



I SIMPÓSIO SOBRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA  
ESTRUTURAS DE CONCRETO

# ENSAIOS ELETROQUÍMICOS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS

**Prof. Enio Pazini Figueiredo, UFG**

[epazini@terra.com.br](mailto:epazini@terra.com.br)



**INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO**

FUNDADO EM 23/06/1972

## **Capítulo 35**

# **Monitoração de estruturas de concreto**

**Enio Figueiredo – UFG**

**Gilberto Nery – USP**

**Pedro A. O. Almeida – USP**

**Livro Concreto: Ciência e Tecnologia**

**Editor: Geraldo C. Isaia**

# Introdução

- Inclusão do tempo como parâmetro de projeto no código modelo fib 2010
- Estruturas devem ser resistentes à deterioração
- Estratégia de manutenção deve ser desenvolvida junto com o projeto da estrutura
- A monitoração estrutural já é bem difundida no mundo e em inglês recebe o nome de *Structural Health Monitoring, SHM*

# Conceitos do SHM

## Structural Health Monitoring

- **SHM aplicada à conservação das construções segundo o Código Modelo fib 2010** Defini as atividades em 4 estágios
  - Estágio 1 – Na conclusão da obra, com ensaios de recebimento
  - Estágio 2 – Na fase de operação da obra
  - Estágio 3 – Depois da ocorrência de um evento não esperado em condições normais de projeto
  - Estágio 4 – Depois de uma intervenção (reparo ou substituição)

# Sistemas de monitoramento da corrosão

- **Técnicas para avaliação da corrosão ou do risco de corrosão**
  - Técnicas não perturbativas
    - Resistividade elétrica superficial do concreto
    - Potencial de eletrodo
    - Macropares galvânicos
    - Ruído Eletroquímico
  - Técnicas perturbativas
    - Resistência de polarização
    - Curva de polarização
    - Impedância eletroquímica

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## PERDA DE MASSA GRAVIMÉTRICA X ELETROQUÍMICA

### ***Perda de massa gravimétrica ( $\Delta MG$ )***

$$\Delta MG = M_i - M_f$$

Onde,

$\Delta MG$  é a perda de massa gravimétrica

$M_i$  é o peso inicial da armadura após a limpeza

$M_f$  é o peso final da armadura após o ensaio e nova limpeza para retirar os produtos de corrosão.

### ***Perda de massa eletroquímica ( $\Delta ME$ )***

$$\Delta ME = 0,025 \times i T$$

Onde,

$\Delta ME$  é a perda de massa eletroquímica

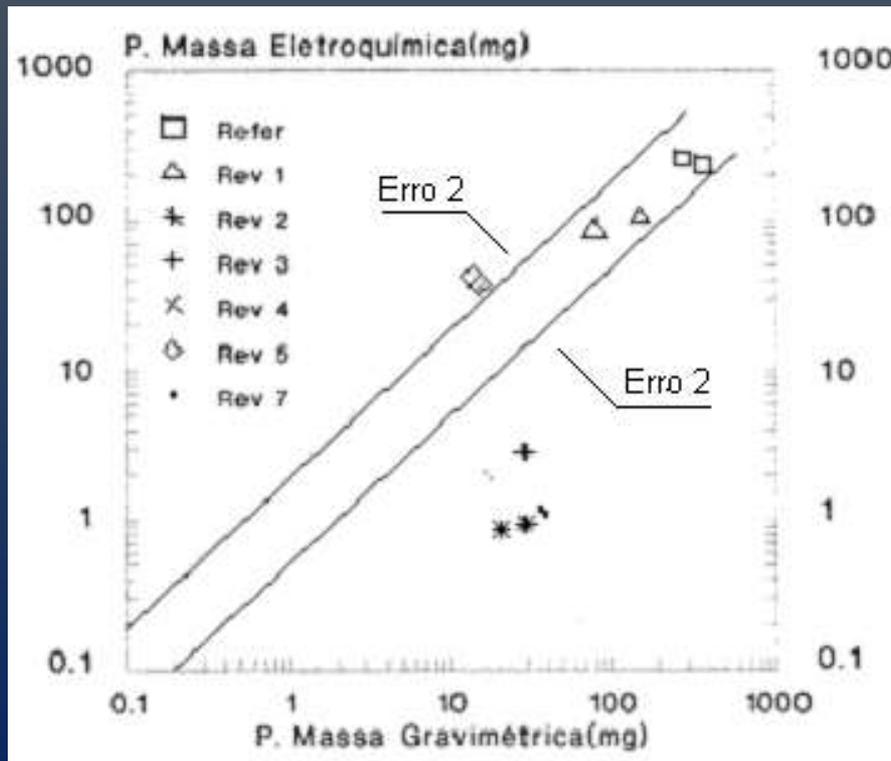
0,025 é uma constante de Faraday

$i T$  é a densidade de corrosão total

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

## PERDA DE MASSA GRAVIMÉTRICA X ELETROQUÍMICA

***Comparação entre perdas de massa gravimétricas e eletroquímicas de armaduras protegidas com diferentes revestimentos (FIGUEIREDO, 1994).***



Revestimento:

- 1 - argamassa de cimento e polímero monocomponente;
- 2 - argamassa de cimento e polímero termoplástico bicomponente com cargas especiais;
- 3 - argamassa de cimento e polímero termoplástico bicomponente com inibidor de corrosão;
- 4 - argamassa de cimento e polímero termofixo tricompente com inibidor de corrosão;
- 5 - epóxi rico em zinco;
- 6 - revestimento polimérico de base epóxi;
- 7 - revestimento polimérico com chumbo.

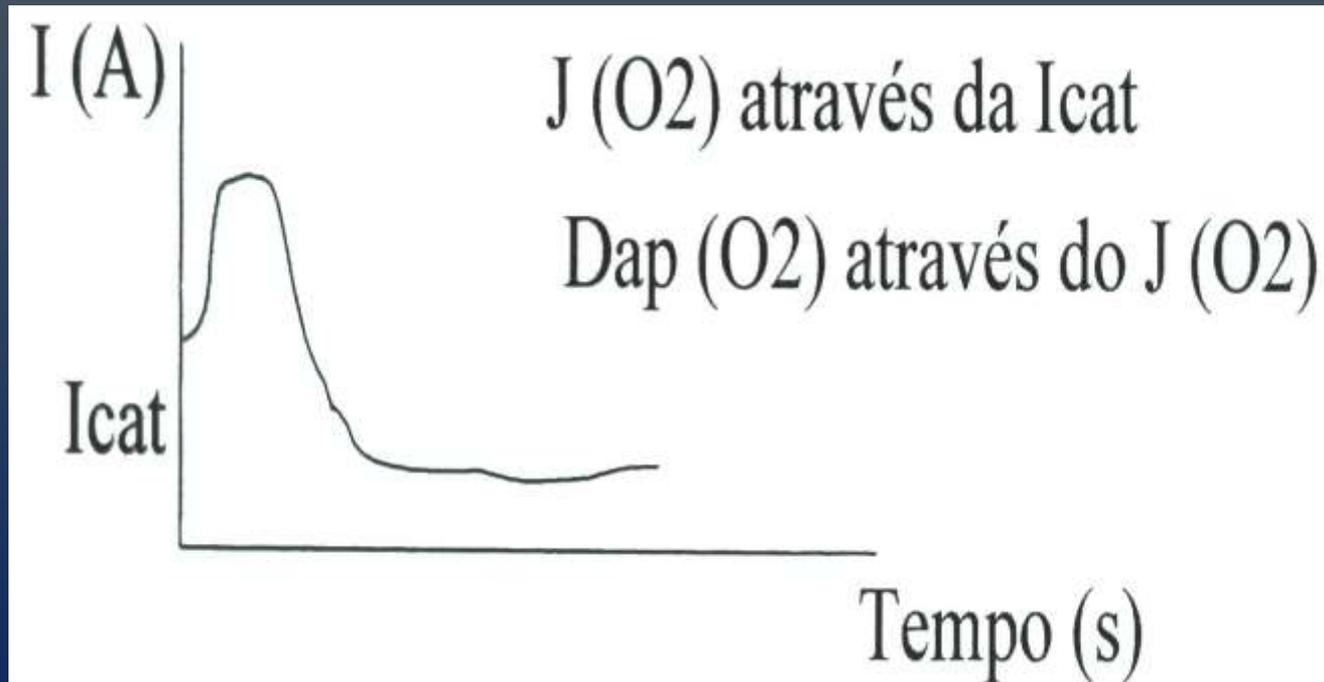
# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## $I_{cat}$ – INTENSIDADE CATÓDICA

Medida a um potencial de  $-750$  mV (ECS)

Registrada quando I x T alcança regime estacionário



# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## DIFUSÃO DE OXIGÊNIO

Para determinar o fluxo de oxigênio até a superfície da armadura do concreto, mede-se inicialmente a intensidade de corrente catódica ( $I_{cat}$ ), a um potencial constante de -750 mV, em relação a um eletrodo de calomelano saturado (ECS). Nesse potencial a única reação catódica possível é a redução de oxigênio (GJORV et al, 1986; ANDRADE et al, 1990). A  $I_{cat}$  é registrada quando a curva corrente versus tempo alcança o chamado estado estacionário.

Com o valor de  $I_{cat}$  no estado estacionário aplica-se a lei de Faraday para obter o fluxo de oxigênio ( $J(O_2)$ ) até a armadura.

$$J(O_2) = \frac{I_{cat}}{n \cdot F} \quad \text{(GJORV et al, 1986)}$$

onde,

$J(O_2)$  é o fluxo de oxigênio em mol/s;

$I_{cat}$  é a intensidade de corrente catódica no estado estacionário em Amper (A);

$n$  é o número de elétrons de valência (4);

$F$  é a constante de Faraday (96500 C/mol).

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## DIFUSÃO DE OXIGÊNIO

A partir do  $J(O_2)$ , e utilizando a primeira lei de Fick, calcula-se o coeficiente de difusão aparente de oxigênio  $D_{ap}(O_2)$

$$D_{ap}(O_2) = \frac{J(O_2) \cdot e}{S \cdot C_o} \quad (\text{PAGE e LAMBERT, 1987})$$

onde,

$D_{ap}(O_2)$  é o coeficiente de difusão aparente de oxigênio em  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$J(O_2)$  é o fluxo de oxigênio em  $\text{mol/s}$ ;

$e$  é a espessura do revestimento em  $\text{cm}$ ;

$S$  é a área da armadura onde o oxigênio pode ser reduzido em  $\text{cm}^2$ ;

$C_o$  é a concentração de oxigênio em uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ , em  $\text{mol/cm}^3$  ( $1,06 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ , segundo PAGE e LAMBERT, 1987).

## TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

### DIFUSÃO DE OXIGÊNIO

*Valores de  $D_{ap}(O_2)$  para argamassa obtidos por diversos autores.*

AUTOR	$D_{ap}(O_2)$ (cm <sup>2</sup> /s)
Gjorv et al (1986)	$1,3 \times 10^{-6}$ a $3,4 \times 10^{-6}$ *
Andrade et al (1990)	$2,44 \times 10^{-6}$ **
Kobayashi et al (1991)	$8,4 \times 10^{-6}$
Hansson (1993)	$2,36 \times 10^{-6}$ **
Figueiredo (1994)	$2,07 \times 10^{-6}$

\* Varia em função do cobrimento

\*\* calculado a partir dos dados autores

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## RESISTIVIDADE

A resistividade elétrica do concreto é decisiva para a definição do período de iniciação da corrosão e, ao lado da difusão de oxigênio, fundamental para a propagação da corrosão. A resistividade pode ser obtida através do Método de Wernner, ou método dos quatro eletrodos. A fórmula mostrada a seguir e empregada para a obtenção da resistividade do concreto.

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

onde,

$\rho$  é a resistividade em ohm . cm;

$a$  é a distância entre os eletrodos em cm;

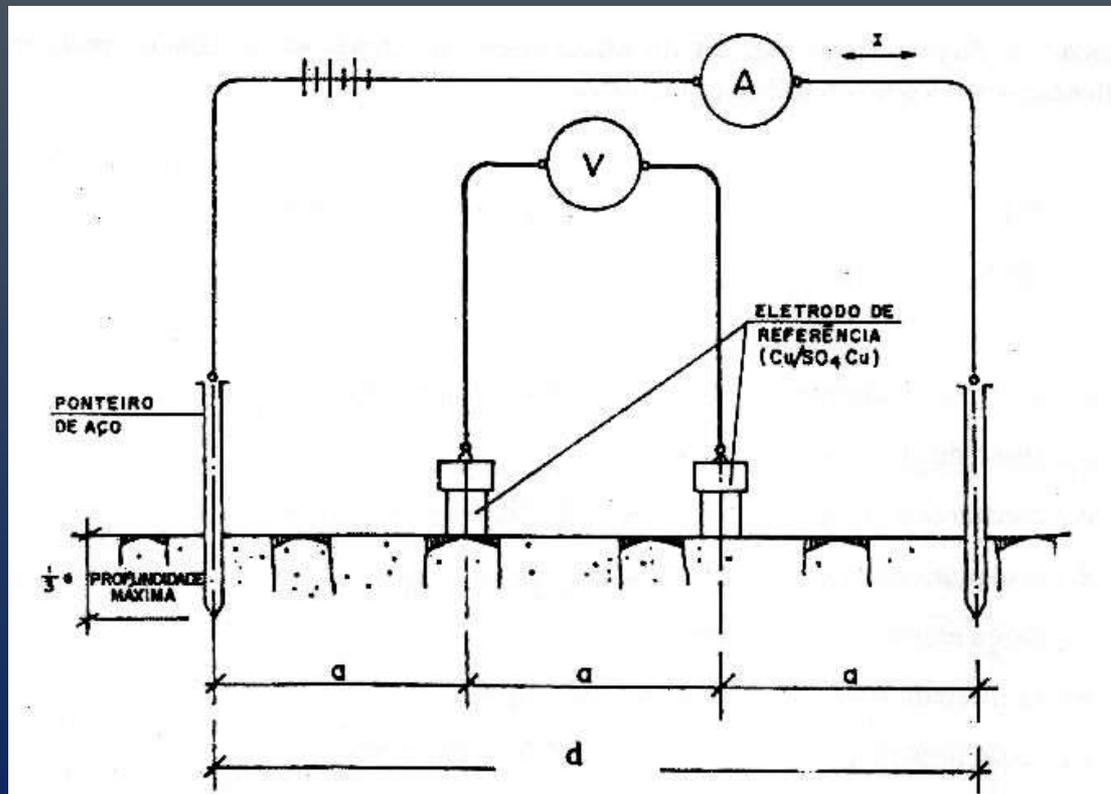
$V$  é a voltagem medida entre os eletrodos centrais em volts;

$I$  é a corrente em Amper.

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

## RESISTIVIDADE

*Esquema da medida da resistividade do método dos quatro eletrodos.*



- **Resistividade elétrica superficial do concreto**

Pode ser influenciada por vários fatores

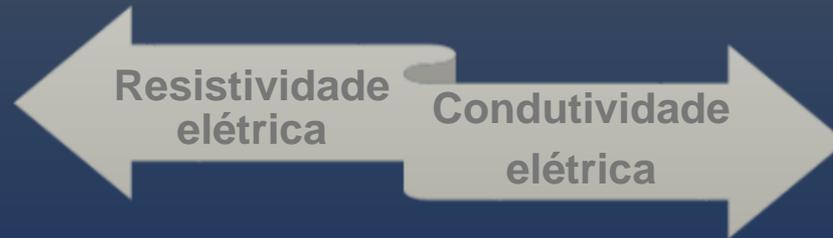


Figura 5 - Modelos de sensores para monitorar a resistividade superficial do concreto baseados na técnica dos quatro eletrodos (<http://www.proceq.com>)

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO CONCRETO

Os concretos, bem como outros materiais, têm propriedades elétricas que os caracterizam, especificamente relacionadas com a **RESISTIVIDADE ELÉTRICA**.



Resistividade

relação  
água/  
cimento

grau de  
saturação

porosidade  
da  
estrutura

tipo de  
cimento

agregados

hidratação  
do cimento

temperatura

Carbonatação

íons  
cloreto

adições  
mineraiis

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## RESISTIVIDADE

### *Interpretação dos resultados do ensaio de resistividade*

RESISTIVIDADE (ohm . cm)	RISCO DE CORROSÃO DA ARMADURA
< 5000	MUITO ALTO
5000 A 10000	ALTO
10000 A 20000	BAIXO/MODERADO
> 20000	BAIXO

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

## *Resistividade elétrica nas primeiras 24 horas*

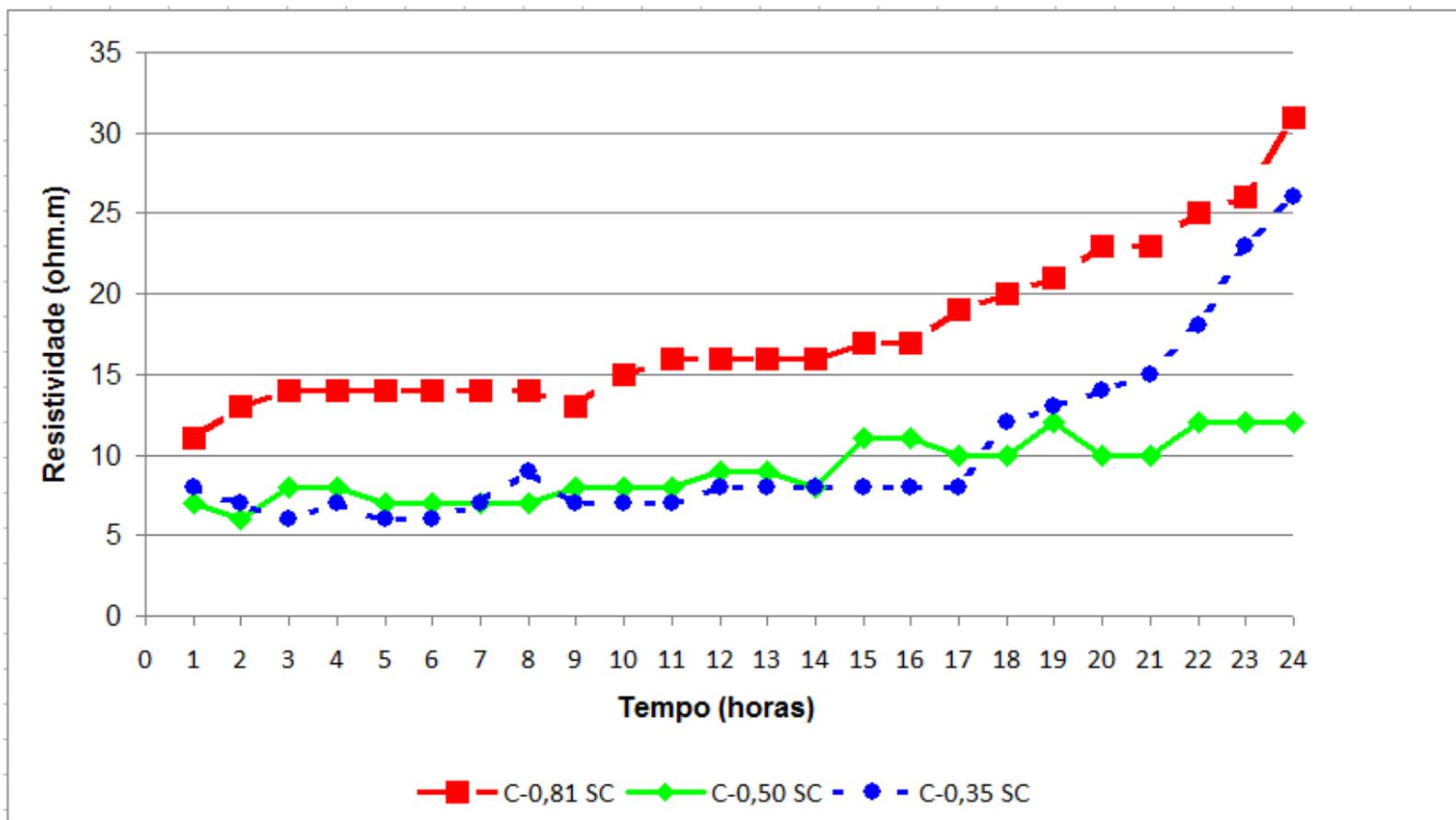


Figura - Perfil da evolução da resistividade elétrica dos tres tipos de concreto as primeiras 24 horas.

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

## *Resistividade Elétrica da 24<sup>a</sup> hora até 168 horas (7 dias)*

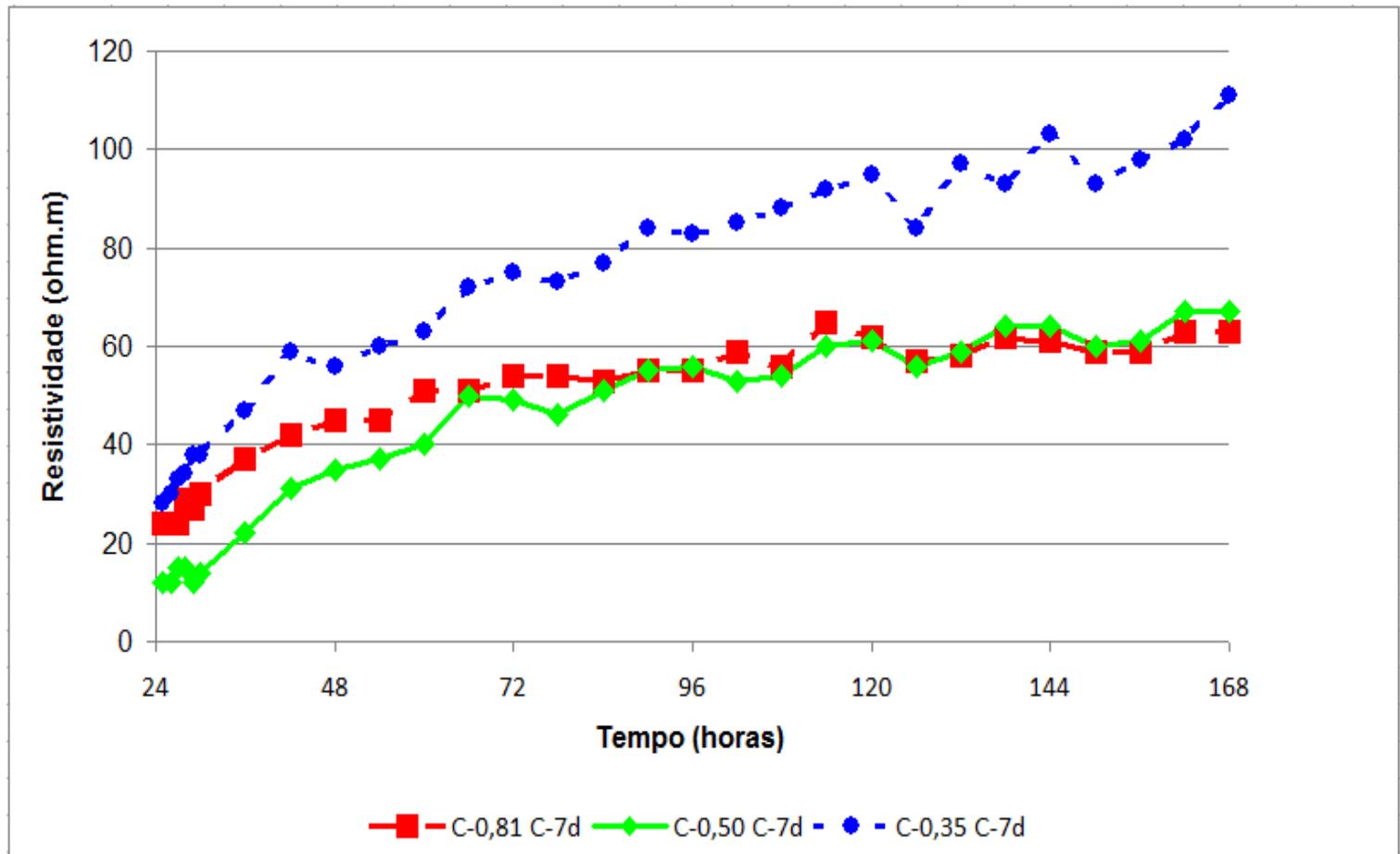


Figura - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias (1-7 dias).

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

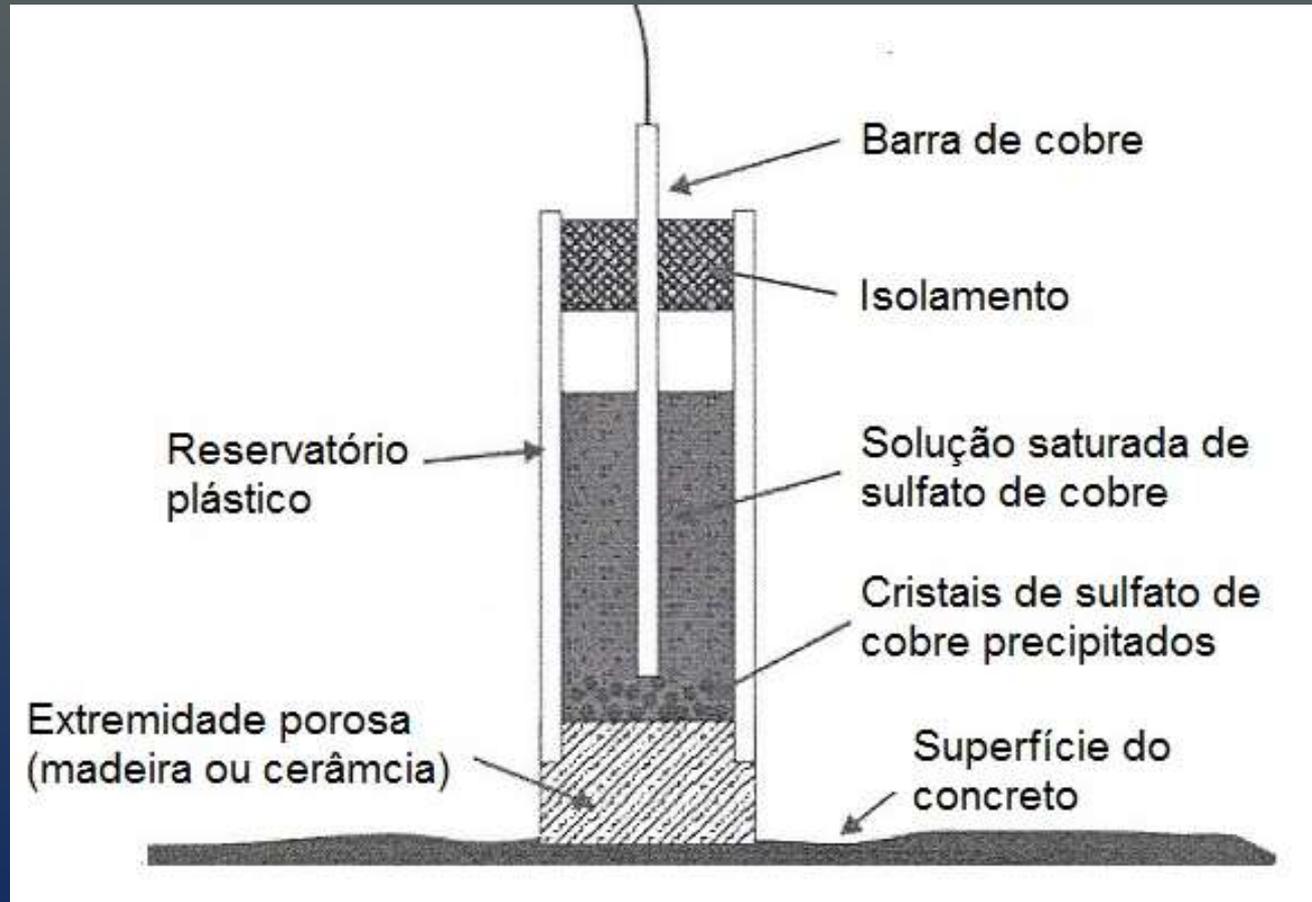
## POTENCIAL DE CORROSÃO

Potencial de equilíbrio é o que se estabelece a partir de uma situação de equilíbrio entre duas tendências: a dos átomos metálicos, em deixar o metal e passar para a dissolução, ionizando-se e hidratando-se, e a dos cátions, em depositar-se sobre o metal. A esse equilíbrio dinâmico é correspondido uma densidade de corrente de intercâmbio, equivalente à velocidade de dissolução anódica ou de depósito de cátions, segundo a Lei de Faraday.

A utilização da medida do Potencial de Corrosão tem a vantagem de ser uma técnica não destrutiva e de fácil aplicação, não sendo necessário o emprego de aparelhos caros e sofisticados. Porém, apresenta a desvantagem de apenas fornecer uma idéia relativa e aproximada do processo de corrosão instalado sobre a armadura, ou seja, do seu registro não se obtém nenhum dado quantitativo da cinética da corrosão.

A medida do Potencial de Corrosão da armadura consiste no registro da diferença de voltagem entre a armadura e um eletrodo de referência, que é colocado em contato com a superfície do concreto. A ASTM C-876 (1991) apresenta uma correlação entre intervalos de diferença de potencial, em relação a um eletrodo de referência de  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ , e a probabilidade de ocorrência de corrosão.

# Sensores de potencial de corrosão



• Figura 18 - Eletrodo de Cobre/Sulfato de Cobre ([HTTP://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Reference-Half-Cells-Cooper](http://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Reference-Half-Cells-Cooper))

# Sensores de potencial de corrosão



•(a)



(b)

- Figura 19 – (a) Eletrodos comerciais de dióxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ ); (b) Instalação de eletrodo de referência de dióxido de manganês (FORCE TECHNOLOGY, 2008)

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## POTENCIAL DE CORROSÃO

*Critérios de avaliação segundo a ASTM C-876.*

Ecorr (mv, Cu/SO <sub>4</sub> Cu)	PROBABILIDADE DE CORROSÃO
> -200	< 5%
entre -200 e -350	50%
< -350	> 95%

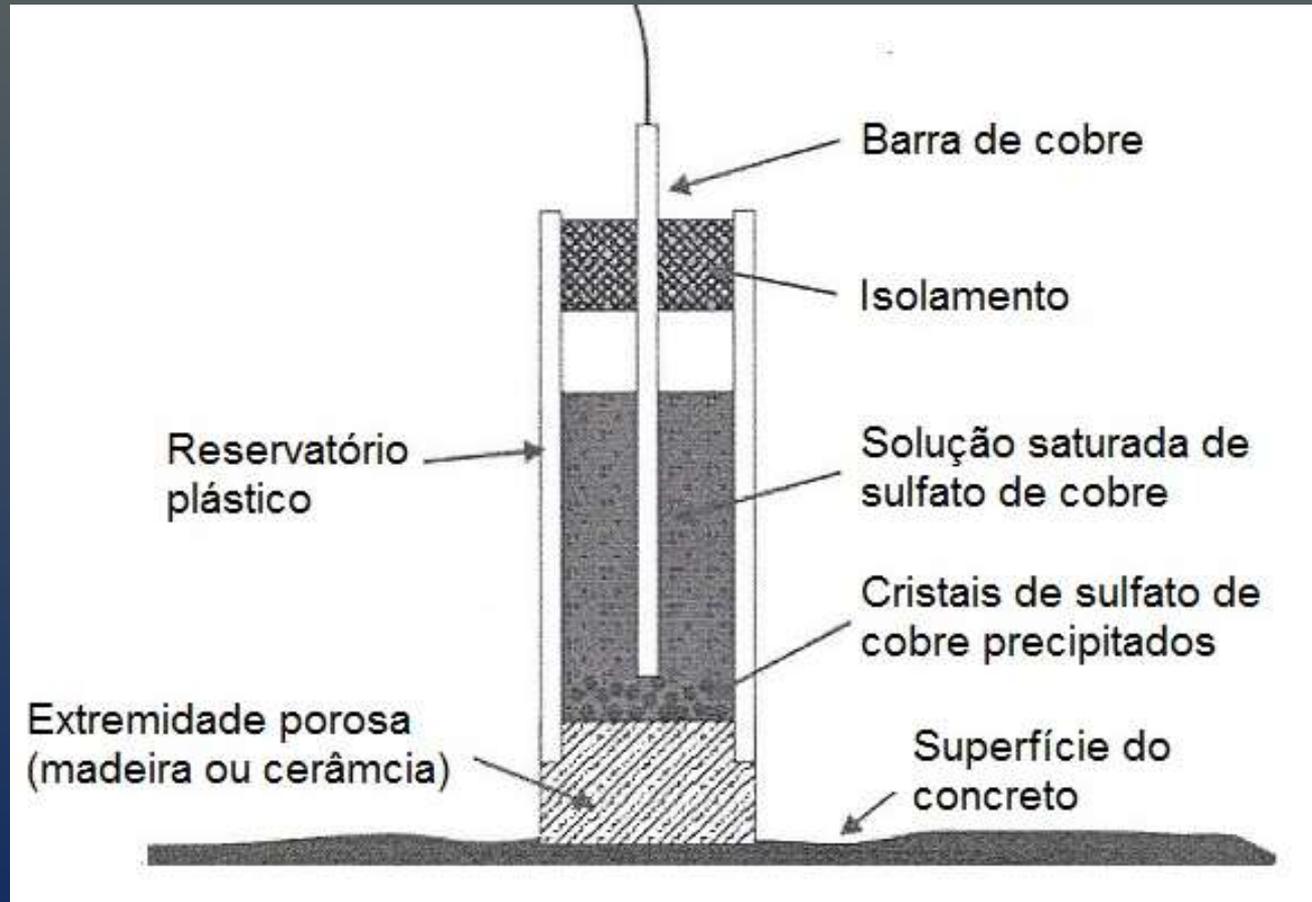
A utilização dessa técnica para a obtenção de um mapa de linhas equipotenciais pode ser bastante útil no momento de identificar as regiões de caráter anódico de uma estrutura de grandes dimensões (FIGUEIREDO et al., 1991). Esses mapas têm sido usados para planejar trabalhos de reparo de estruturas de concreto.

# Sensores de potencial de corrosão

Ecms (mV)	Estado da Armadura
< - 270	Sem corrosão
- 270 a -370	Possibilidade de corrosão
> - 370	Corrosão Instalada

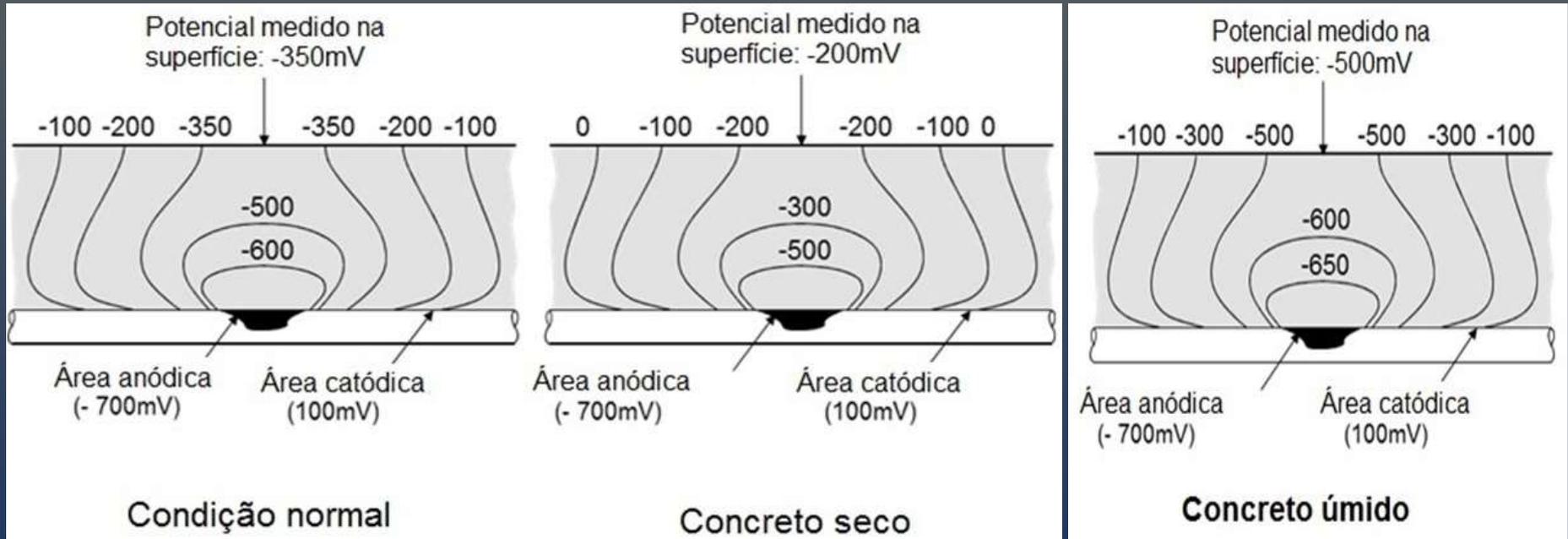
- Probabilidade de corrosão em função do potencial em relação ao eletrodo de referência de Ag/AgCl

# Sensores de potencial de corrosão



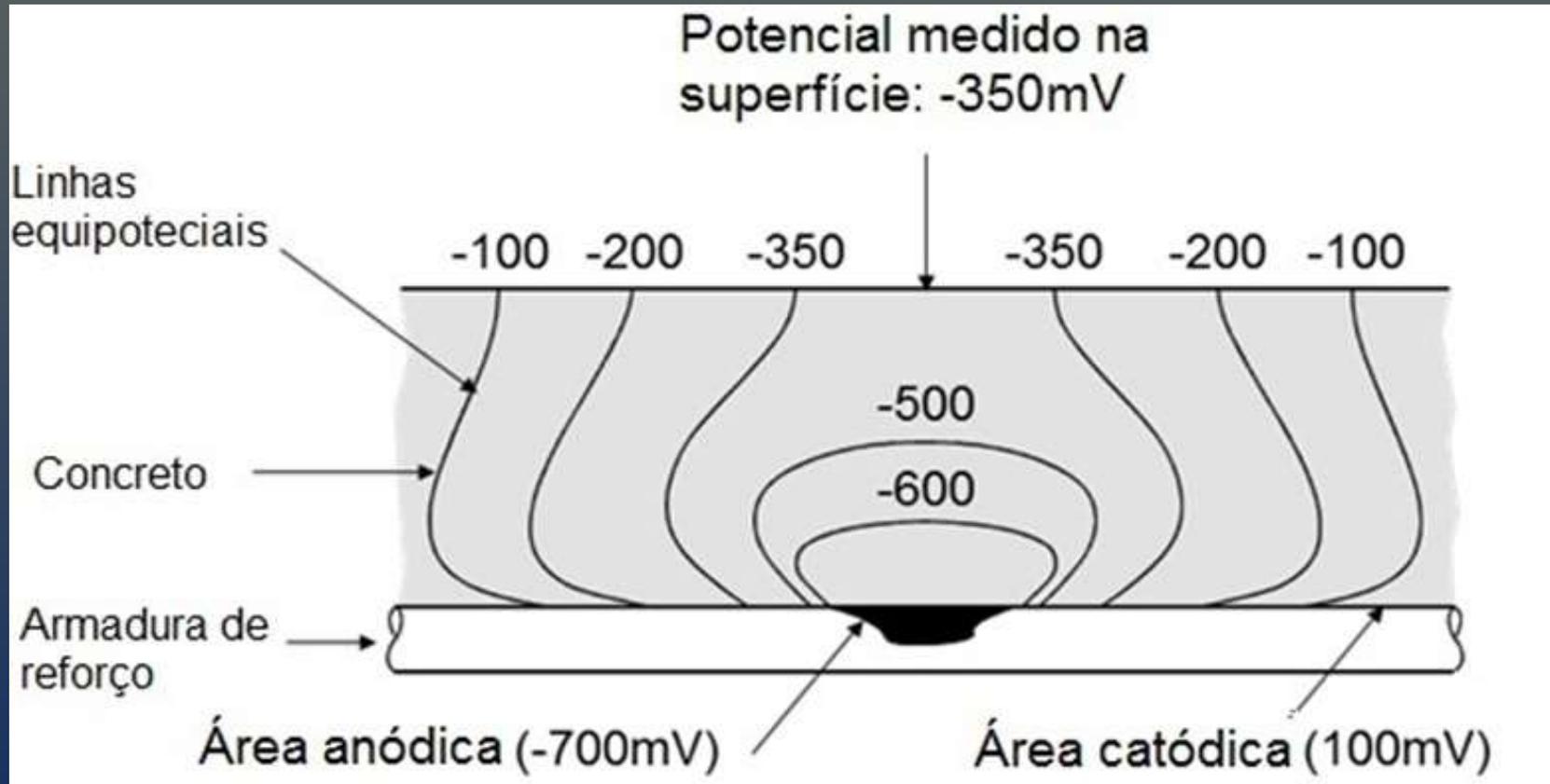
• Figura 18 - Eletrodo de Cobre/Sulfato de Cobre ([HTTP://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Reference-Half-Cells-Cooper](http://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Reference-Half-Cells-Cooper))

# Potencial de eletrodo



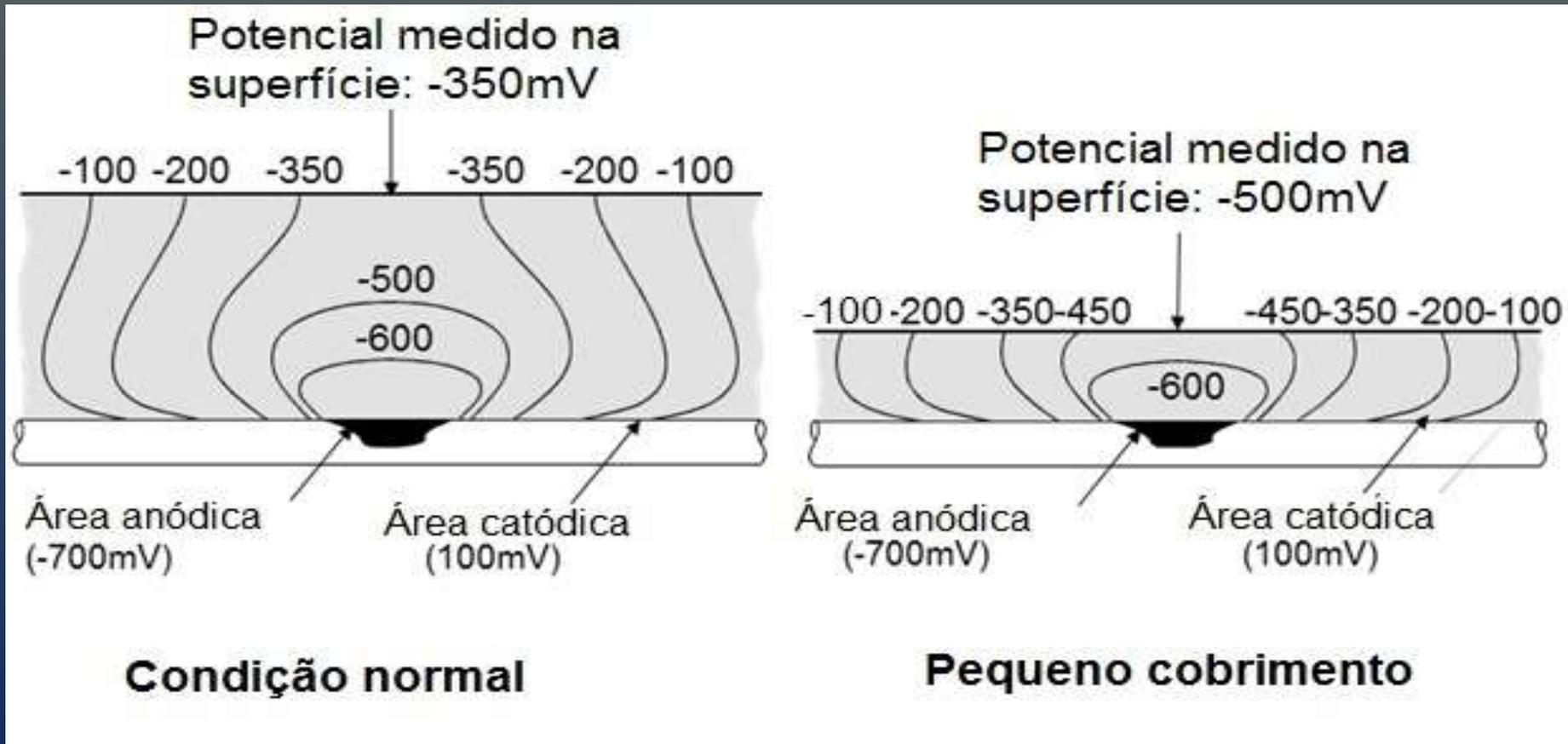
- Influência da umidade do concreto seco e úmido sobre o potencial de corrosão medido (modificado de VENNESLAND *et al.*, 2009)

# Potencial de eletrodo



- Influência da distância entre o eletrodo de referência e a região em processo de corrosão sobre o potencial de corrosão medido devido às linhas de equipotenciais formadas ao redor da região anódica (modificado de VENNESLAND *et al.*, 2009)

# Potencial de eletrodo



- Influência da espessura do revestimento sobre o potencial de corrosão medido (modificado de VENNESLAND *et al.*, 2009)

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## CURVAS DE POLARIZAÇÃO

A expressão gráfica da função potencial-intensidade de corrente é conhecida como Curva de Polarização.

POURBAIX (1949) parece ter sido o primeiro a realizar curvas de polarização sobre armaduras de aço imersas em dissoluções saturadas de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Posteriormente, Kaesche, Baumel e Engell realizaram o mesmo em corpos-de-prova de argamassa sem adições. Desde então, as curvas de polarização vêm sendo amplamente empregadas em concreto armado para estudar fenômenos como a formação de pares galvânicos, corrosão sob tensão e efeito da carbonatação e cloretos sobre a corrosão eletroquímica.

O traçado dessas curvas proporciona informação tanto sobre a intensidade de corrosão (método de intersecção) como sobre a morfologia do processo: corrosão generalizada ou por pites (corrosão localizada). No entanto, essa técnica apresenta o inconveniente de ser destrutiva, sendo necessário confeccionar novos corpos-de-prova após a realização de uma medida. Além disso, devido à elevada resistência ôhmica do concreto, faz-se necessário compensar essa resistência ôhmica a cada momento do traçado da curva. A técnica é empregada em laboratório.

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

A Resistência de Polarização é obtida da inclinação de uma rampa potenciodinâmica ( $\Delta E / \Delta I$ ) decorrente da imposição de uma polarização catódica inicial de 10 mV/minuto em torno do potencial de equilíbrio (ANDRADE et al., 1986). A Resistência de Polarização é obtida da pendente da curva formada pela variação da corrente ( $\Delta I$ ) em função da variação do potencial ( $\Delta E$ ).

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

A velocidade ou intensidade instantânea de corrosão ( $I_{corr}$ ) é obtida a partir da Resistência de Polarização e da aplicação da fórmula de STERN; GEARY (1957).

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

onde,

B é a constante que varia em função das características do sistema metal/meio e que dificilmente abandona o intervalo entre 13 a 52 mV.

- **Monitoração com sensores embutidos no concreto**
- **Monitoração com sensores portáteis**



• (a)



(b)

- **Figura 4 – (a) Sensor portátil para monitorar resistividade do concreto;**  
**(b) Sensor para monitorar o potencial e a velocidade de corrosão**

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

Para o caso de armaduras embebidas no concreto ou argamassa, ANDRADE; GONZALEZ (1978) encontraram experimentalmente valores para "B", que levaram à obtenção de uma aceitável concordância entre as perdas de massa gravimétricas e eletroquímicas. As discordâncias encontradas foram normalmente menores do que o fator de 2 sugerido por STERN; WEISERT (1959).

Ao dividir a intensidade de corrosão,  $I_{corr}$ , pela área efetiva de estudo "S", obtém-se a densidade de corrosão,  $i_{corr}$ .

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \cdot S}$$

onde,

$i_{corr}$  é obtida em  $\mu A/cm^2$ ;

B é dado em mV;

$R_p$  é dada em kohm;

S é dada em  $cm^2$ .

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO

*Critérios para avaliar os resultados de velocidade de corrosão (DURAR, 1997).*

$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ )	VELOCIDADE DO PROCESSO
$> 1$	MUITO ELEVADA
0,5 a 1	ELEVADA
0,1 a 0,5	MODERADA
$< 0,1$	DESPREZÍVEL

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

A expressão gráfica da função potencial-intensidade de corrente é conhecida como Curva de Polarização.

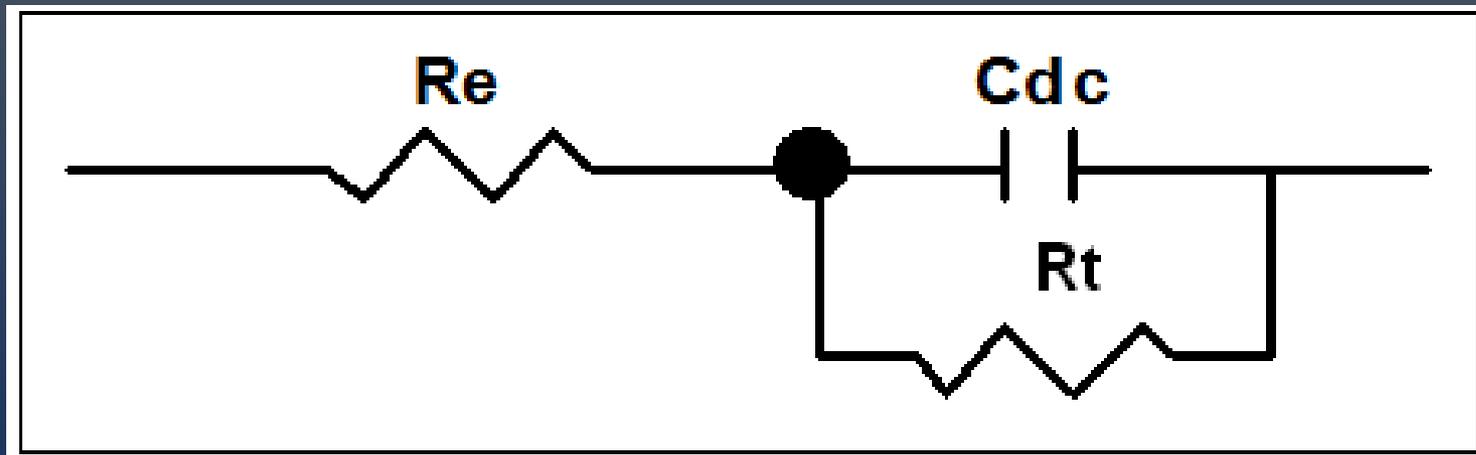
O traçado dessas curvas proporciona informação tanto sobre a intensidade de corrosão (método de intersecção) como sobre a morfologia do processo: corrosão generalizada ou por pites (corrosão localizada). No entanto, essa técnica apresenta o inconveniente de ser destrutiva, sendo necessário confeccionar novos corpos-de-prova após a realização de uma medida. Além disso, devido à elevada resistência ôhmica do concreto, faz-se necessário compensar essa resistência a cada momento do traçado da curva. A técnica é empregada em laboratório.

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

*Modelo de Randles que simula o sistema eletroquímico metal/solução (RANDLES, 1947).*



$R_e$  → resistência do eletrólito

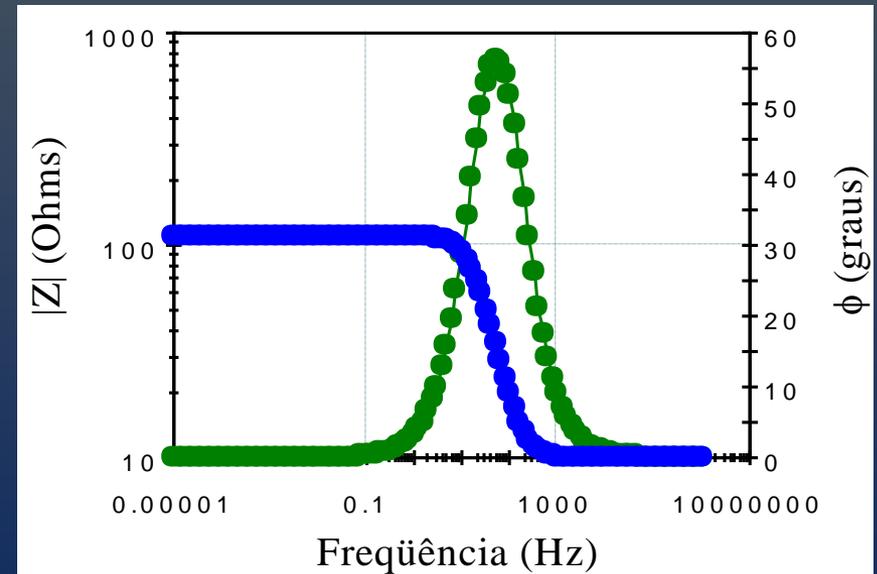
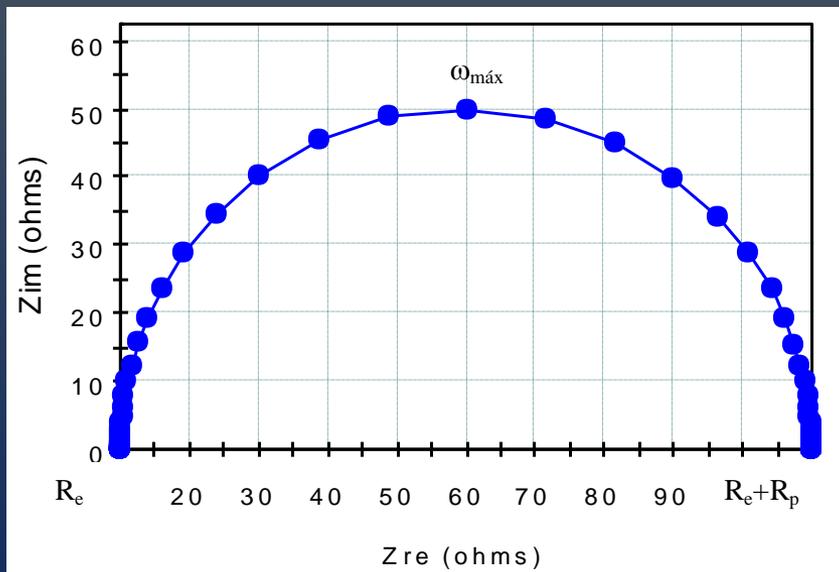
$C_{dc}$  → capacidade da dupla camada eletroquímica

$R_t$  → resistência de transferência ( $R_p$ )

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

## IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

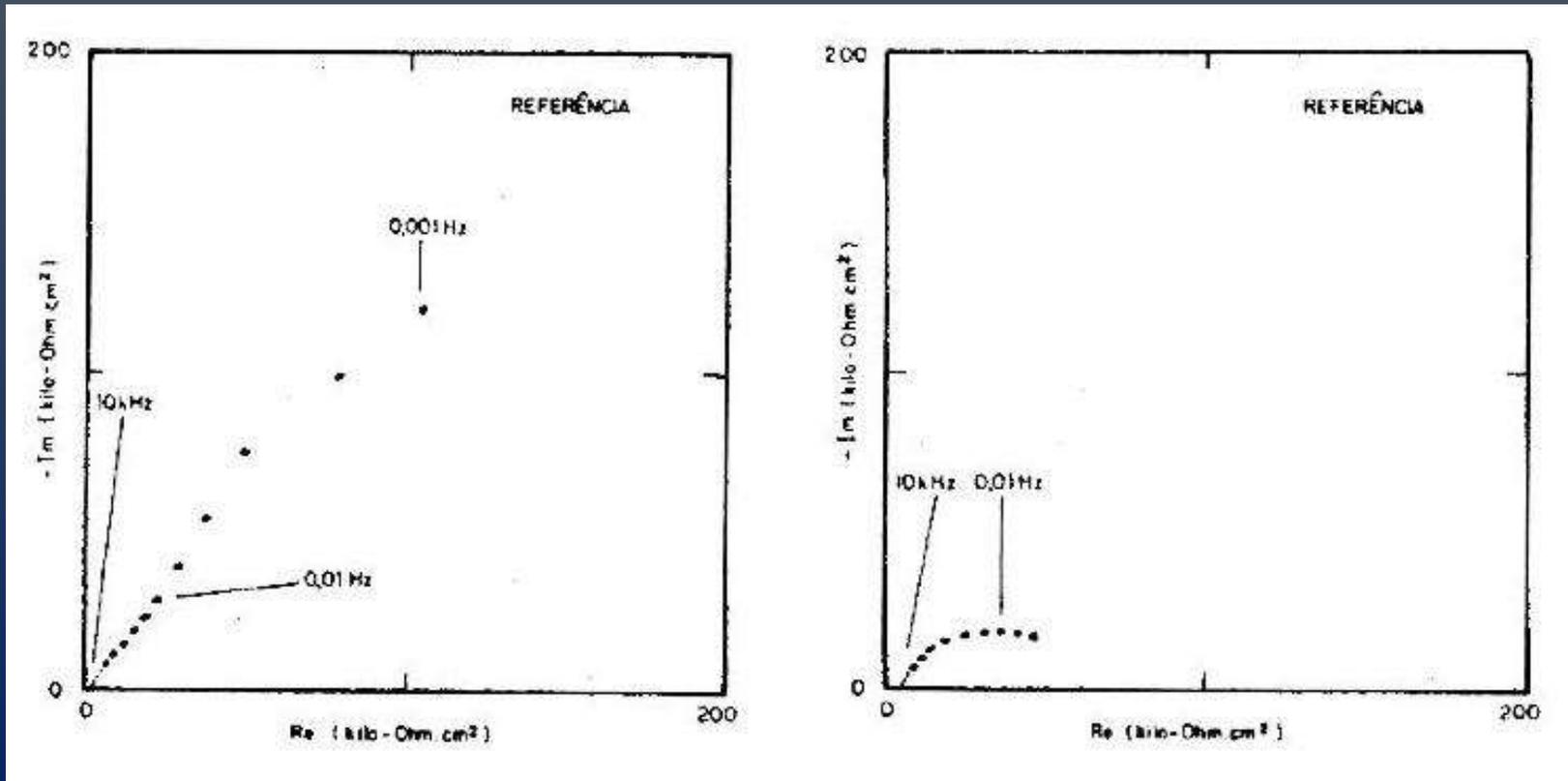
*Diagrama de Nyquist (a) e Bode (b), referentes ao circuito equivalente de RANDES, 1947.*



# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

## IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

*Uso da técnica de Impedância para avaliação da corrosão (FIGUEIREDO, 1994).*



# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

---

## MEDIDA DE INTENSIDADE GALVÂNICA

Para medir a intensidade galvânica ( $I_g$ ) que circula em uma pilha de corrosão, existem vários métodos. MANSFELD (1970), FRAUNHOFER (1972), apud MARIBONA (1991) foram os primeiros pesquisadores que ampliaram o uso do potenciostato para medir a Intensidade Galvânica em estruturas de concreto.

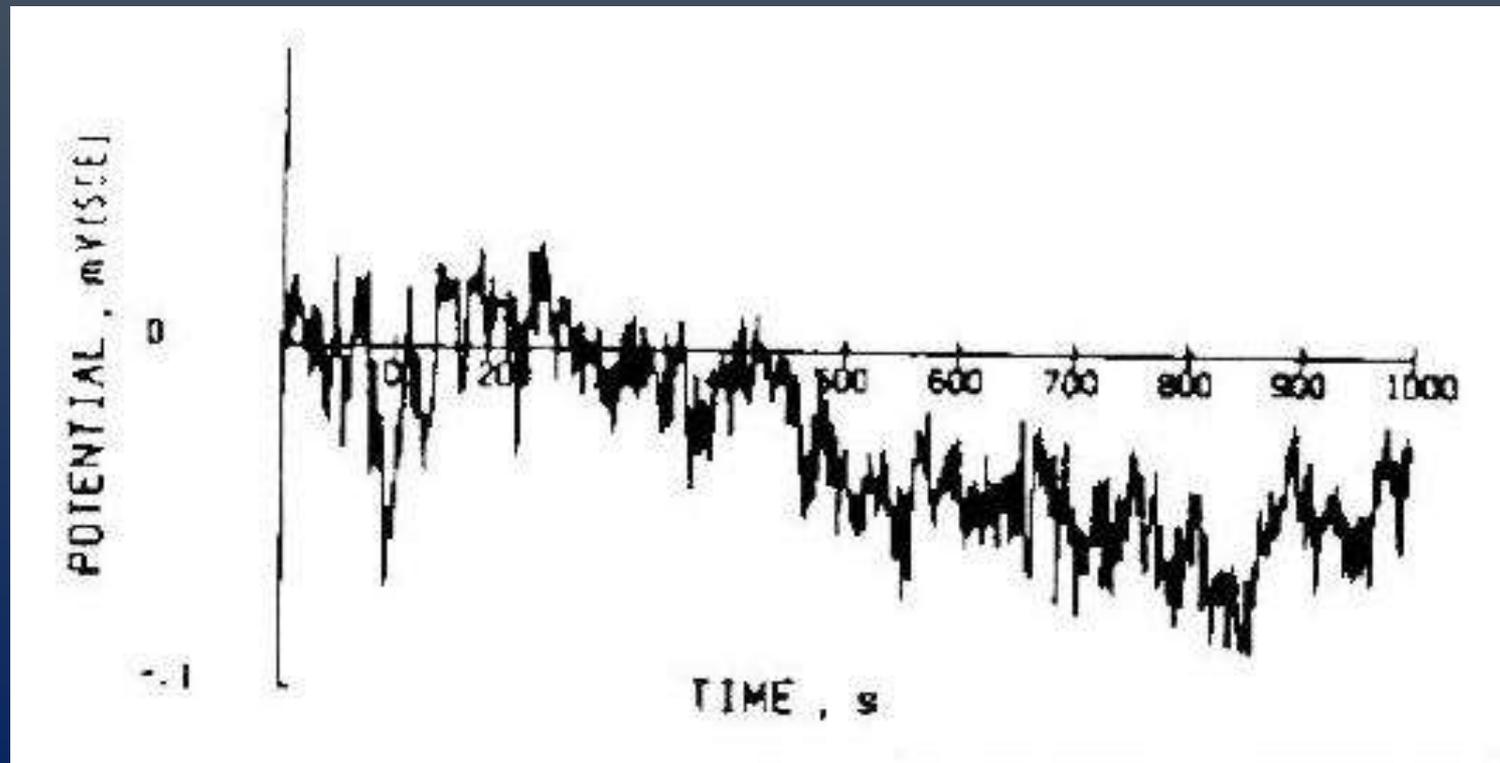
A técnica consiste em aplicar uma diferença de potencial nula entre o eletrodo de trabalho e o de referência, que, por sua vez, encontra-se curto-circuitado ao contra eletrodo. A corrente indicada diretamente no potenciostato é a Intensidade Galvânica, que circula através dos dois tramos conectados ao potenciostato. De uso restrito ao laboratório, essa técnica é importante no estudo das macro-pilhas de corrosão. Um exemplo que vem sendo regularmente estudado é a influência do tamanho do cátodo na velocidade de corrosão do ânodo.

# TÉCNICAS IMPORTANTES NO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

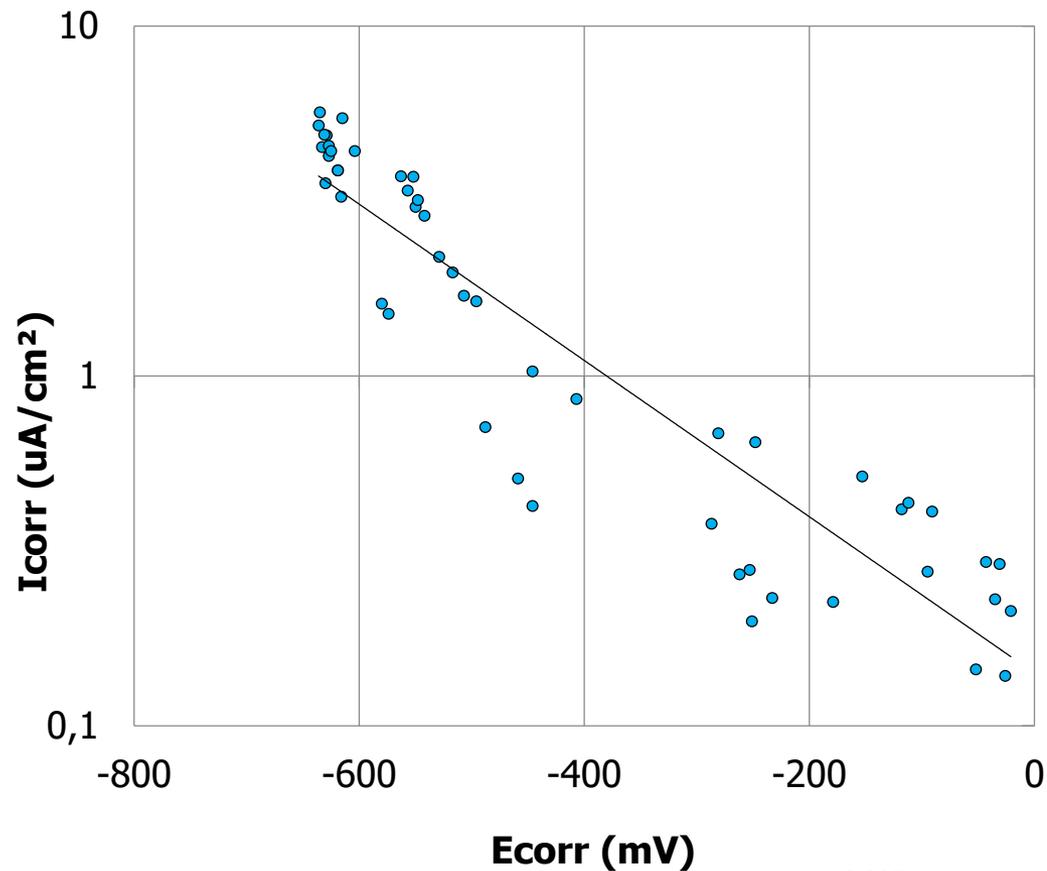
---

## RUÍDO ELETROQUÍMICO

*Flutuações do potencial em corpos-de-prova de concreto com cloretos (HARDON et al, 1988).*



# Potencial X Densidade de Corrente Escala



$$y = 0,1416e^{-0,005x}$$

$$R^2 = 0,8547$$

$$R = 0,9245$$



**Correlação muito forte**

# ARQUIBANCADA DO ESTÁDIO BEIRA RIO



**Antes**



**Antes**



**Antes**



**Depois**



**Depois**



**Depois**

# Exemplo numérico para o caso das arquibancadas do estádio Beira Rio

	20.000 $\Omega \cdot \text{cm}$	5.000 $\Omega \cdot \text{cm}$
$E_{\text{corr}}$ (mV, Cu/SO <sub>4</sub> Cu)	-120	-450
$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,04	0,40

# OBRIGADO

# PELA ATENÇÃO

**[epazini@terra.com.br](mailto:epazini@terra.com.br)**

**epazini1 (Skype)**

**Linkedin: Enio Pazini Figueiredo**