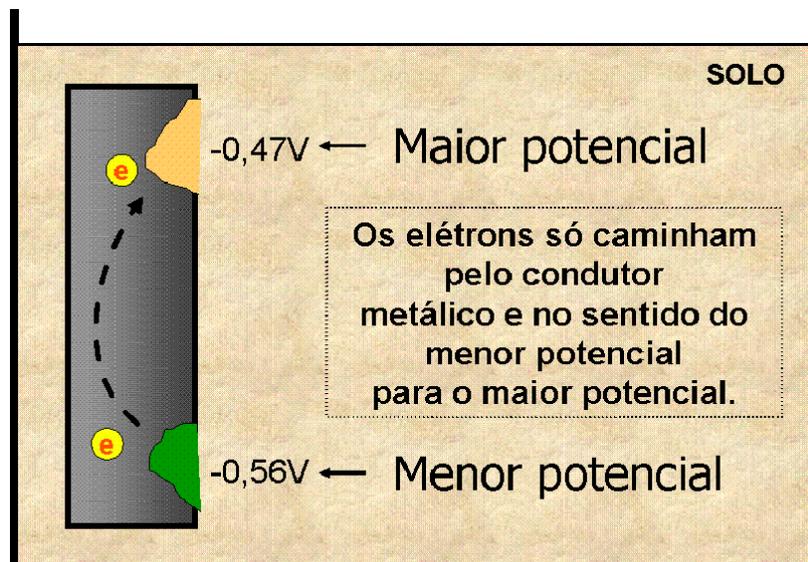
## MECANISMO DA CORROSÃO



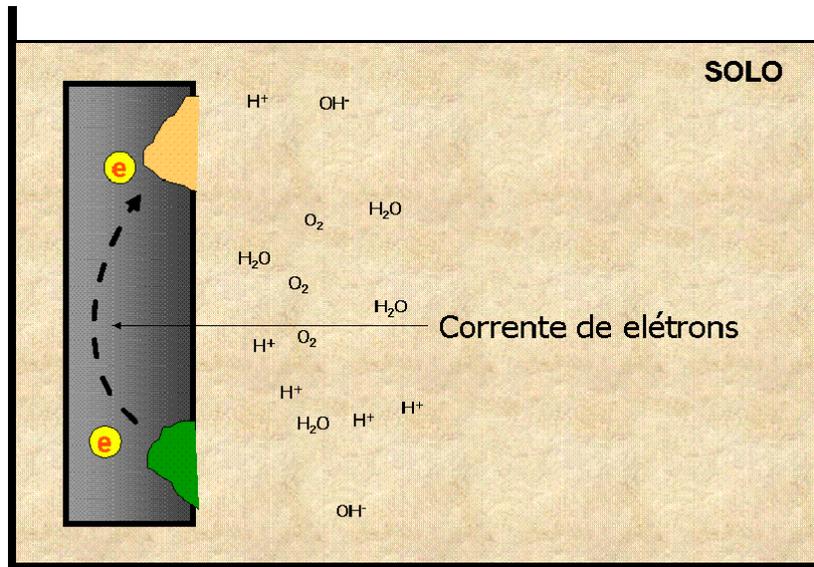
# MECANISMO DA CORROSÃO



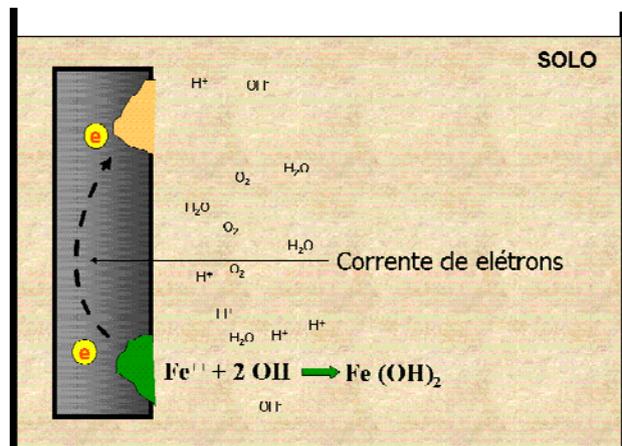
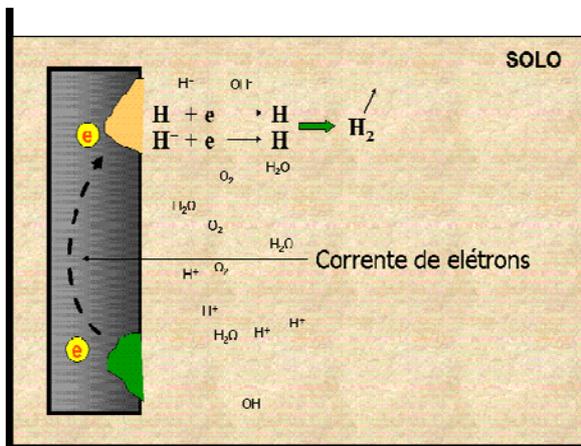
# MECANISMO DA CORROSÃO



# MECANISMO DA CORROSÃO

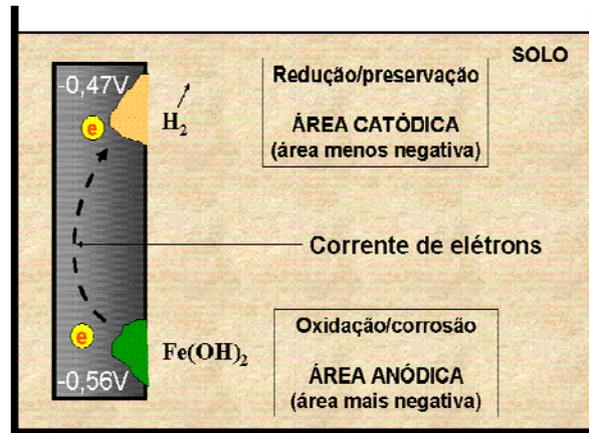
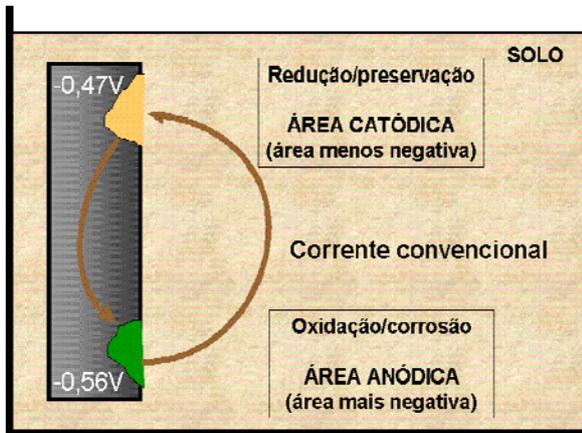


# MECANISMO DA CORROSÃO



Em qual superfície o ferro participou da reação?

# MECANISMO DA CORROSÃO



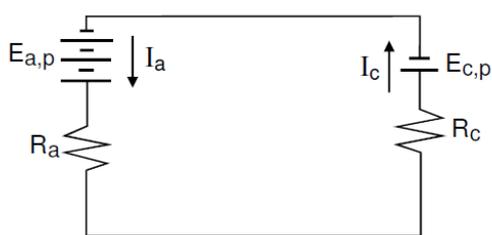
# MECANISMO DA CORROSÃO



## MECANISMO DA CORROSÃO

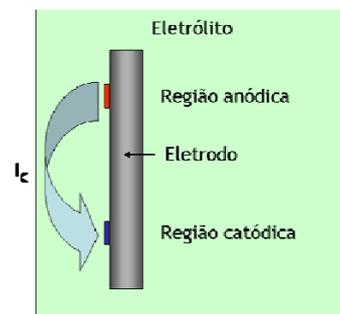
- Na prática, podemos investigar se há corrosão eletroquímica analisando duas grandezas:
  - POTENCIAL ELETROQUÍMICO (critério de proteção): corrosão ocorre na região mais negativa do metal;
  - CORRENTE ELÉTRICA (corrosão eletrolítica): corrosão ocorre na região aonde a corrente convencional sai para o eletrólito.

## REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA DE UMA CÉLULA DE CORROSÃO



$$I_a = I_c = I_{\text{corr}}$$

$$I_{\text{corr}} = \frac{E_{a,p} - E_{c,p}}{R_a + R_c}$$



$I_c$ : Corrente de corrosão

Onde:

$I_a$ : Corrente do anodo;

$I_c$ : Corrente do catodo;

$I_{\text{corr}}$ : Corrente de corrosão;

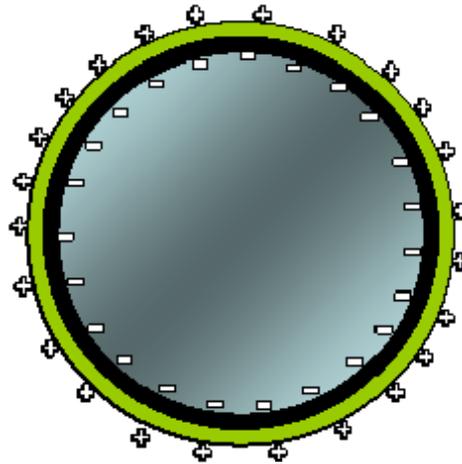
$E_{a,p}$ : Potencial do anodo;

$E_{c,p}$ : Potencial do catodo;

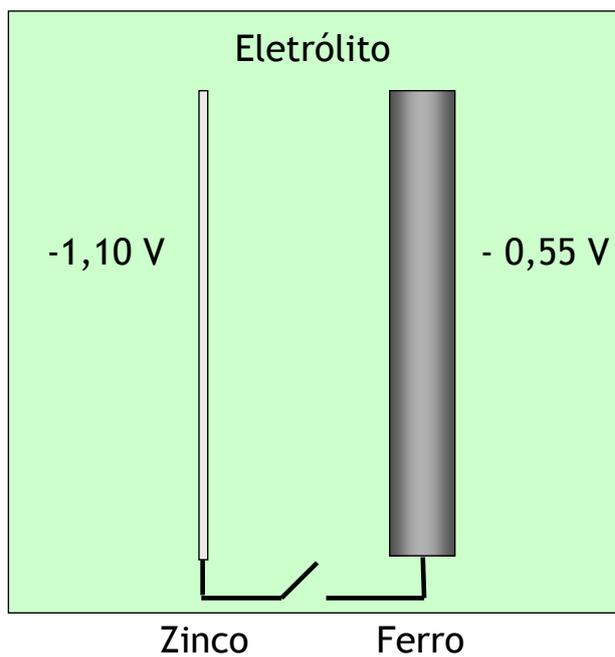
$R_a$ : Resistência anodo/eletrólito;

$R_c$ : Resistência catodo/eletrólito.

# POLARIZAÇÃO

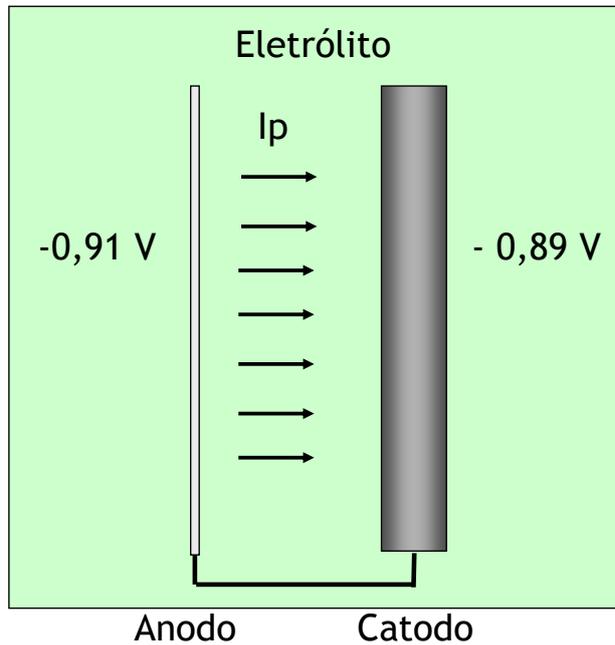


# POLARIZAÇÃO



Quando a chave é fechada, ocorre um reequilíbrio entre os potenciais, que tendem a convergir para um mesmo valor.

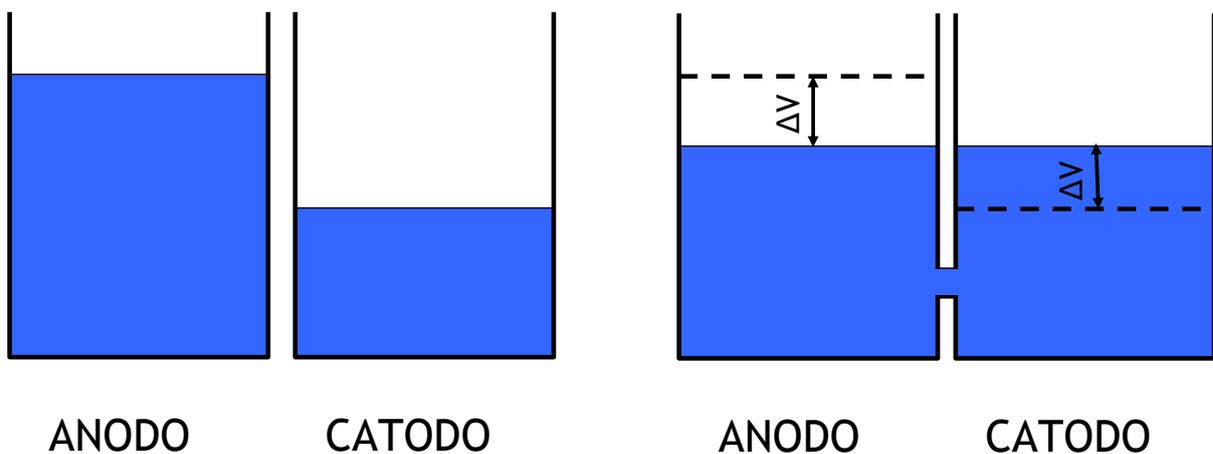
# POLARIZAÇÃO



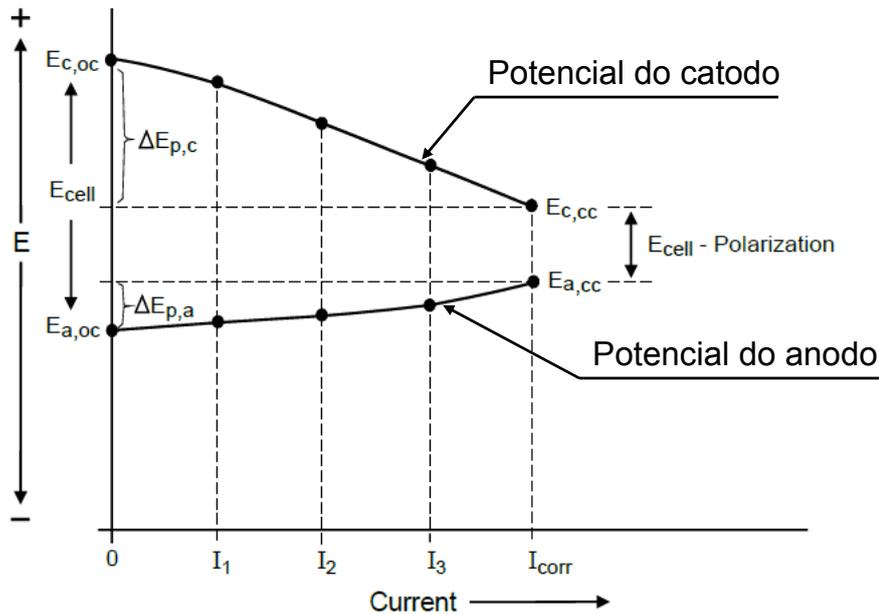
Este fenômeno é a POLARIZAÇÃO, ou seja, a alteração do ponto de equilíbrio da estrutura devido a circulação de uma corrente pelo sistema.

# POLARIZAÇÃO

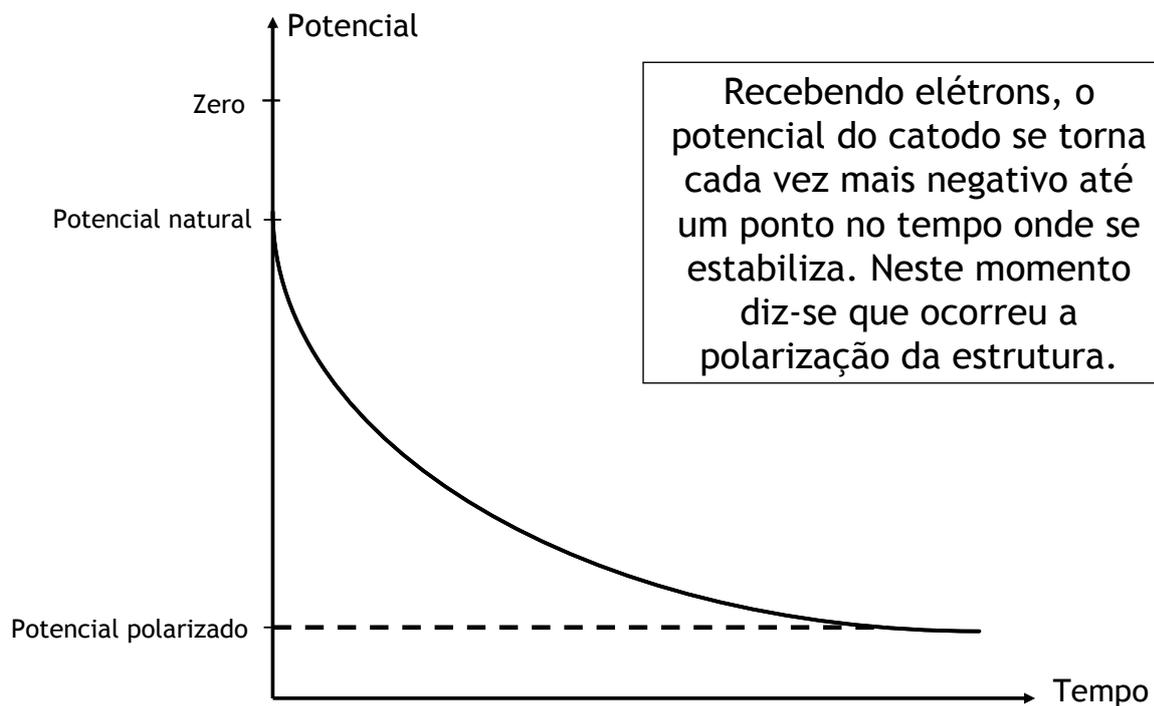
Analogia simples: vasos comunicantes



# POLARIZAÇÃO - DIAGRAMA DE EVANS



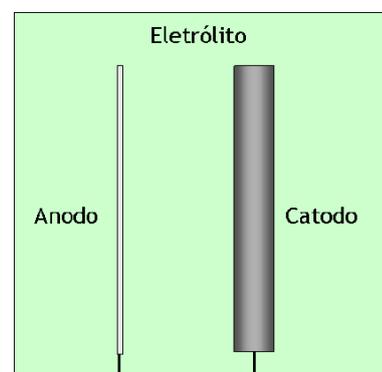
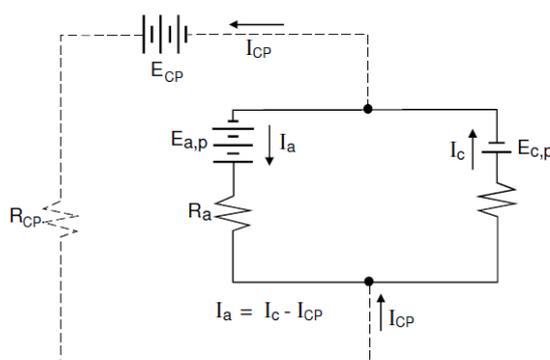
# POLARIZAÇÃO DO CATODO x TEMPO



## TEMPO DE POLARIZAÇÃO DO CATODO

- A polarização necessita de tempo para se estabilizar. Neste tempo acontece:
  - Aumento da concentração de cargas elétricas na interface metal/eletrólito;
  - Mudanças no meio (aumento do pH, movimentação iônica, formação de depósitos calcários).
- A polarização definitiva pode demorar semanas. Contudo as primeiras horas ou dias são as mais significativas, pois a polarização é uma função exponencial.

## REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA DA APLICAÇÃO DE PROTEÇÃO CATÓDICA



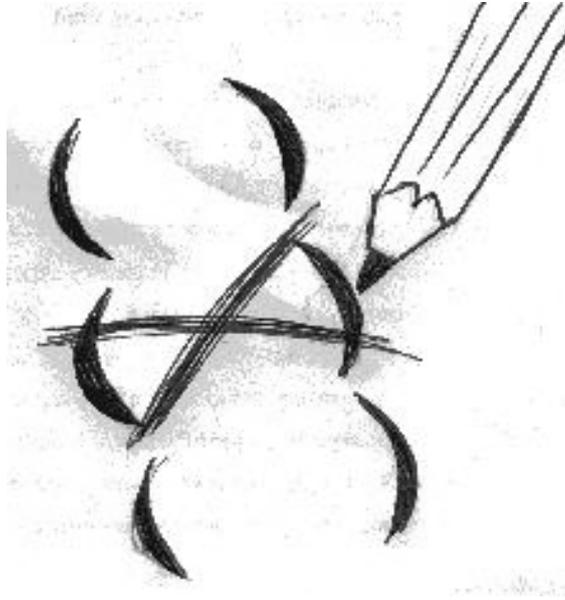
Onde:

$I_{cp}$ : Corrente de proteção catódica;

$E_{cp}$ : Potencial de proteção catódica (anodo);

$R_{cp}$ : Resistência de proteção catódica (anodo).

# CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA PARA O AÇO-CARBONO



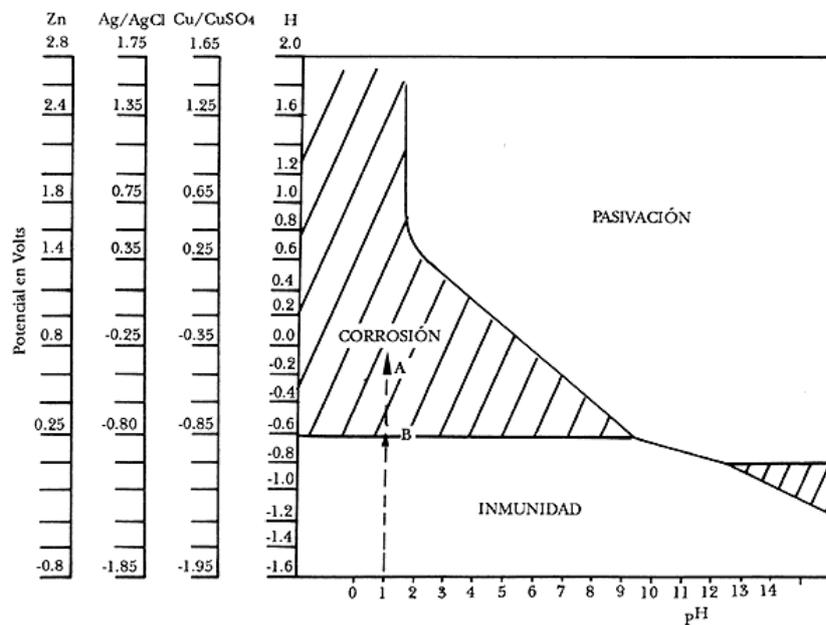
## CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

- Critério do potencial queda IR;  $\left. \begin{array}{l} -850\text{mV}/\text{CuCuSO}_4 \\ -800\text{mV}/\text{AgAgCl} \end{array} \right\}$ , livre da
- Critério dos 100mV de polarização;
- Fatores que podem afetar o critério:
  - Tipo de metal;
  - Temperatura;
  - Bactéria redutora de sulfato (BRS);
  - Corrente alternada;
  - Interferências elétricas;
  - Resistividade do meio.

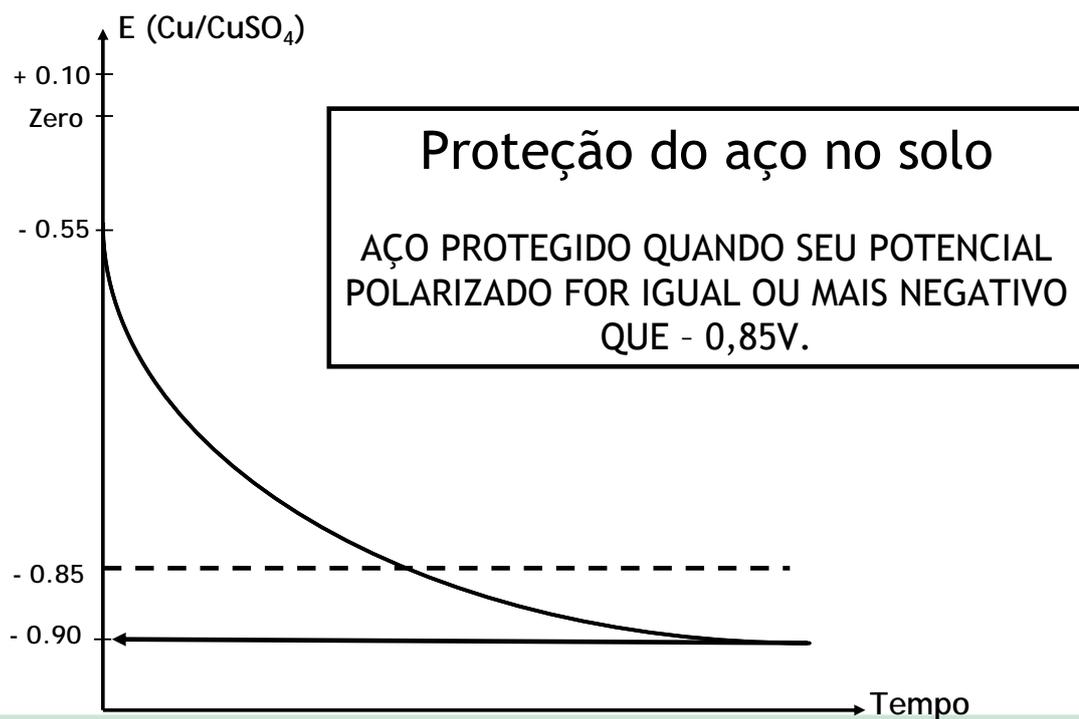


A queda IR representa o erro de medição devido à natureza do sistema. É significativo somente em sistemas terrestres e será abordada posteriormente.

# CRITÉRIO DO POTENCIAL - DIAGRAMA DE POURBAIX DO FERRO



# CRITÉRIO DO POTENCIAL (Cu/CuSO<sub>4</sub>)

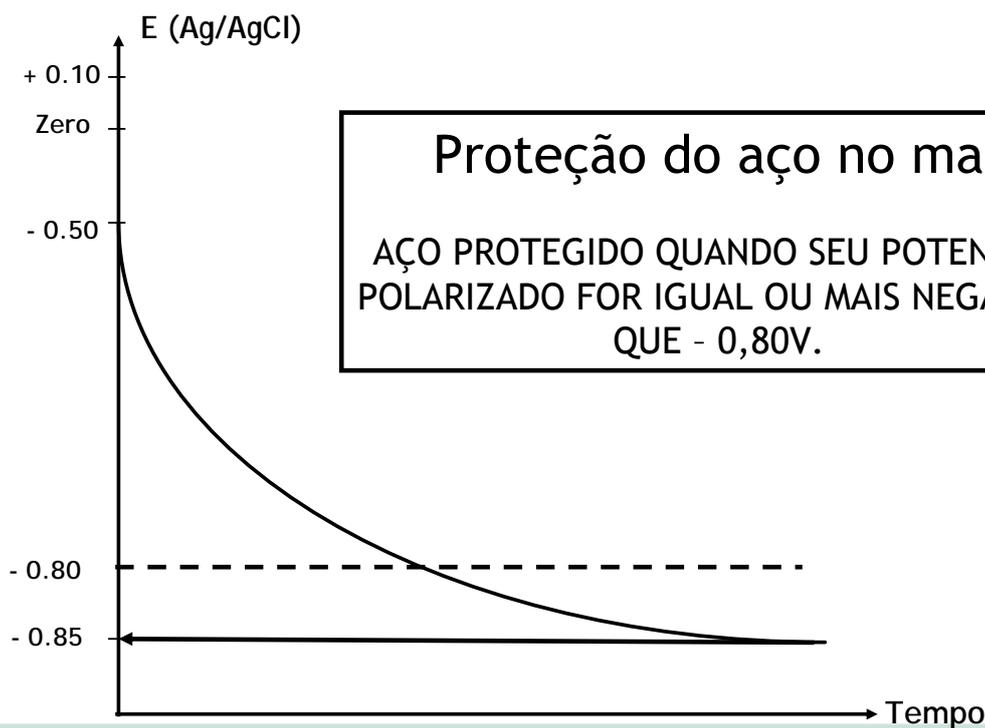


## CRITÉRIO DO POTENCIAL (Cu/CuSO<sub>4</sub>)

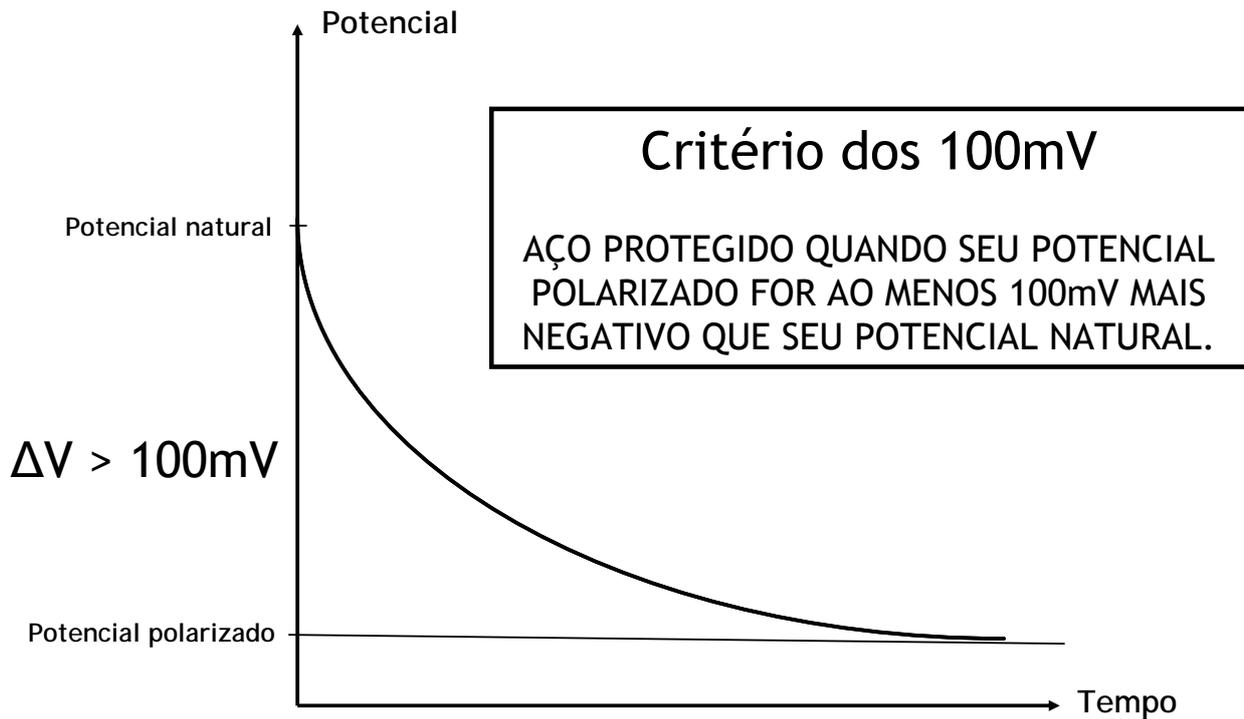
O critério do potencial pode ser mais flexível quando o eletrólito é menos corrosivo.

Resistividade do eletrólito (Ωcm)	Critério - potencial mais negativo que:
$\rho < 10.000$	-0,85V (Cu/CuSO <sub>4</sub> )
$10.000 < \rho < 100.000$	-0,75V (Cu/CuSO <sub>4</sub> )
$100.000 < \rho$	-0,65V (Cu/CuSO <sub>4</sub> )

## CRITÉRIO DO POTENCIAL (Ag/AgCl)



## CRITÉRIO DOS 100mV



## CRITÉRIO DOS 100mV

- Baseia-se na teoria de que se uma estrutura se polarizar ao menos 100mV, sua taxa de corrosão reduzirá a níveis desprezíveis.
- Na prática, é usado como critério alternativo, em uma situação particular onde o critério do potencial não foi atendido.

## FATORES QUE AFETAM O CRITÉRIO

- Tipo de metal - tabela editada da Norma DIN 30676:

Material	Potential $V_{CSE}$
Unalloyed & low-alloy ferrous materials	-850 mV
Stainless steels with $Cr \geq 16\%$	-100 mV
Copper, copper-nickel alloys	-200 mV
Lead	-650 mV
Aluminum	-800 mV
Steel in contact with concrete	-750 mV
Galvanized steel	-1200 mV

## FATORES QUE AFETAM O CRITÉRIO

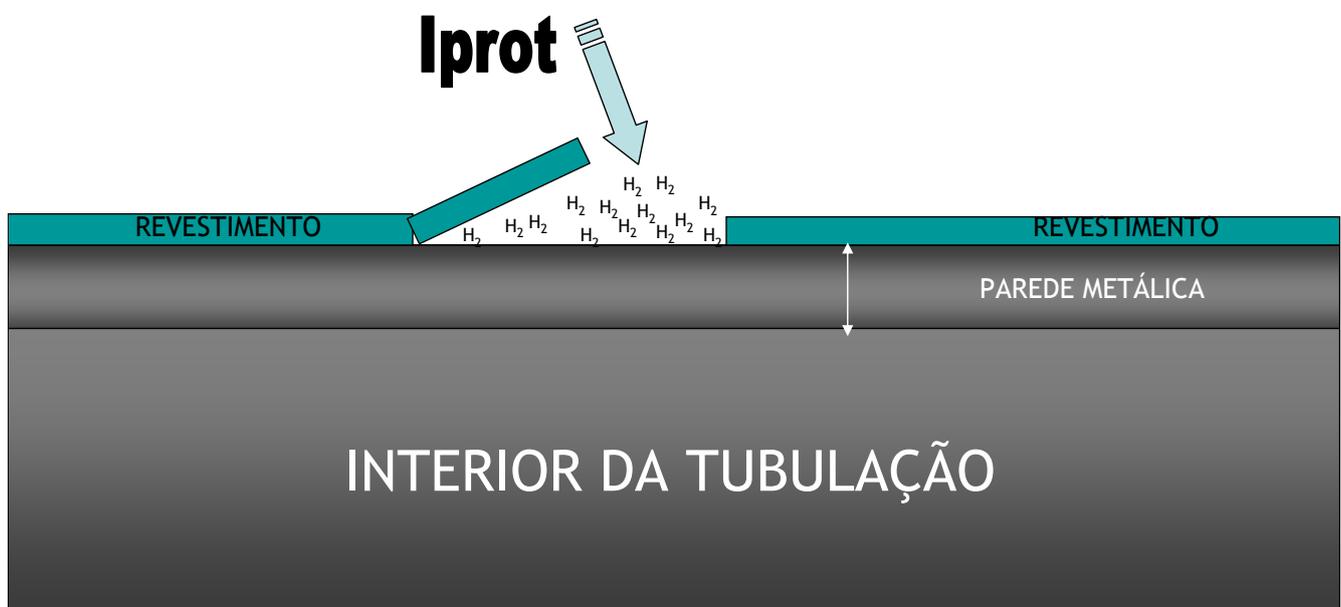
- Temperaturas elevadas:
  - Critério: -950mV ( $Cu/CuSO_4$ ) para temperaturas superiores a 60°C.
- Bactérias redutoras de sulfato:
  - Critérios: -950mV ( $Cu/CuSO_4$ ) ou 200mV de polarização.
- Interferências elétricas (tensão contínua ou alternada) e acoplamentos metálicos serão avaliados posteriormente.

## FATORES QUE AFETAM O CRITÉRIO

- CST (Corrosão sob tensão):
  - Não polarizar menos que  $-850\text{mV}$  ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) estruturas operando em condições sujeitas à CST (alto pH, temperatura próxima à  $75^\circ\text{C}$ ).
- Superproteção Catódica:
  - Limitação do potencial de polarização em  $-1200\text{mV}$  ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) para evitar os efeitos nocivos da geração de hidrogênio em excesso.

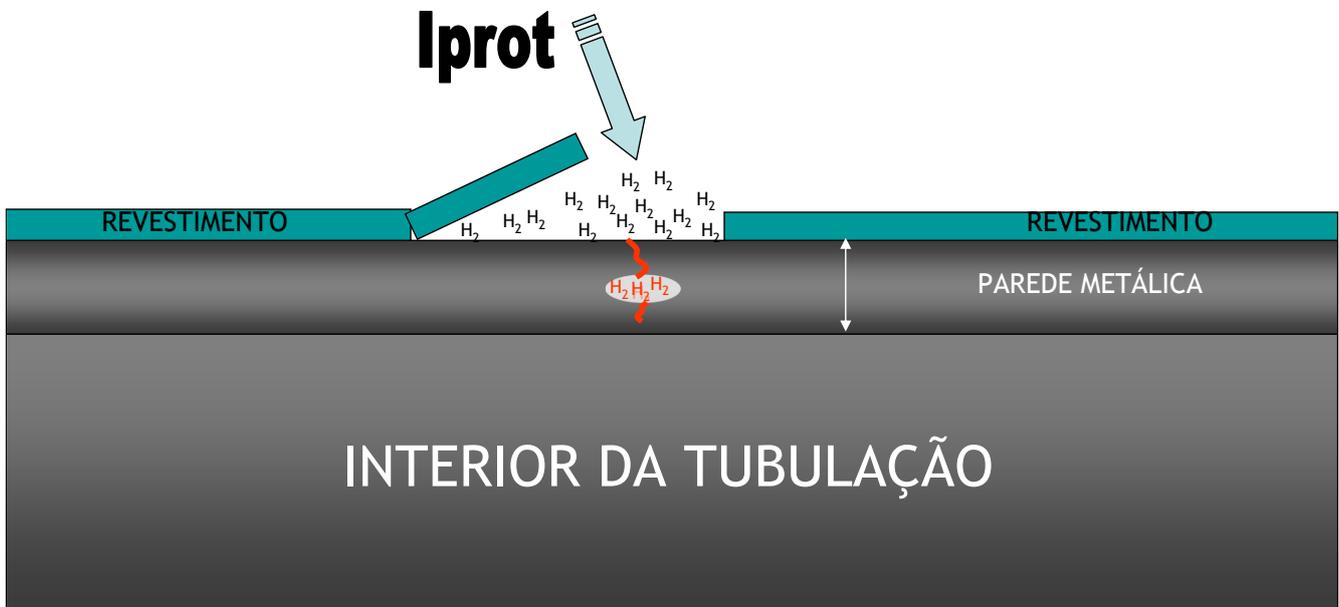
## SUPERPROTEÇÃO CATÓDICA

### Descolamento do revestimento



## SUPERPROTEÇÃO CATÓDICA

Fragilização em aços de alta resistência pelo  $H_2$



## SUPERPROTEÇÃO CATÓDICA NA PRÁTICA

- Geralmente não é um grande inconveniente, a não ser por um gasto desnecessário de energia.
- Passa a ser uma preocupação em aços de elevada resistência: SMYS - Tensão de escoamento mínima especificada  $> 550$  MPa (aproximadamente aço X70 da API 5L).

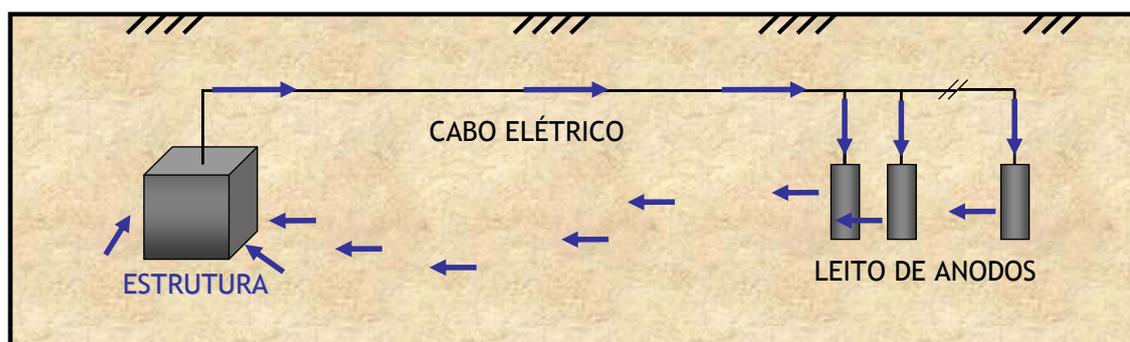
## TIPOS DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Existem dois tipos de sistemas de proteção catódica:

1. CORRENTE GALVÂNICA (OU POR ANODOS DE SACRIFÍCIO)
2. CORRENTE IMPRESSA

## SISTEMA DE CORRENTE GALVÂNICA

- Em um sistema galvânico, a proteção ocorre pela diferença de potencial entre materiais diferentes.
- A estrutura fica protegida enquanto durarem os anodos.



# SISTEMA DE CORRENTE GALVÂNICA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Plataformas marítimas fixas (PMXL-01)



# SISTEMA DE CORRENTE GALVÂNICA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Dutos submarinos



## SISTEMA DE CORRENTE GALVÂNICA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Interior de tanques de armazenamento de água salgada, incluindo petróleo bruto



## SISTEMA DE CORRENTE GALVÂNICA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Interior de tubulações de transporte de água ou petróleo bruto



# SISTEMA DE CORRENTE GALVÂNICA

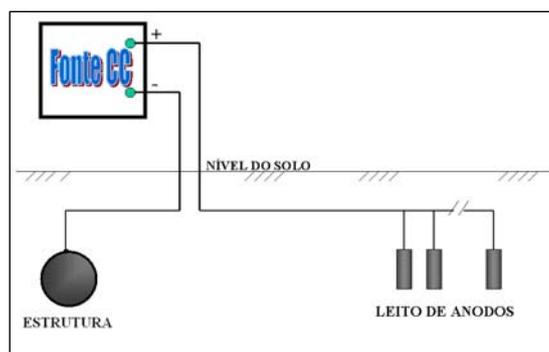
## ANODOS GALVÂNICOS

- São utilizadas ligas de metais com potenciais negativos:
  - Alumínio (consumo aprox.: 3 a 4 kg/A.ano);
  - Zinco (consumo aprox.: 12 kg/A.ano);
  - Magnésio (consumo aprox.: 8 kg/A.ano).



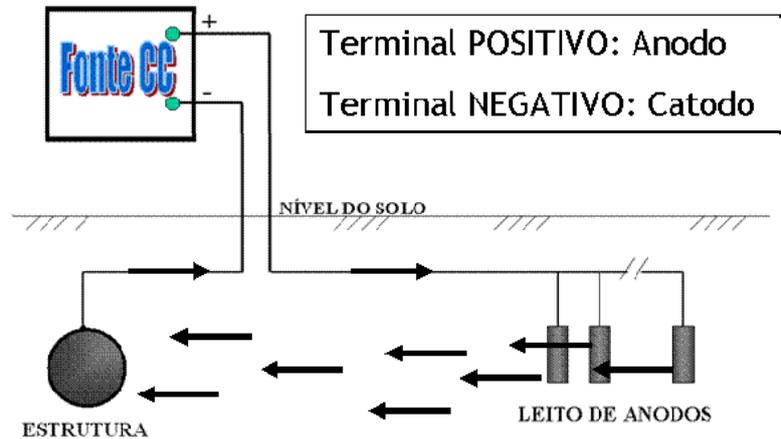
# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA

- Em um sistema de corrente impressa, a diferença de potencial é fornecida por uma fonte de corrente contínua.
- A estrutura fica protegida enquanto a fonte estiver em funcionamento.



# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA

## CUIDADO COM A POLARIDADE DA FONTE!!!



# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA

Fontes de corrente impressa:

- Retificador (mais usado);
- Bateria;
- Painel solar;
- Termogerador;
- Etc.



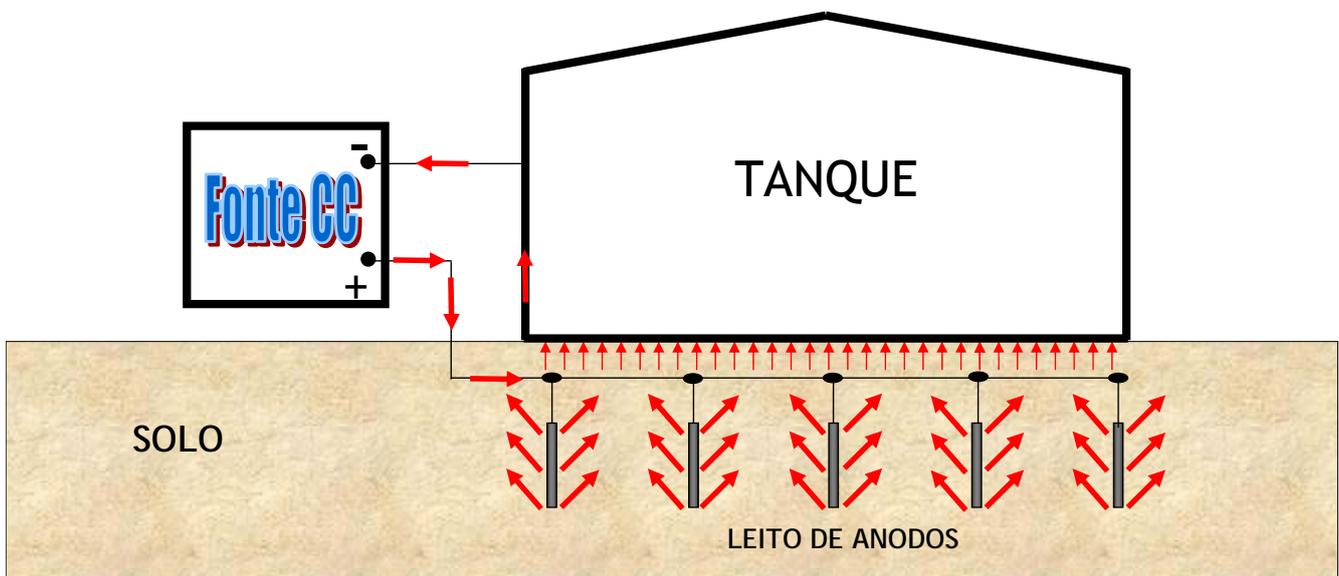
# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

## Dutos terrestres



# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Superfície externa de tanques de armazenamento, assentado diretamente no solo



# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Embarcações (navios e plataformas flutuantes)



# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA PRINCIPAIS APLICAÇÕES

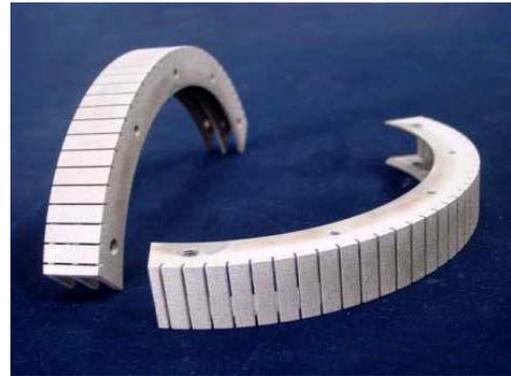
Estruturas de concreto



# SISTEMA DE CORRENTE IMPRESSA

## ANODOS INERTES

- Pesados (possuem taxa de consumo):
  - Ferro (consumo aprox.: 9 kg/A.ano);
  - Grafite (consumo aprox.: 0,1 a 1 kg/A.ano);
  - Ferro-Silício (consumo aprox.: 0,05 a 0,5 kg/A.ano).
- Dimensionalmente estáveis:
  - Platina;
  - Titânio com óxido de metais;
  - Polimérico.



# CORRENTE GALVÂNICA x CORRENTE IMPRESSA

## CORRENTE GALVÂNICA:

- Não requer suprimento de alimentação externa;
- Quantidade de corrente fornecida é limitada.
- Baixo custo de inspeção e manutenção;

## CORRENTE IMPRESSA:

- Requer alimentação externa, comprometido pela falta de energia;
- Pode fornecer grandes quantidades de corrente;
- Maiores custos com inspeção e manutenção.

## ARRANJO DOS ANODOS

- Basicamente existem três modos distintos de aplicação de anodos:
  - Instalação distribuída, geralmente aplicada em sistemas de corrente galvânica.
  - Instalação remota, geralmente aplicada em sistemas de corrente impressa.
  - Instalação pontual, geralmente aplicada em *retrofit* de sistemas galvânicos e em embarcações.

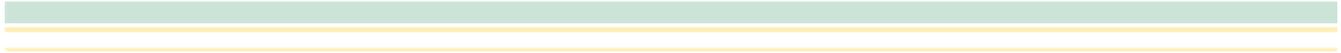
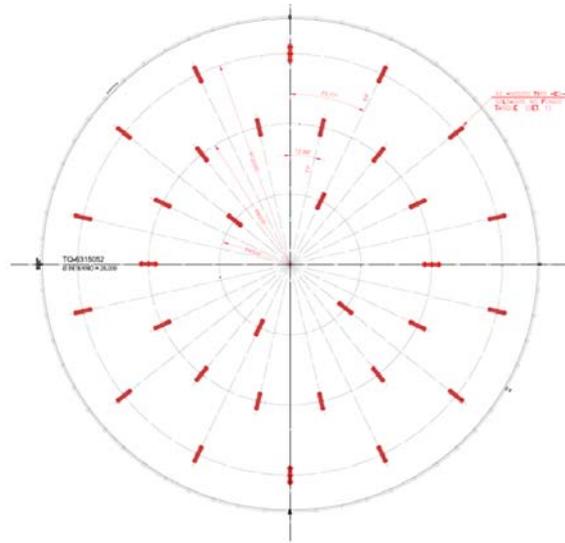
## INSTALAÇÃO DISTRIBUÍDA

- Os anodos são igualmente distribuídos ao longo da estrutura protegida.
- Cada anodo protege uma pequena porção de toda a superfície.



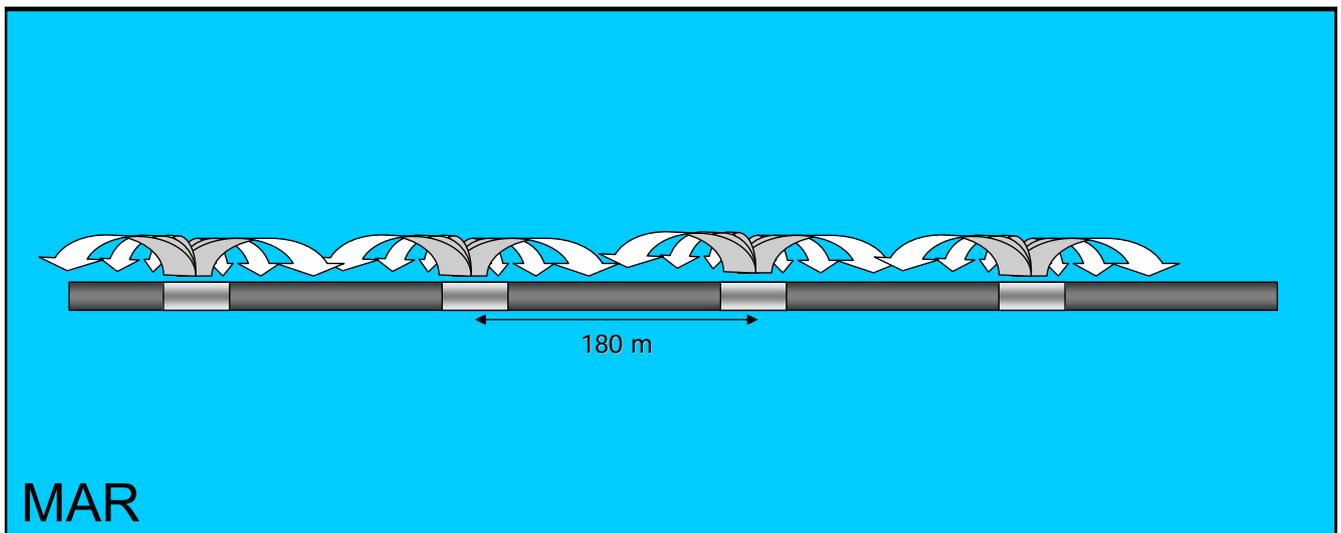
# INSTALAÇÃO DISTRIBUÍDA

Fundo de tanques de armazenamento



# INSTALAÇÃO DISTRIBUÍDA

Dutos submarinos



## INSTALAÇÃO DISTRIBUÍDA

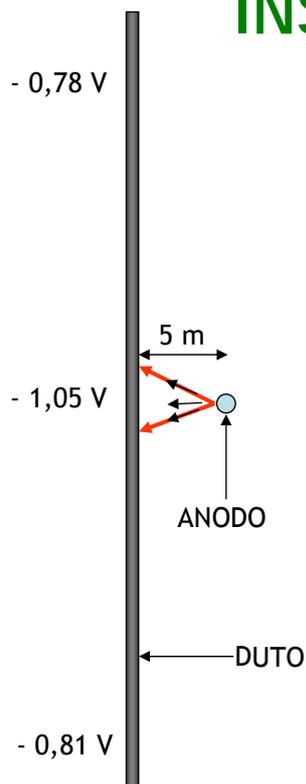
Jaquetas de plataformas



## INSTALAÇÃO REMOTA

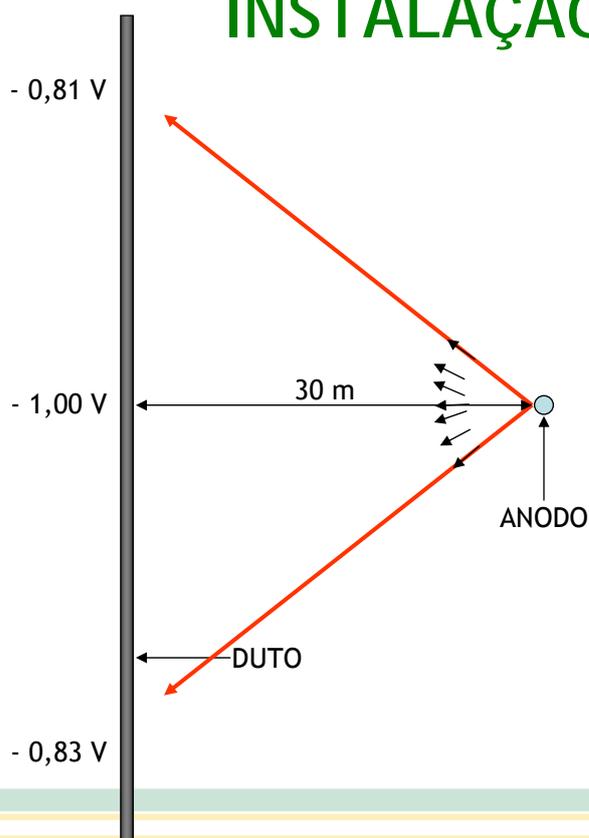
- Os anodos são instalados longe (na posição remota) da estrutura protegida, concentrados em regiões específicas.
- A proteção abrange uma grande área da estrutura protegida.

## INSTALAÇÃO REMOTA



O alcance da proteção é limitado quando o anodo está próximo da estrutura protegida

## INSTALAÇÃO REMOTA



Afastando o anodo, aumenta o alcance da proteção catódica

## INSTALAÇÃO REMOTA

- 0,87 V

A partir de uma determinada distância, a dispersão de corrente não muda se afastarmos ainda mais o anodo.

- 0,98 V

ANODO

DUTO

- 0,90 V

## INSTALAÇÃO REMOTA

- 0,87 V

Atualmente utiliza-se 60 m ou mais para dutos terrestres com PE3L. Para revestimentos menos eficientes, era usual afastamentos na ordem de 100 m.

- 0,98 V

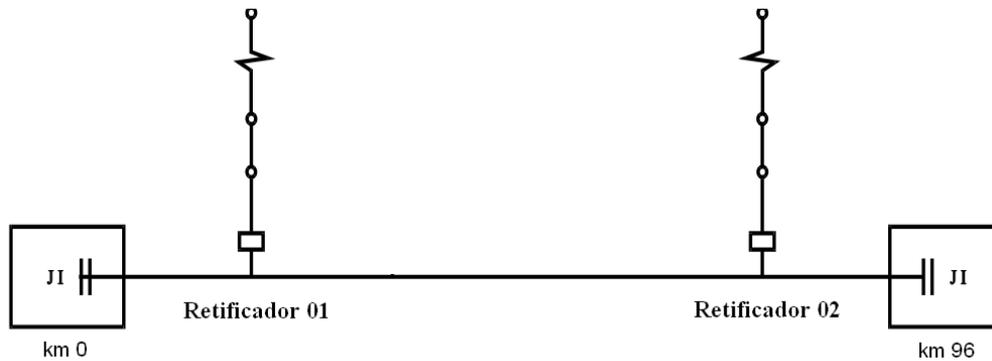
ANODO

DUTO

- 0,90 V

# INSTALAÇÃO REMOTA

## Dutos terrestres

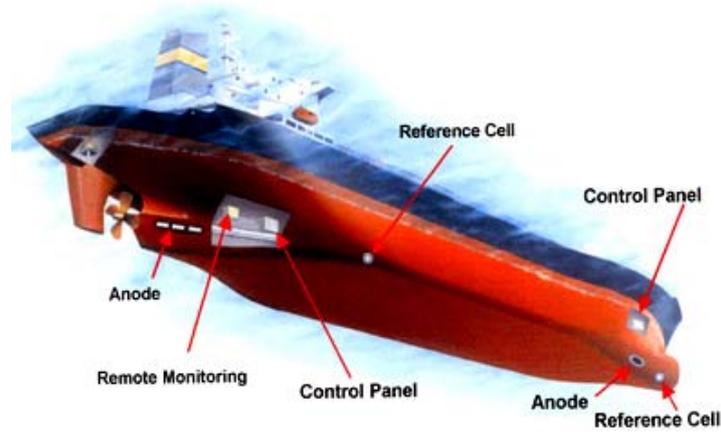


# INSTALAÇÃO PONTUAL

- Os anodos estão concentrados em regiões específicas, embora não estejam posicionados na posição remota.
- A proteção abrange uma grande área da estrutura protegida.

# INSTALAÇÃO PONTUAL

## Embarcações



# INSTALAÇÃO PONTUAL

## *Retrofit* de sistemas galvânicos

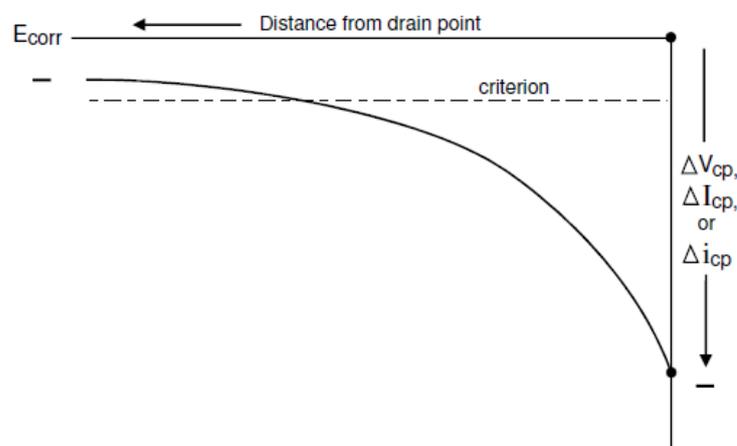


## ALCANCE DA PROTEÇÃO

- O alcance da proteção depende principalmente dos seguintes fatores:
  - Eficiência da pintura ou revestimento (mais eficiente, maior alcance);
  - Resistividade do eletrólito (maior resistividade, maior alcance).

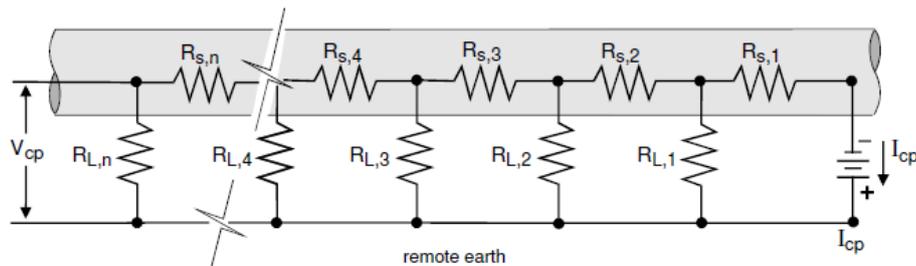
## ALCANCE DA PROTEÇÃO

### Atenuação de corrente



# ALCANCE DA PROTEÇÃO

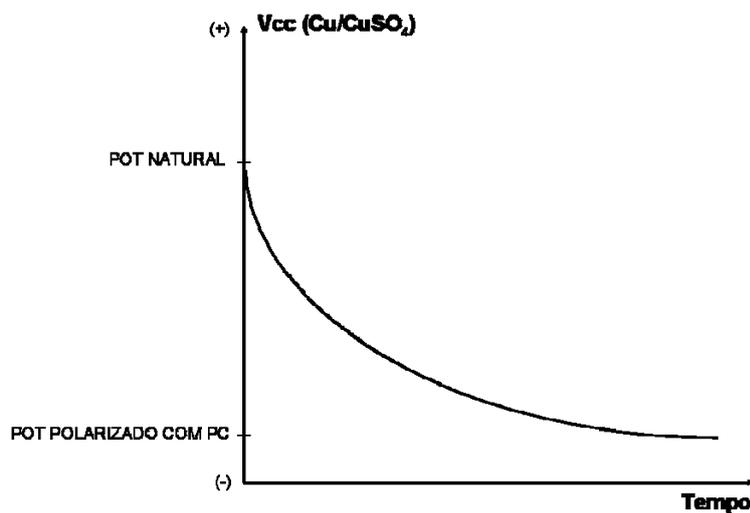
## Caminho da Corrente Elétrica



# ALCANCE DA PROTEÇÃO

**CUIDADO!!!**

Não confundir com a curva de polarização!





FIM DA PARTE 1

