

Nº 179724

Corrosão de estruturas de concreto: fundamentação teórica e procedimentos de ensaios e análises aplicáveis em campo e em estudos laboratoriais

Adriana de Araujo

*Palestra apresentada no
CONGRESSO
INTERNACIONAL DE
CORROSÃO, INTERCORR,
10., 2025, São Paulo. 27
slides*

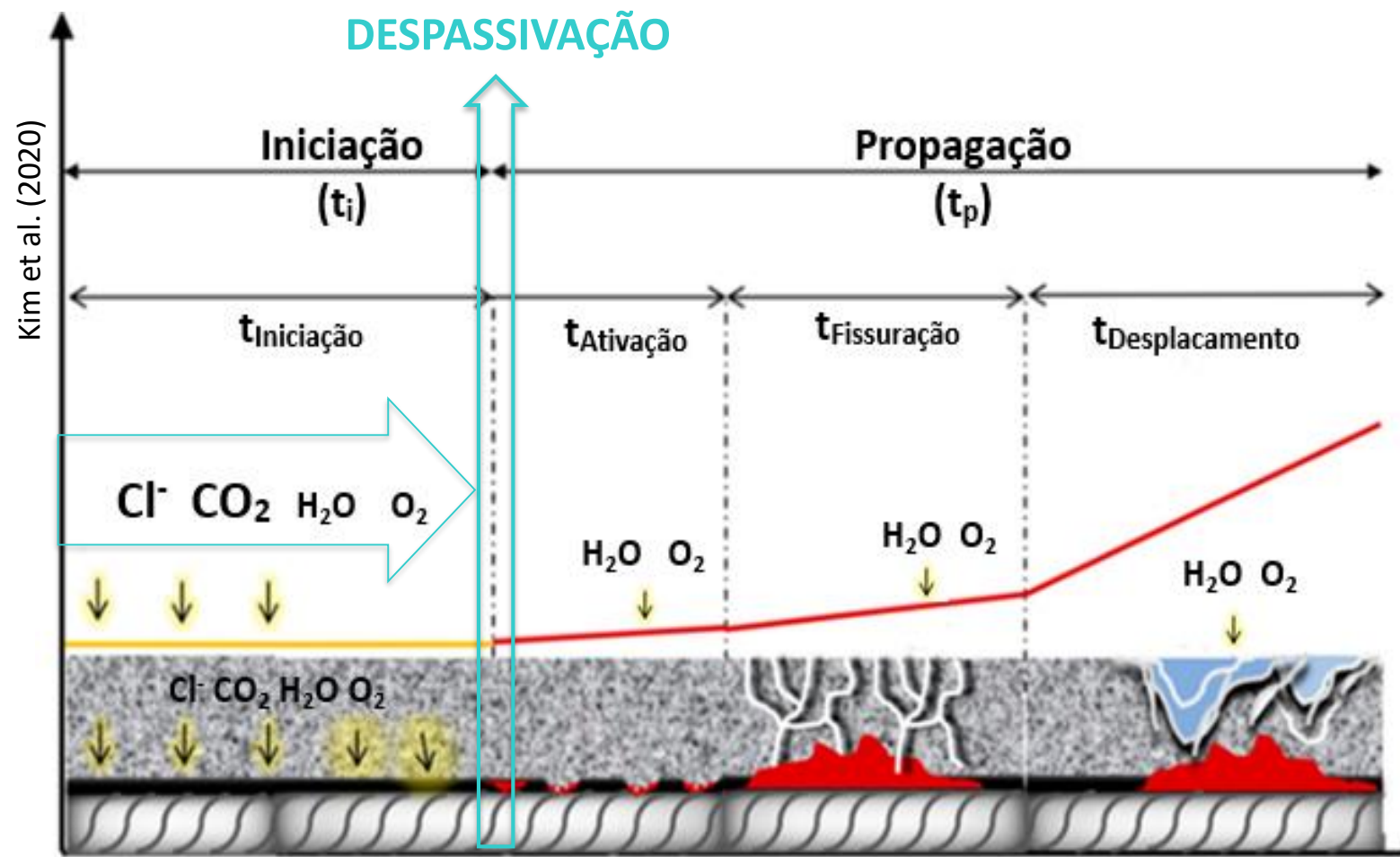
“Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **PROIBIDO REPRODUÇÃO**

CORROSÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO: fundamentação teórica e procedimentos de ensaio e análises aplicáveis em campo e em estudos laboratoriais

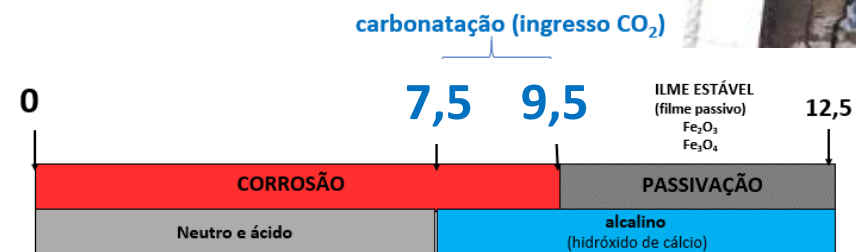
ADRIANA DE ARAUJO

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT
Laboratório de Corrosão e Proteção - LCP

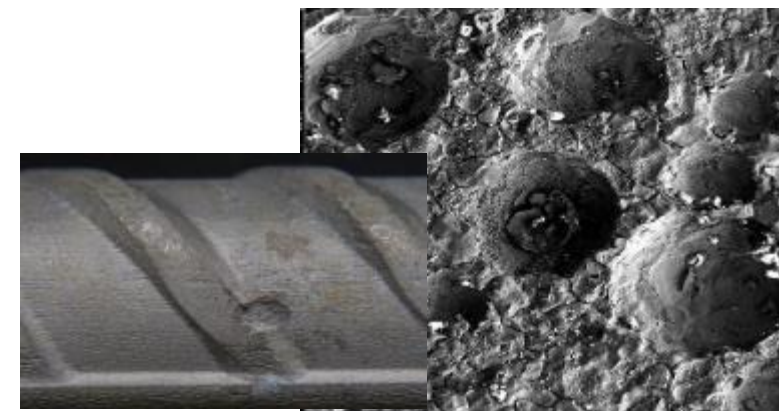
CONCRETO ARMADO – VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS SOB O PONTO DE VISTA DA CORROSÃO



CO_2



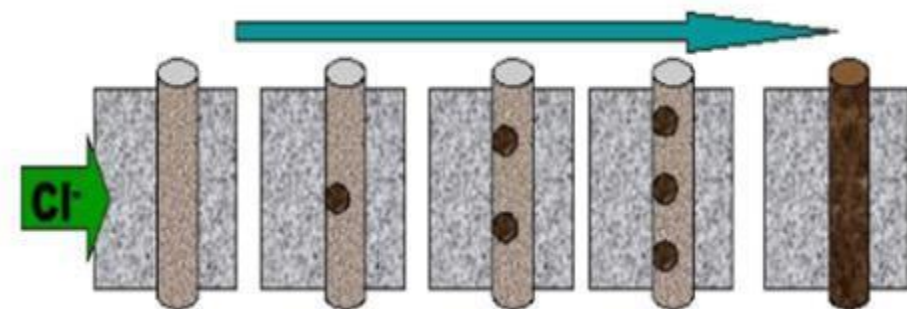
Cl^-



TEMPO DE INICIAÇÃO
Ingresso de fluidos e substâncias agressivas – despassivação da armadura

TEMPO DE ATIVAÇÃO
Corrosão incipiente (ESTADO ATIVO)

TEMPO DE PROPAGAÇÃO - FISSURAÇÃO E DESPLACAMENTO
Deterioração progressiva do concreto (avanço da PENETRAÇÃO DA CORROSÃO (P_x e P_{pit}))



Andrade (2013)



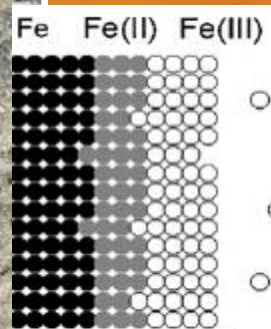
CONDIÇÕES DE USO, SOLICITAÇÕES, MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO



CONCEPÇÃO DO PROJETO, CONTROLE DOS MATERIAIS, EXECUÇÃO, CURA, TRANSPORTE

CORROSÃO

Interação físico-química entre um material metálico e seu ambiente que resulta em mudanças nas propriedades do metal e que pode levar a um comprometimento significativo da função do metal, do ambiente ou do sistema técnico inserido



CORROSÃO DO AÇO-CARBONO

NA ATMOSFERA: camada irregular, pouco aderente e volumosa que não protege o metal → produtos parcial ou totalmente solúveis (metalurgia reversa).

NO CONCRETO (meio alcalino): camada densa e aderente que protege contra a corrosão

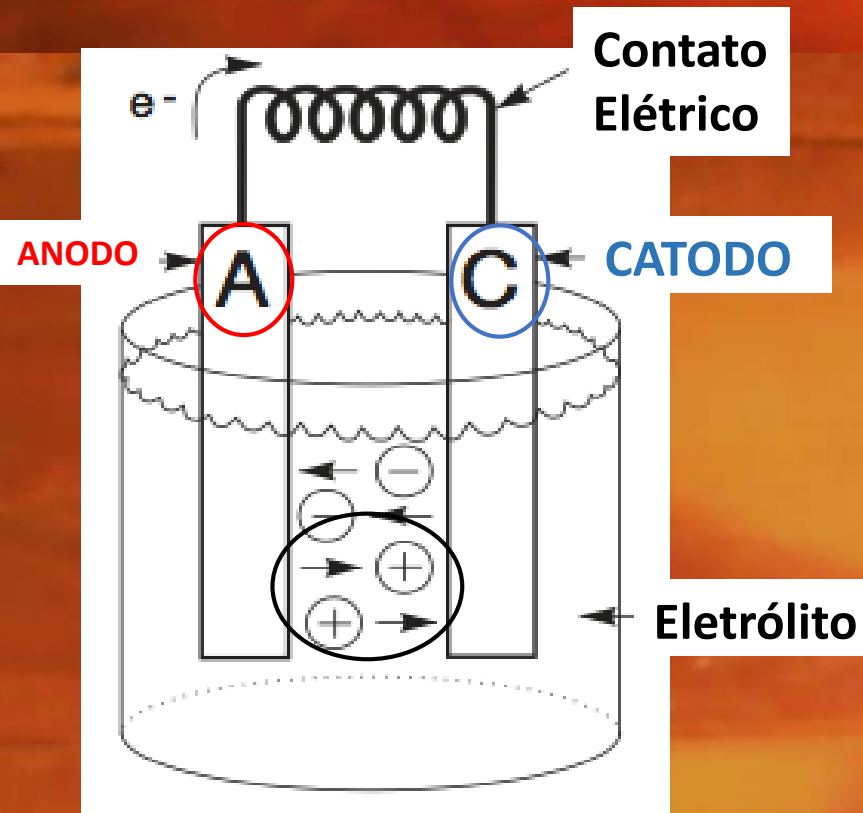
→ **(FILME PASSIVO).**

Se o filme for rompido → corrosão semelhante à atmosférica.

Riscos à passivação: presença de cloretos ou carbonatação ($\downarrow$ pH)

CORROSÃO - ELEMENTOS FUNDAMENTAIS

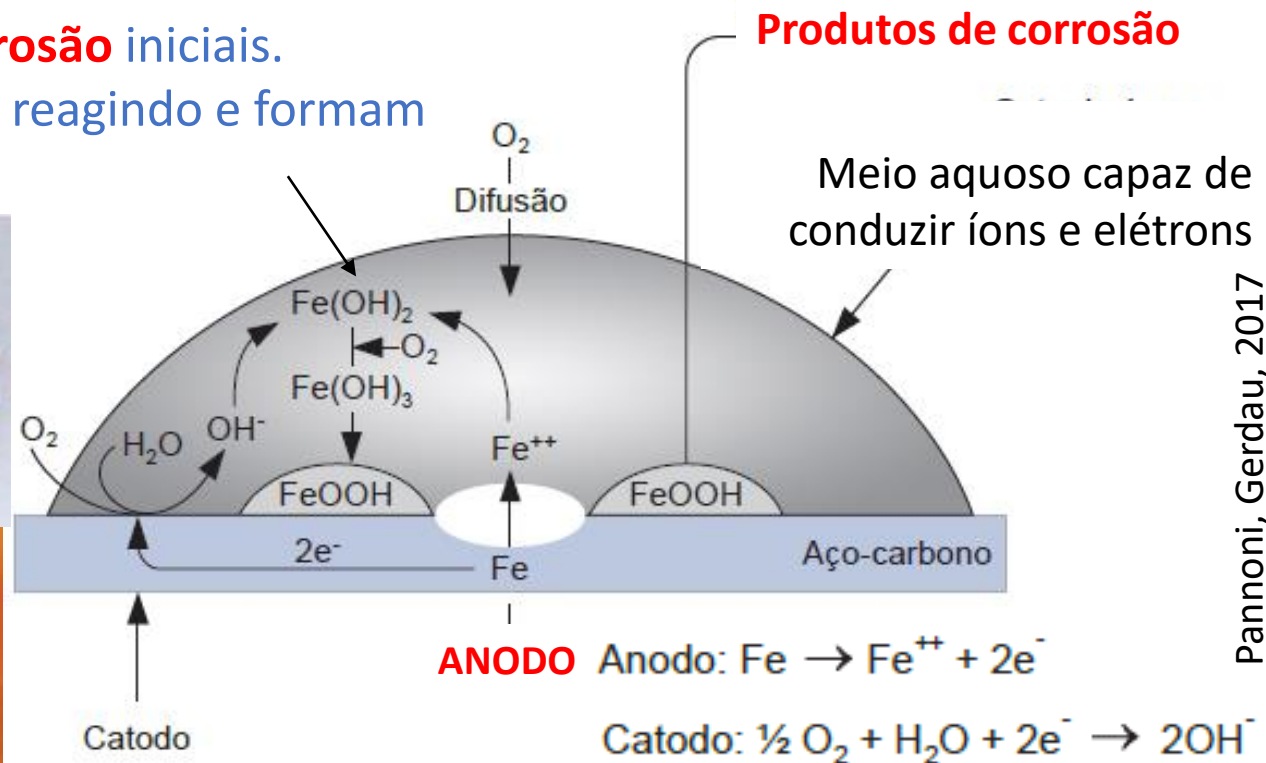
- **Anodo (A):** local onde ocorre a reação de oxidação (corrosão)
- **Catodo (C):** local onde ocorre a reação de redução (ganha elétrons)
- **Eletrólito:** meio em que se encontram tanto o anodo como o catodo
- **Contato elétrico:** condução de íons no eletrólito e eletrônica no metal



OH^- se movimenta na água, encontram os Fe^{++} e formam os **produtos de corrosão** iniciais. Esses continuam reagindo e formam novos produtos.



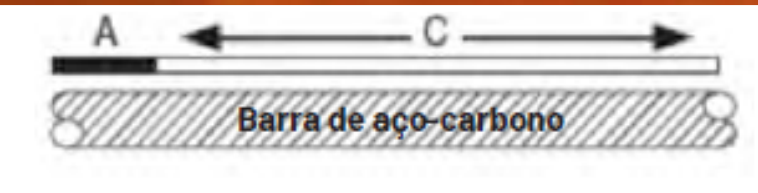
(Wartha, Guzzi Filho e Jesus, 2012)



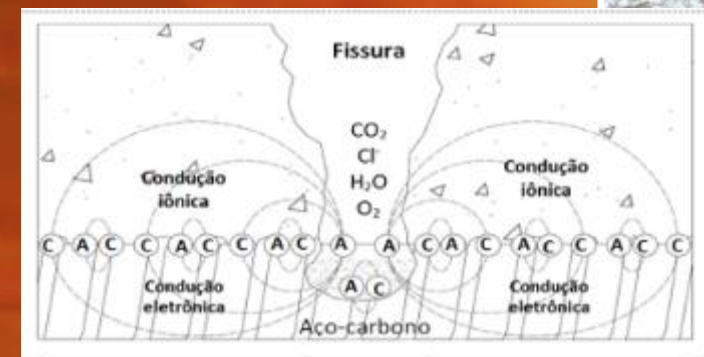
CORROSÃO DO AÇO-CARBONO EM CONCRETO



CÉLULAS DE AÇÃO LOCAL: mais conhecidas como **MICROCÉLULAS DE CORROSÃO**, as quais são caracterizadas pela distância microscópica entre as áreas C (Catodo) e A (Anodo).



CÉLULA OCLUSA: mais conhecida como **MACROCÉLULA DE CORROSÃO** e corrosão galvânica, em que as áreas C e A se encontram fisicamente separadas e são macroscopicamente visíveis.



CORROSÃO DO AÇO-CARBONO EM CONCRETO

ENSAIOS DE CAMPO E LABORATORIAIS

- Inspeção visual, espessura de cobrimento, percussão
- Exame da armadura e medida do diâmetro efetivo
- Frente de carbonatação
- Frente de penetração de cloreto e coleta de amostras
- Resistividade elétrica e Teor de umidade
- Potencial de circuito aberto

- Especificação IFB.ETHZ
- Norma DIN EN 480
- Norma UNE 83992-2
- Normas ASTM A955 e ASTM G109 e Barkey Especificação M-82 e Powers (2010)
- Metodologias IPT:
 - ataque de cloreto – ensaio em solução/areia
 - carbonatação – ensaio CP armado

INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Conjunto de **procedimentos técnicos e especializados** que compreendem a coleta de dados necessários à formulação de um diagnóstico e prognóstico da estrutura, visando **manter ou reestabelecer** os requisitos de **segurança estrutural**, de **funcionalidade** e de **durabilidade**

- **Análise de documentos e evidências:** projeto estrutural, características construtivas, especificação dos materiais e de técnicas de proteção, histórico de inspeções, intervenções e outras informações
- **Inspeção visual:** acompanhamento da evolução de mecanismos de deterioração, detecção de danos e falhas em componentes e outras ações específicas de cada obra e requeridas pelo contratante.
- **Ensaio, análises e coletas de amostras:** definidos para complementar a inspeção visual e/ou especificados pelo contratante.

Análise qualitativa que pode fornecer até 80 % das informações de maior significado para a gestão das obras!



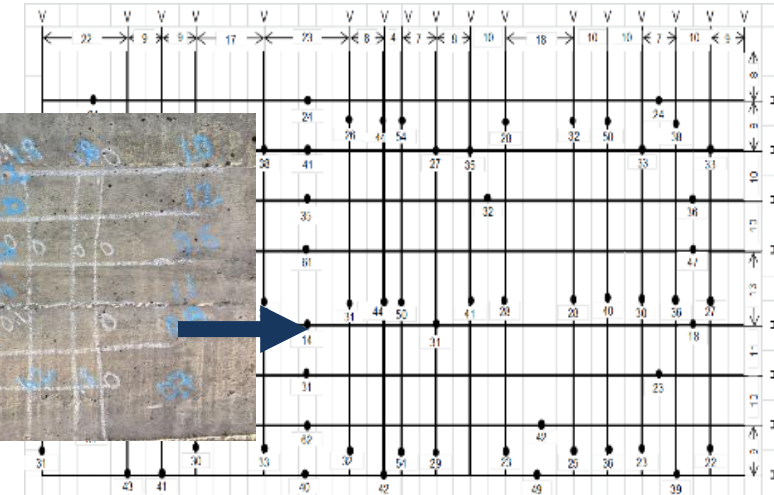
INSPEÇÃO VISUAL EM ÁREA DETALHADA - ESPESSURA DE COBRIMENTO e PERCURSÃO

Seleção de áreas próximas das de extração de testemunhos!

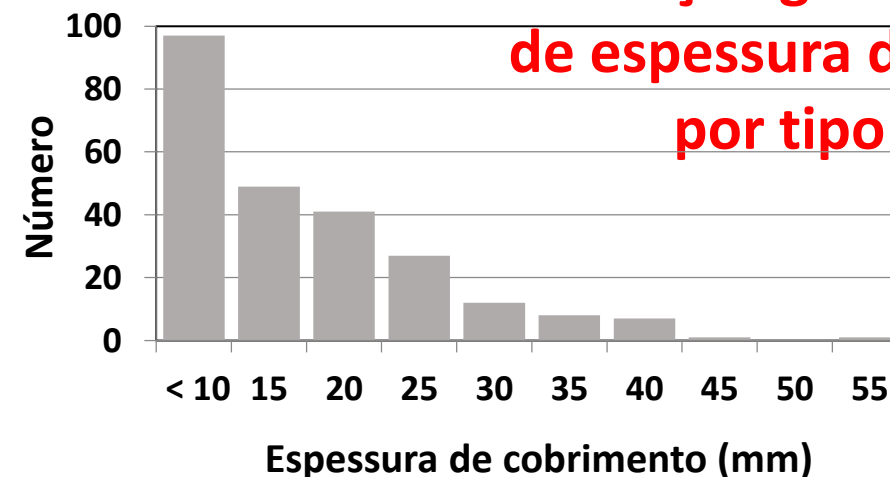


Áreas de maior heterogeneidade são as de maior risco de corrosão!

Elementos/áreas de cobrimento deficiente são as de maior risco de corrosão!



Avaliação global dos valores de espessura de cobrimento por tipo de elemento!



EXAME ARMADURA, FRENTE DE CARBONATAÇÃO E CONTAMINAÇÃO COM CLORETOS



Solução de fenolftaleína indica uma linha intermediária de diminuição de pH, não contemplando o início da despassivação da armadura!

Avaliação do estado ativo e passivo, espessura de cobrimento e diâmetro efetivo!

Solução de nitrato para avaliar profundidade de contaminação com cloretos e determinação de teor/perfil em material pulverulento!

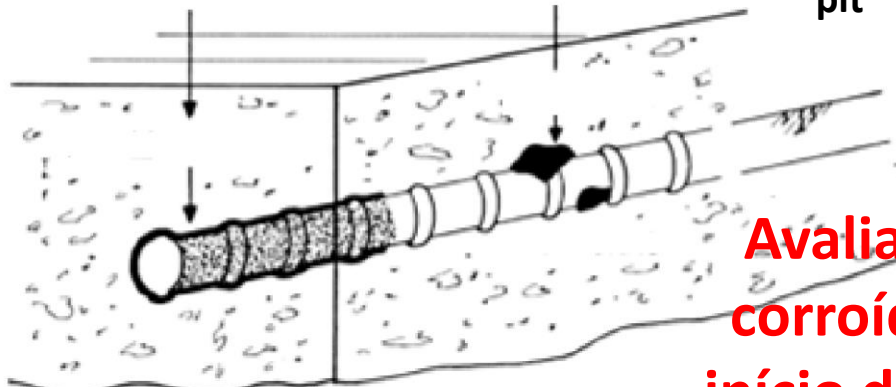
DIÂMETRO EFETIVO e PENETRAÇÃO DA CORROSÃO



P_{pit}

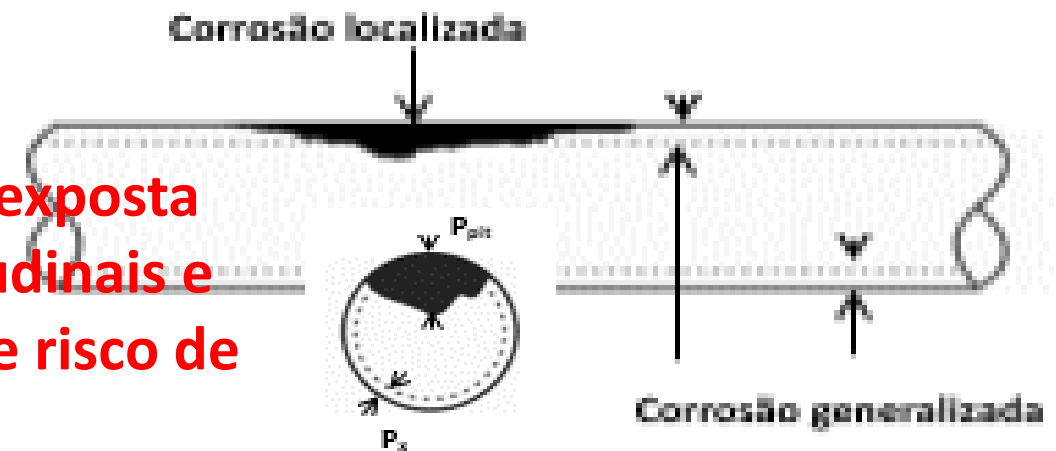
Carbonatação - P_x

Cloretos - P_{pit}



**Avaliação de armadura exposta
corroída, fissuras longitudinais e
início de deslocamento e risco de
corrosão!**

$$\rightarrow \varnothing_r = \varnothing_o - (P_x \cdot \alpha)$$



POTENCIAL DE CORROSÃO

O estado eletroquímico é avaliado por meio de uma série de medidas de PCA:

- Medidas seguindo uma **grade desenhada** na superfície do concreto para posterior elaboração de **mapa de gradiente de valores**;
- Medidas pontuais (valores absolutos).

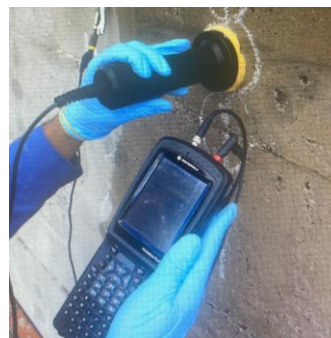
O mapa permite a localização e a frequência de áreas de risco de corrosão, o que é importante para a definição das medidas de reabilitações!



Ag/AgCl (KCl 0,5 mol/L)



MnO₂(NaOH 0.5 mol/L)

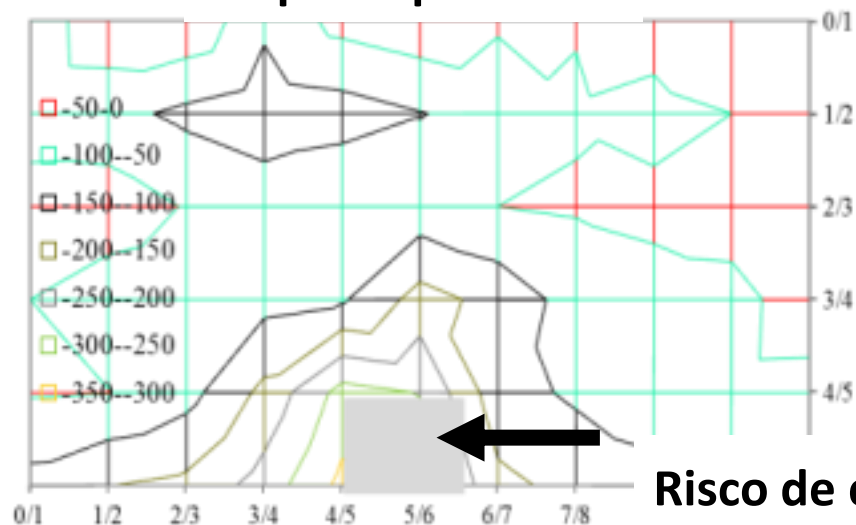


Ag/AgCl

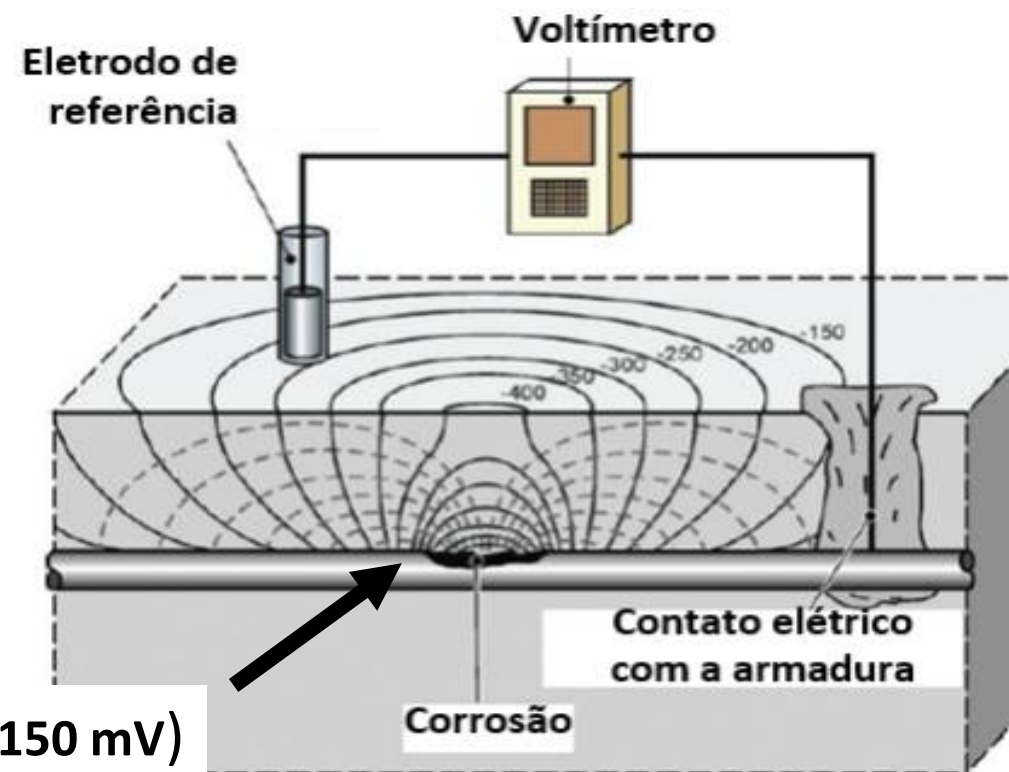


Cu/CuSO₄

Mapa de potencial



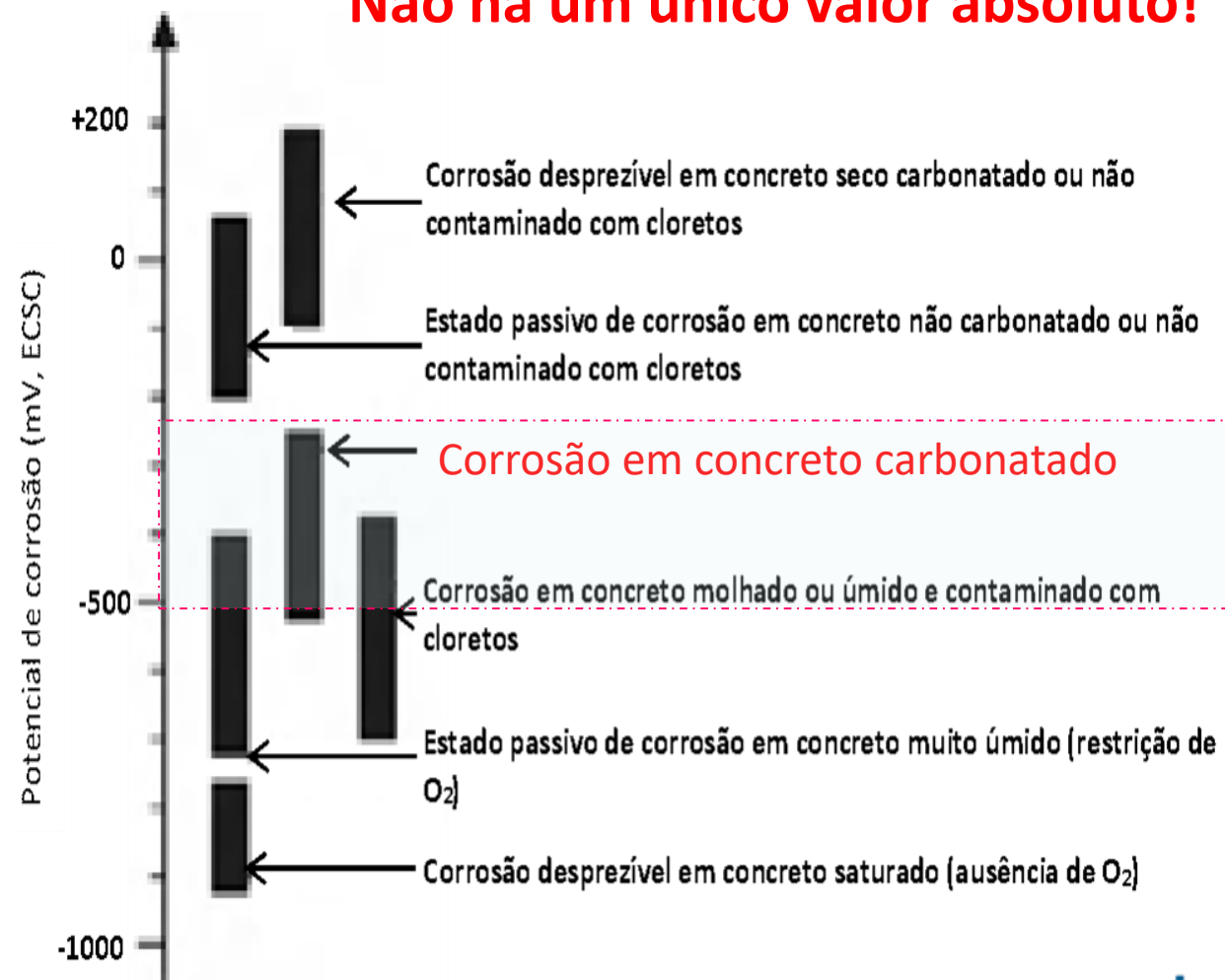
Risco de corrosão - valores de PCA (≥ 150 mV)



POTENCIAL DE CORROSÃO

O critério de avaliação depende das condições do concreto!
Não há um único valor absoluto!

Condição do concreto	UR provável (%)	Estado provável do aço-carbono	Valores de PCA (mV)	
			Eletrodo -ECSC Cu/CuSO ₄ sat.	Eletrodo - EPCP Ag/AgCl/KCl sat.
Concreto saturado	> 98	Estado ativo com taxa de corrosão desprezível (restrição de acesso O ₂).	-900 a -1000	-791 a -891
Concreto molhado e contaminado com Cl ⁻	85 a 98	Estado ativo com taxa de corrosão elevada em concreto muito úmido.	-400 a -600	-291 a -491
Concreto úmido e livre de Cl ⁻	65 a 85	Estado passivo em concreto levemente molhado.	+100 a -200	+209 a -91
Concreto úmido e carbonatado		Estado ativo com taxa de corrosão de baixa a média intensidade em concreto levemente molhado.	+100 a -400	+209 a -291
Concreto seco carbonatado	45 a 65	Estado ativo , mas com taxa de corrosão desprezível ou baixa em concreto pouco molhado.	+200 a 0	+309 a +109
Concreto seco		Estado passivo.		

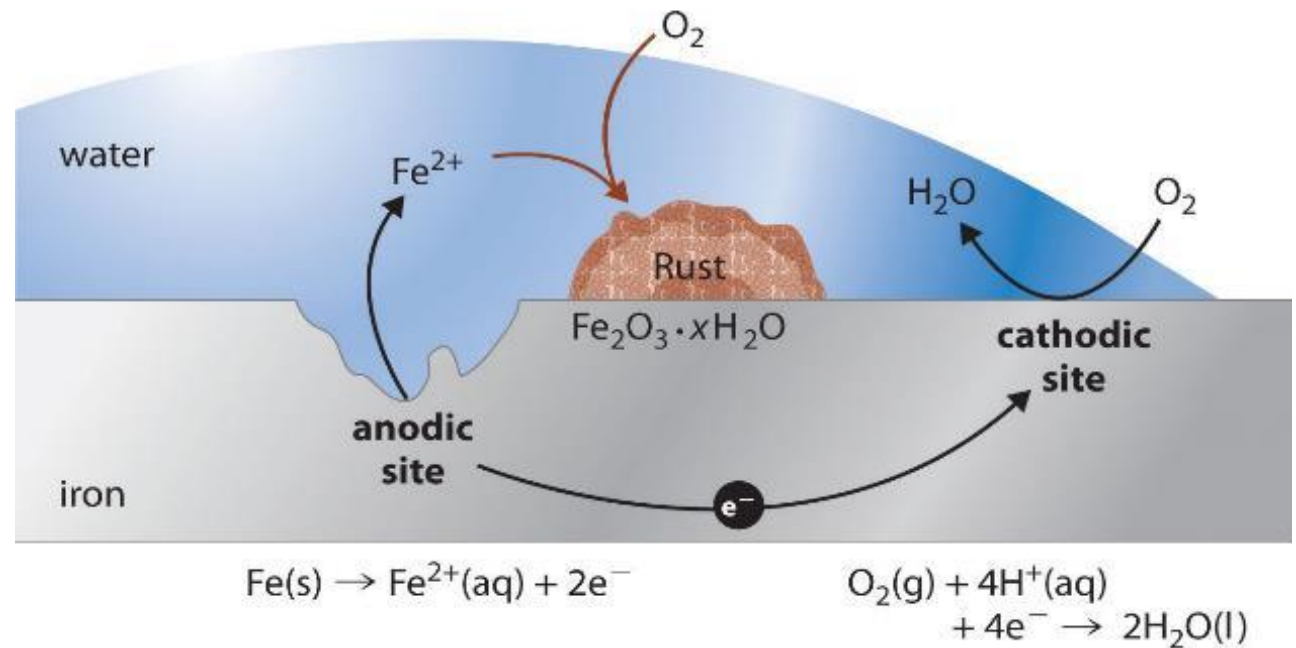
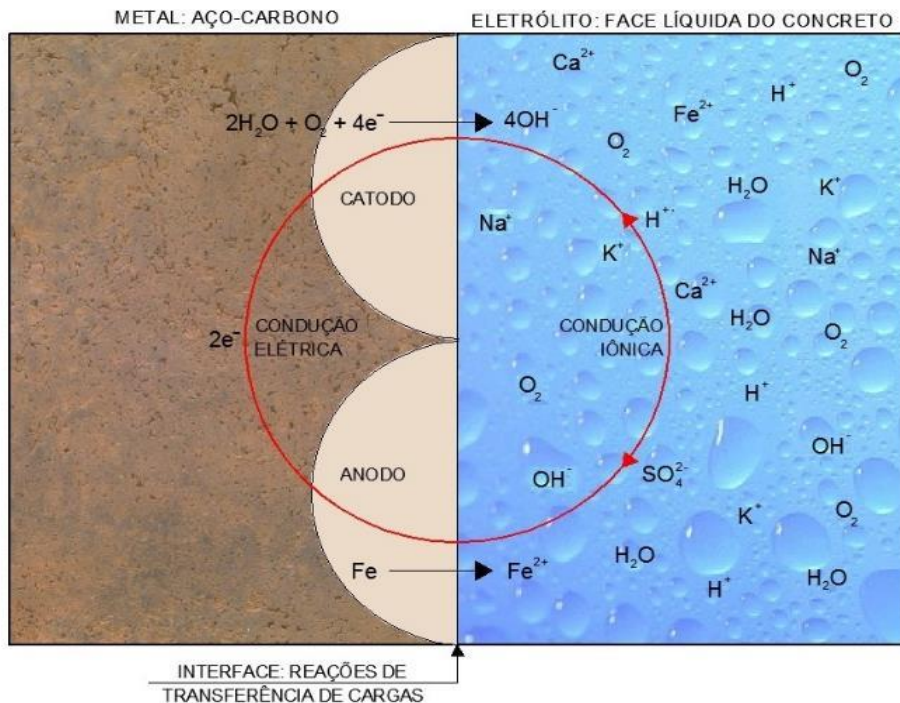


RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Está relacionada com a vida útil das estruturas tanto no tempo de iniciação (t_i) como no de propagação (t_p):

t_i = medição periódica pode indicar alteração do teor de umidade do concreto e, indiretamente, a **penetração de íons cloreto**.

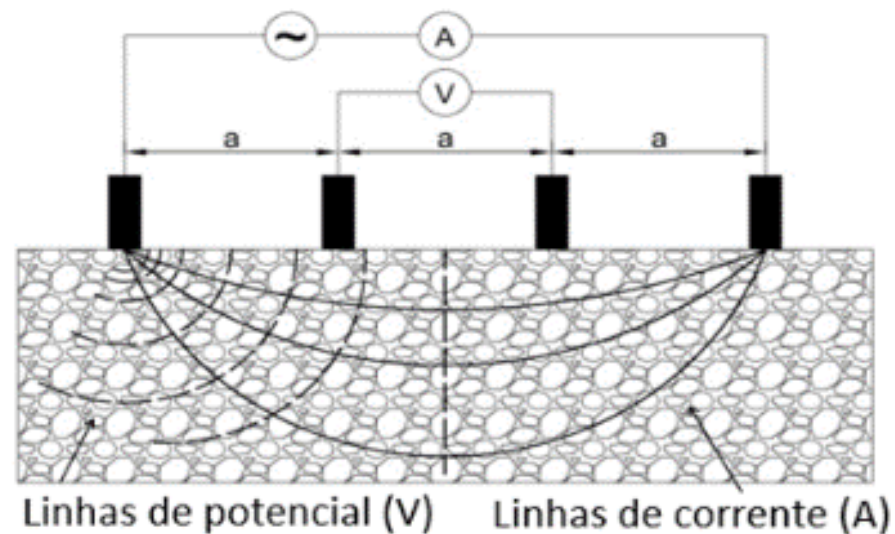
t_p = estimar o risco e a intensidade da corrosão: a corrosão é quase certa e severa se a resistividade elétrica do concreto for baixa e a armadura estiver despassivada.



RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Medição ao longo da área selecionadas, com prévio conhecimento do posicionamento da armadura

- Aplica-se uma corrente elétrica (I) entre os dois eletrodos externos e mede-se a diferença de potencial (ΔV) estabelecida pelo campo elétrico gerado no concreto entre os dois eletrodos internos.
- Aplica-se uma corrente elétrica entre os eletrodos, inseridos no concreto perfurado, e mede-se a diferença de potencial.



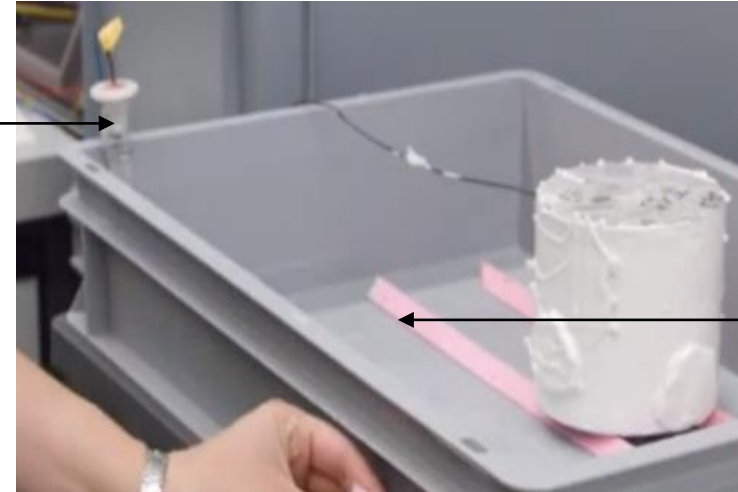
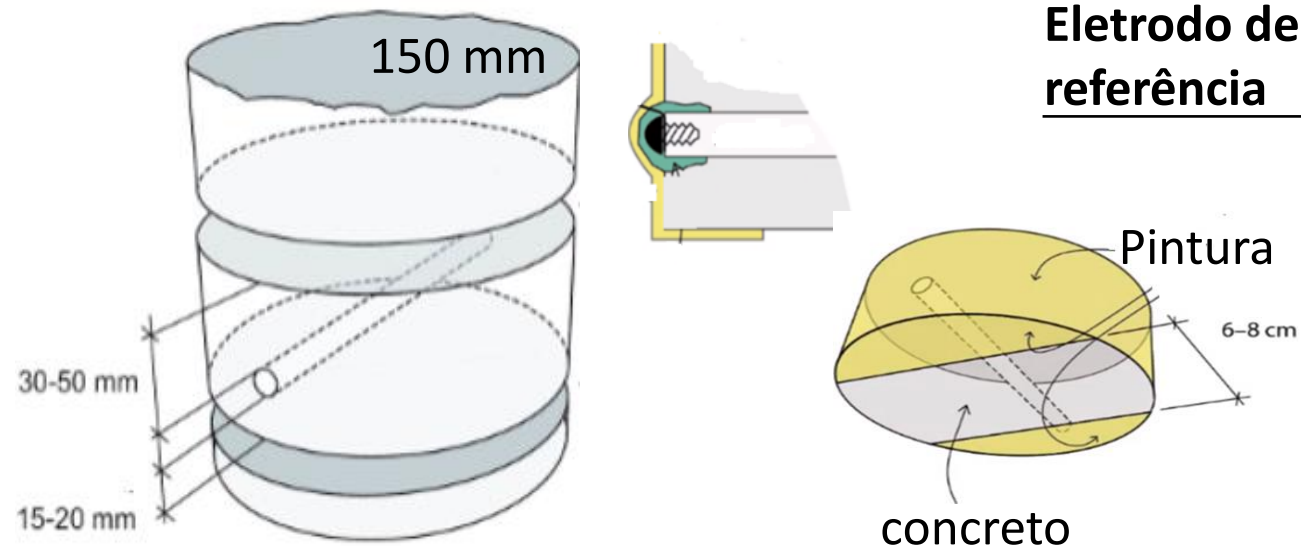
Valores de resistividade elétrica do concreto (kΩ·cm)				Risco de corrosão
González et al. (2004)	CONTECVET (2001)	CEB 192 (1989)	Broomfield (2007)	
<20	<10	< 5	< 5	Muito alto (a resistividade não é o parâmetro controlador da taxa de corrosão)
20 a 50	10 a 50	5 a 10	5 a 10	Alto (alta taxa de corrosão)
		–	10 a 20	Moderado (alta taxa de corrosão)
50 a 100	50 a 100	10 a 20	20 a 100	Baixo (taxa de corrosão baixa)

CORROSÃO DO AÇO-CARBONO EM CONCRETO

ENSAIOS LABORATORIAIS

- Especificação IFB.ETHZ
- Norma DIN EN 480
- Norma UNE 83992-2
- Normas ASTM A955 e ASTM G109 e Barkey Especificação M-82 e Powers (2010)
- Metodologias IPT:
 - ataque de cloreto – ensaio em solução/areia
 - carbonatação – ensaio CP armado

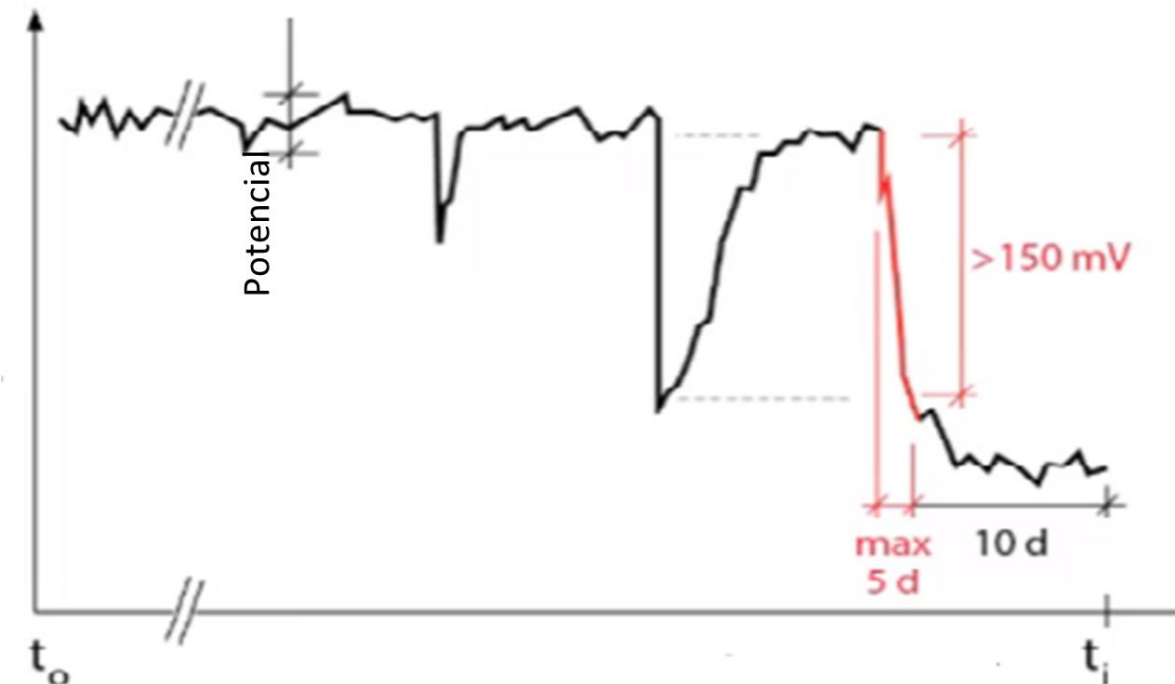
METODOLOGIA IFB.ETHZ - ANGST et al. (2017)



Imersão parcial:

- água livre de Cl^-
- 3,5 % de NaCl
- 7,0 % de NaCl
- 10,0 % de NaCl

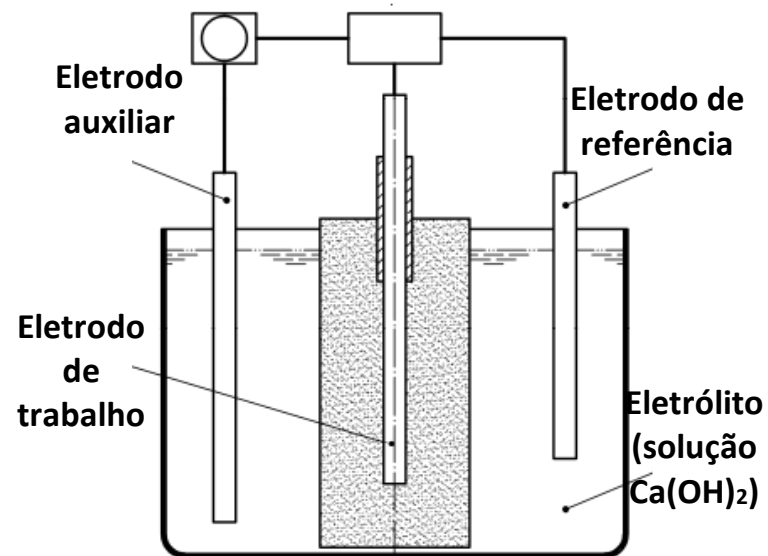
ca. ± 30 mV



Ensaio de corrosão considerando as propriedades reais do concreto e as suas condições reais e da interface com a armadura:

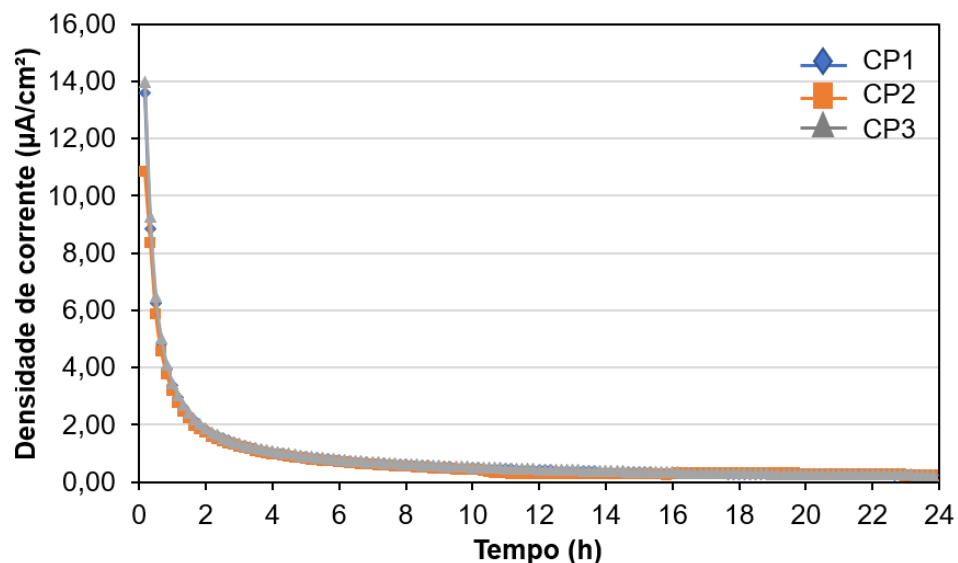
- Medida do **PCA** e determinação do teor crítico de cloreto para a despassivação
- Os resultados podem ser adotados em modelo de previsão probabilística para prever a despassivação de elementos da estrutura

METODOLOGIA DIN EN 480



Ensaio de corrosão para avaliar a influência da presença de aditivos na composição de materiais cimentícios:

- Potencial da armadura é elevado e mantido constante por 24 h. Com a polarização (potenciostática anódica), qualquer efeito prejudicial do aditivo será detectado (aumento da corrente de corrosão, em valores superiores à obtida no material de controle (sem aditivo)).



- Corpos de prova cilíndricos de 6 cm de diâmetro com uma barra central de aço-carbono (6 a 8 mm de diâmetro).
- Imersão em solução simulada de água de poros – SSAP para estabilização do **PCA** e posterior polarização: 500 ± 5 mV, vs. eletrodo de hidrogênio (equivalente a 290 ± 5 mV, eletrodo de prata 3 mol/L)
- Monitoramento da corrente de polarização, a ser convertida em densidade de corrente de corrosão, determinada no início do ensaio (após 1 h) e ao seu término (24 h) do ensaio.

Avaliação de composições de concreto, adição de inibidores de corrosão e barra de aço comum, aços especiais e aço galvanizado.

- Determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns} , cm^2/s) para um tempo de despassivação (t_{lag} , s) da barra em determinada espessura de cobrimento (e , cm):

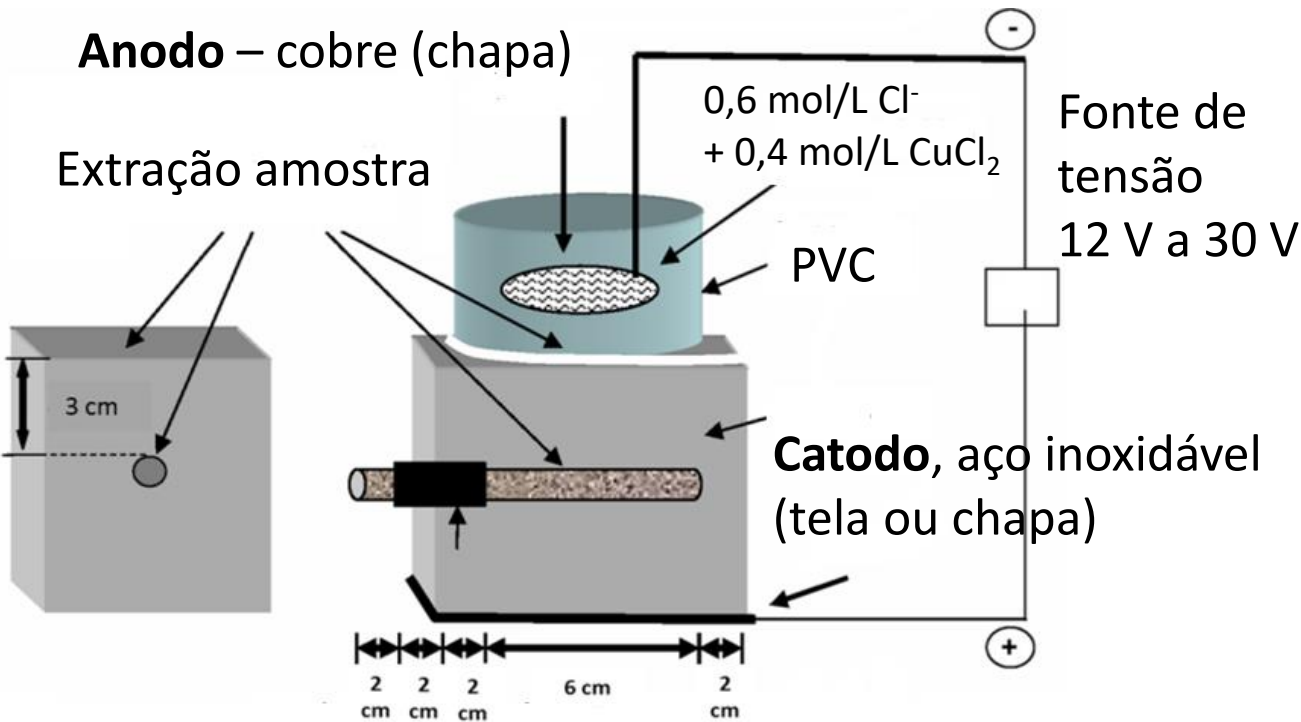
$$\partial = \frac{zF}{RT} \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \cdot t_{lag} \partial}$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta V}{L}$$

Anodo – cobre (chapa)

Extração amostra

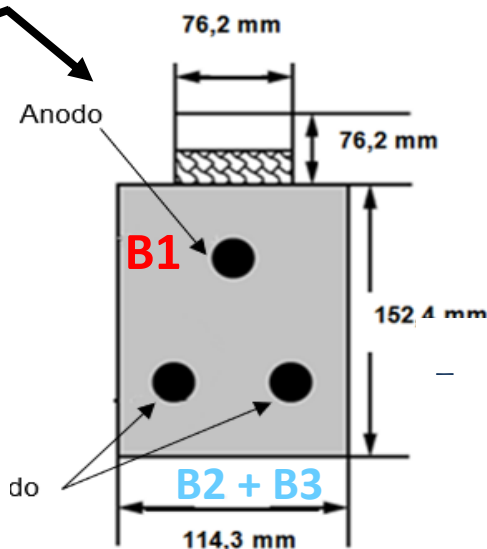
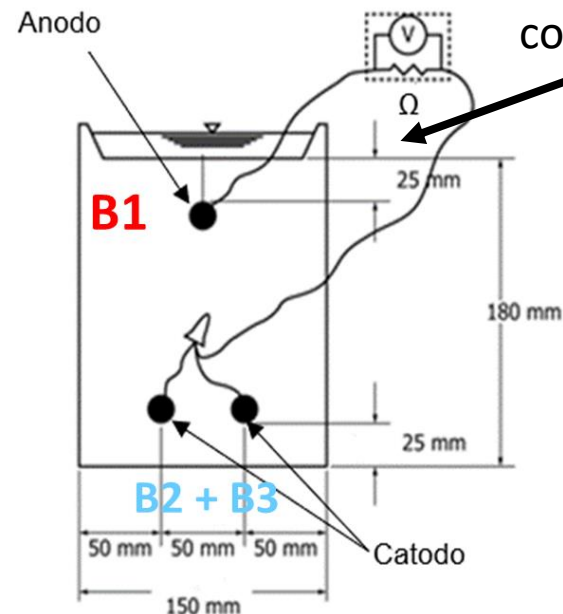


- Determinação da taxa de corrosão (i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) natural ou acelerada pela técnica de resistência de polarização.

METODOLOGIA ASTM A955 e ASTM C109

Solução NaCl, com ciclos de 2 semanas de contaminação e 2 semanas secagem

Ensaio de corrosão por macrocélula, considerando armadura de aços especiais (A955) e concreto com inibidor de corrosão (C876)



- Medida de **PCA** e do potencial da macrocélula (nas extremidades do resistor B1/B2+B3) com determinação da corrente circulação, seguida da carga acumulada

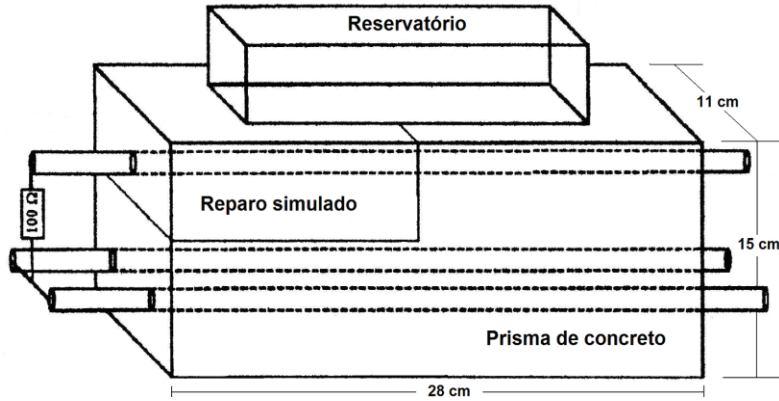
- determinação do teor crítico de cloreto (C_{crit}) para a despassivação;
- Determinação da taxa de corrosão (I_{corr} , **TC**) pela técnica de resistência de polarização e pela carga acumulada (**CA**) ao longo do tempo.

$$CA_x = CA_{x-1} + \left[\frac{(t_x - t_{x-1}) \times (I_x - I_{x-1})}{2} \right] \quad TC = \frac{11600 * V}{A * R}$$

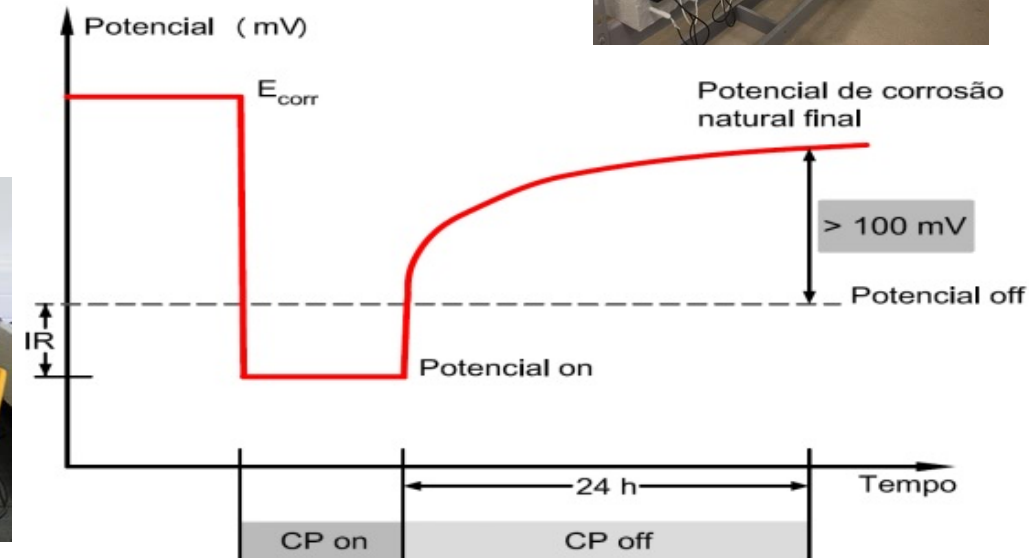
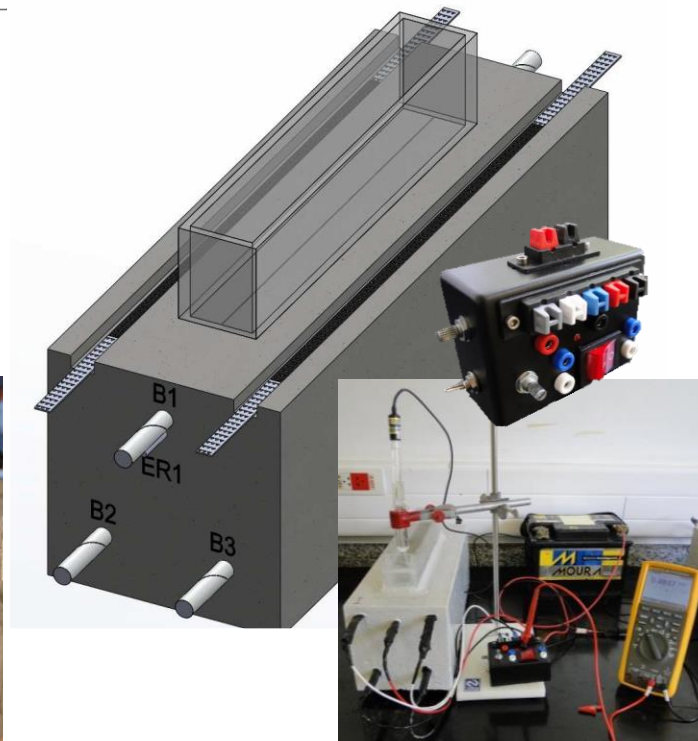


Adaptação IPT – ASTM G109 e Barkey (2004)

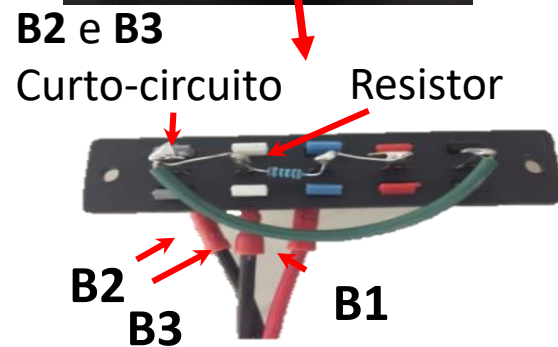
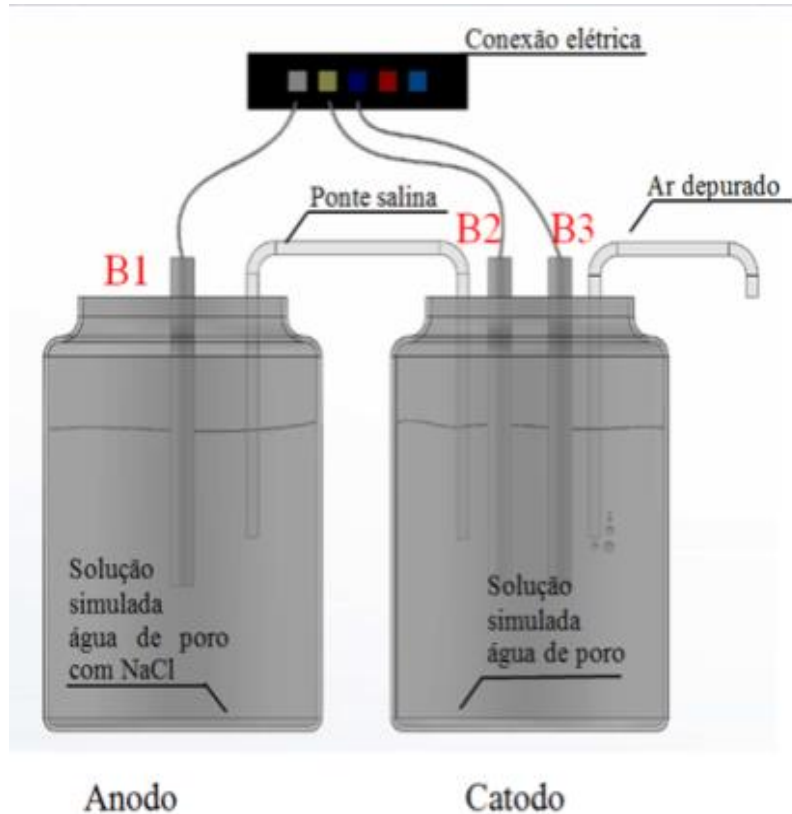
Avaliação de anodo galvânico e proteção catódica



- potencial *on* do sistema
- potencial *off* (B1 e B2 + B3)
- potencial natural (B1 e B2 + B3)
- potencial natural anodo



METODOLOGIA ASTM A955



ENSAIO EM SOLUÇÃO (MACROCÉLULA): avaliação de par galvânico entre aços especiais e comum

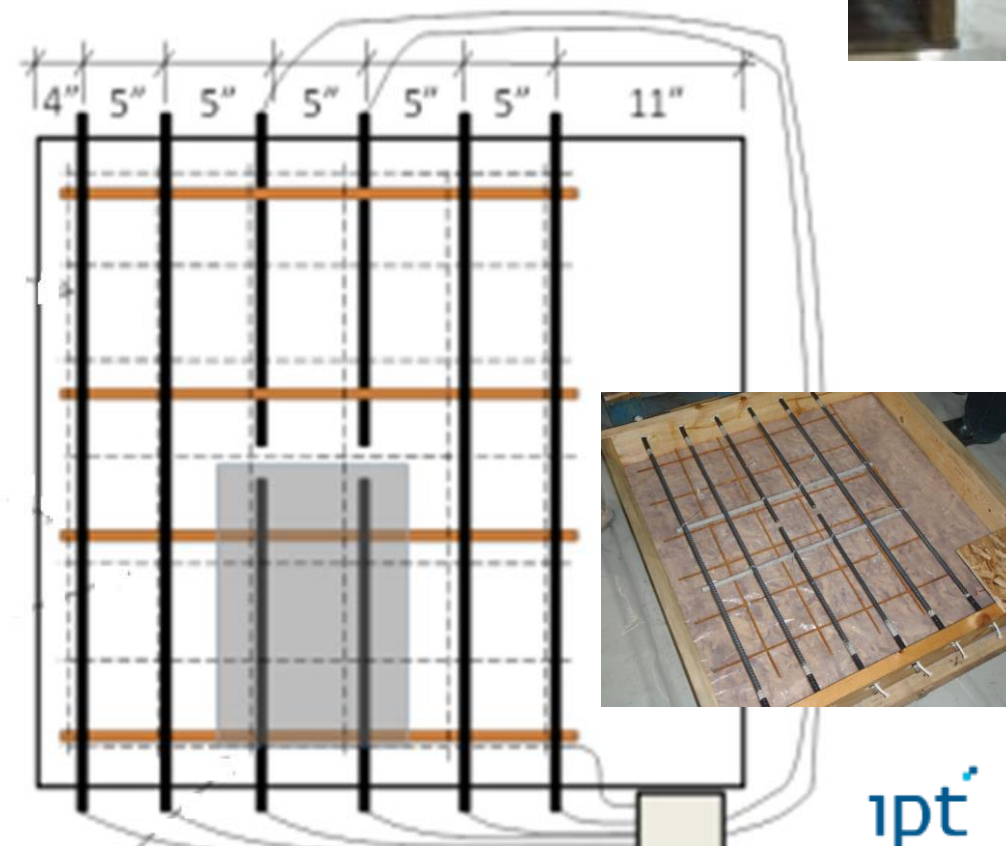
- Medida de **PCA**, do potencial da macrocélula (**B1/B2+B3**) para determinação da corrente circulante, seguida da carga acumulada

- **B1**: solução simulada de água de poros – SSAP (18.81 g/L KOH e 7.87 g/L NaOH) naturalmente aerada + 15 % NaCl
- **B2+B3**: SSAP aerada por meio injeção de ar comprimido (depurado em solução de NaOH para a remoção do CO₂)

METODOLOGIA M-82 – Emmons et al. (2014)

Ensaio de corrosão de avaliação do comportamento do sistema concreto/barra de aço para diferentes técnicas de proteção em concreto com reparo, em especial sistema com anodo galvânico

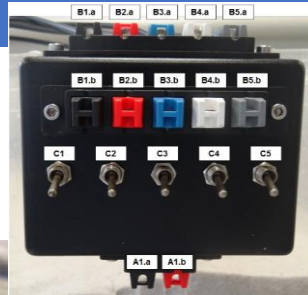
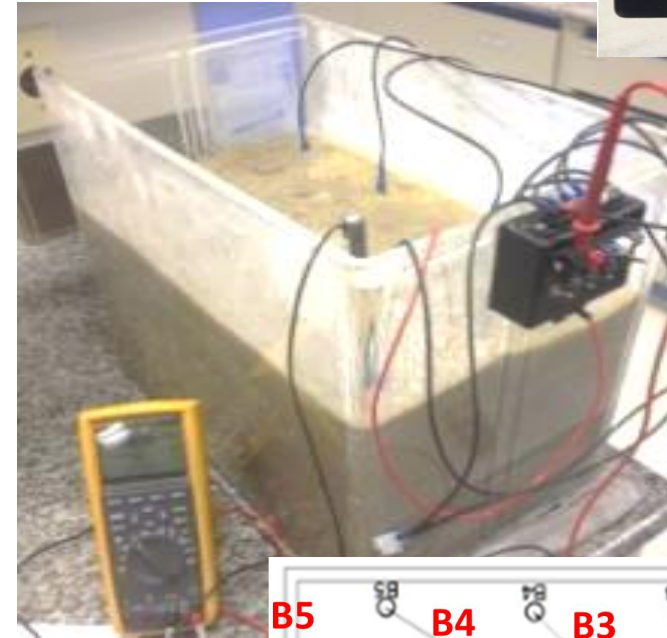
- “Laje” dimensão de 1 m x 1 m x 14 cm
- 8 barras superiores (ANODO) conectadas, 2 delas com menor espessura de cobrimento para promover corrosão e fazer o reparo localizado superficial. Malha inferior (CATODO) conecta as barras com resistor.
- Ciclos de secagem (2 semanas) e molhagem (2 semanas) com solução salina (5 % NaCl)
- Medição do potencial da macrocélula com determinação da carga acumulada
- Início da corrosão = PCA < -300 mV (ECSC) e corrente da macrocélula > 0,03 mA



Adaptação IPT - Powers (2010)

ENSAIO EM SOLUÇÃO/AREIA: comportamento de anodo galvânico

- Dimensão de 500 mm x 300 mm x 250 mm;
- Areia saturada com solução $\text{Ca(OH)}_2 + \text{NaCl}$ 15 %
- Potencial ON do sistema, potencial OFF e natural de cada barra e dos anodos;
- Corrente de proteção sistema e anodo-barra;
- Carga acumulada (resistor de $10\ \Omega$ entre barra-anodo);
- Exame visual de cada uma das barras de aço-carbono e dos anodos, incluindo o elemento de zinco (após a fratura da argamassa envoltória).



**Avaliação do atendimento
ao critério de 100 mV!**

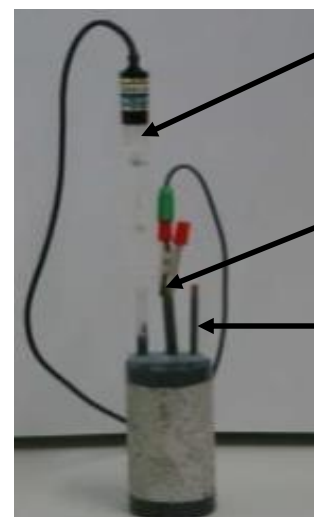


Outras adaptação IPT – corrosão cloretos



- Corpos de prova cilíndricos armados e não armados, com e sem contaminação;
 - Aplicação do sistema de proteção a ser avaliado, antes e/ou após a corrosão da barra de aço-carbono;
 - Imersão parcial em solução salina, com ciclos de secagem (ambiente ou estufa) ou ciclos com exposição a câmara de névoa salina.
- Monitoramento de PCA
 - Determinação de teor de cloretos
 - Determinação periódica da taxa de corrosão (I_{corr}) pela técnica de resistência de polarização
 - Exame visual das armaduras, análise dos produtos e determinação da penetração da corrosão e da área afetada

Adaptação IPT – corrosão carbonatação



Eletrodo de referência (inserido em tubo plástico, com esponja na extremidade)

Eletrodo de trabalho (armadura)

Contra-eletrodo (barra de cobre)



- Corpos de prova cilíndricos armados e não armados, com e sem frente de carbonatação;
- Aplicação do sistema de proteção a ser avaliado, antes e/ou após a corrosão da barra de aço-carbono;
- Imersão parcial em água (sem cloretos), com ciclos de secagem (ambiente ou estufa).

- Monitoramento de PCA
- Determinação da frente de carbonatação
- Determinação periódica da taxa de corrosão (I_{corr}) pela técnica de resistência de polarização
- Exame visual das armaduras, análise dos produtos e determinação da penetração da corrosão e da área afetada



Muito
Obrigada

Adriana de Araujo

Laboratório de Corrosão e Proteção

aaaraujo@ipt.br; aaaraujobonini@gmail.com

Técnica em Edificação pela Instituição de ensino Liceu de Artes e Ofícios de São Paulo (1986), Arquiteta (1992) e Engenheira de Segurança do Trabalho (1999) pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e Mestre em Habitação pelo IPT (2004).

Desde 2002, atua no IPT, desempenhando atividades laboratoriais e em campo, voltadas para os grupos de pesquisa de Materiais Avançados e de Materiais da Construção Civil. Presta serviços tecnológicos para o setor produtivo e da construção e participa de projetos de pesquisa e desenvolvimento, com ênfase na aplicação e no avanço das tecnologias de prevenção e controle da corrosão, bem como na análise e na gestão da degradação de estruturas.