INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

COMUNICAÇÃO TÉCNICA

Nº 176118

Exame virtual e ensaios não destrutivos na avaliação de estruturas de concreto

Adriana de Araujo

Palestra apresentada na CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, COTEQ, 2019, Rio de Janeiro. ***Palestras...*** *54 slides. .*

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

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Cidade Universitária ou
Caixa Postal 0141 | CEP 01064-970
São Paulo | SP | Brasil | CEP 05508-901
Tel 11 3767 4374/4000 | Fax 11 3767-4099

www.ipt.br



Exame Visual e Ensaios não Destrutivos na Avaliação de Estruturas de Concreto

Adriana de Araujo

Laboratório de Corrosão e Proteção - LCP/CTMM

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Agenda

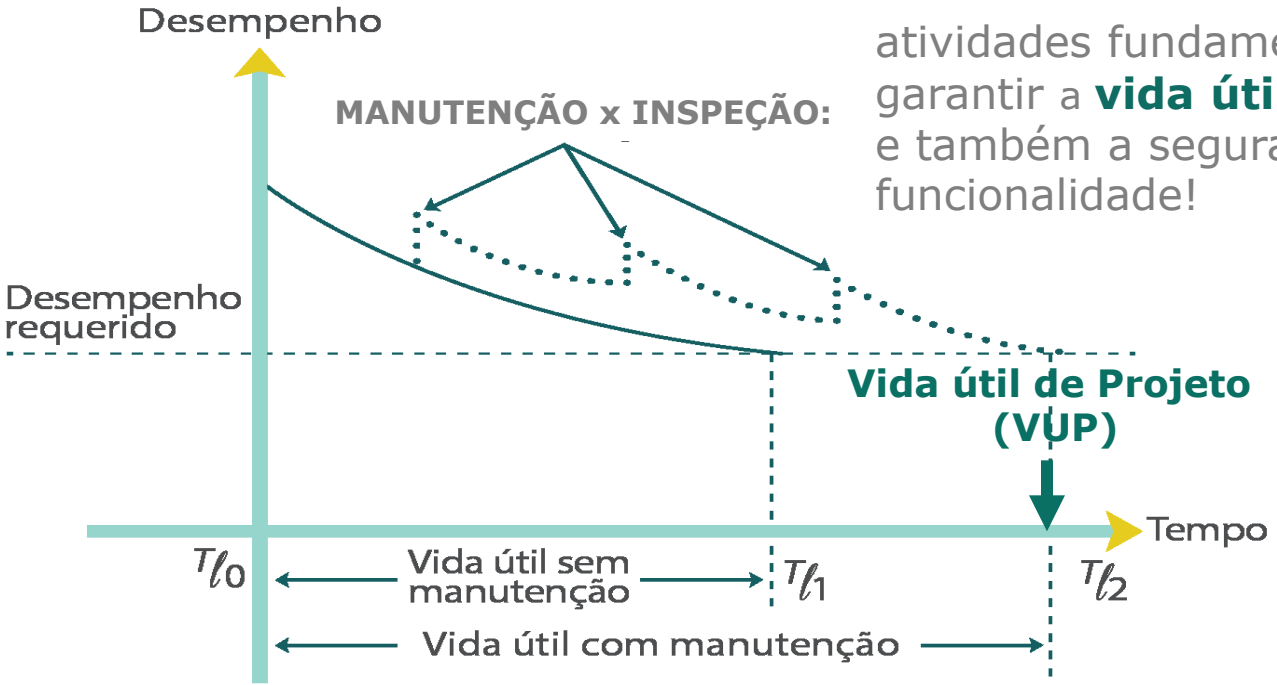
- **Conceitos**: inspeção, desempenho e vida útil;
- **Exame visual**: manifestações patológicas e normalizações;
- **Ensaios não destrutivos**: ensaios principais de avaliação do concreto e da armadura.



INSPEÇÃO = atividade de verificação ao atendimento a critérios de **desempenho**, fornecendo dados para o correto estabelecimento de diretrizes para uma manutenção eficaz.



Desempenho = comportamento de um produto ou sistema em utilização ao longo do tempo



atividades fundamentais para garantir a **vida útil de projeto** e também a segurança e a funcionalidade!

Tipo de estrutura	Vida útil de projeto (VUP) mínima				
	BS 7543 (1992)	ISO 2394 (1998)	Fib 34 (2006) e EN 206-1 (2007)	NBR 15575 (2013)	Fib 53 (2010)
Temporárias	≥ 10 anos	1 a 5 anos	≥ 10 anos	-	-
Partes estruturais substituíveis (Ex.: apoios)	≥ 10 anos	≥ 25 anos	10 a 25 anos	23 a 20 anos	25 a 30 anos
Estruturas para agricultura e semelhantes	-	-	15 a 30 anos	-	-
Estruturas *offshore*	-	-	-	-	≥ 35 anos
Edifícios industriais e reformas	≥ 30 anos	-	-	-	-
Edifícios e outras estruturas comuns	-	≥ 50 anos	≥ 50 anos	50 anos	≥ 50 anos
Edifícios novos e reformas de edifícios públicos	≥ 60 anos	-	-	-	-
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	≥ 120 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos	-	≥ 100 anos
Edifícios monumentais	-	-	-	-	≥ 200 anos

Dal Molin et al, 2016

Vida Útil de Projeto – VUP ABNT NBR 15575 (2013):

Período estimado de tempo para o qual o sistema é projetado a fim de atender aos critérios de desempenho, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o atendimento da periodicidade e **correta execução dos procedimentos de manutenção** especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção.

Inspeção rotineira	**Acompanhamento periódico, exame visual,** com ou sem a utilização de equipamentos e/ou recursos especiais para análise ou para acesso, **para avaliar o estado de conservação das estruturas.**
Inspeção especial	**Pormenorizada, contemplando o mapeamento gráfico e quantitativo das anomalias** de todos os elementos, com o intuito de formular o diagnóstico e prognóstico da estrutura. A frequência da inspeção depende da exposição ambiental e da presença de contaminantes, bem como da localização geográfica, condições de uso e idade da estrutura (NACE RP0390, 2006).
Inspeção extraordinária	Não programada, na sequência de situações acidentais e de eventos naturais ou quando necessário uma avaliação mais criteriosa.

EXAME/INSPEÇÃO VISUAL:

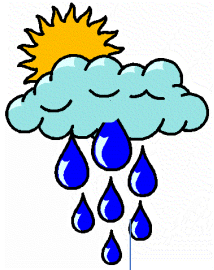
análise qualitativa que pode fornecer até 80 % das informação de maior significado para a gestão das obras! **CEB-FIB (2002)**

INSPEÇÃO = Objetivos

- Detectar precocemente **mecanismos de deterioração e risco à segurança**;
- **Definir medidas de prevenção ou mitigação da corrosão e de outros mecanismos de deterioração;**
- Avaliar a **efetividade de atividades de manutenção** e de **reabilitação**;
- **Realizar ensaios**: tecnológicos, END e especiais.



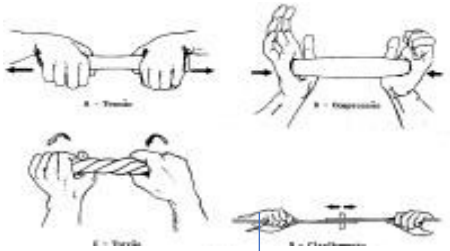
Deterioração da estruturas de concreto ao longo do tempo













Inspeção de execução e cadastral

EXAME/INSPEÇÃO VISUAL

Vida útil de Projeto (VUP)

Concreto

- Lixiviação da pasta de cimento;
- **Reações de expansão e deletérias com a pasta de cimento**;
- Reações deletérias superficiais de agregados.

Armadura

- Corrosão por **carbonatação**;
- Corrosão por **cloretos.**

Estrutura

- **Sobrecargas;**
- **Movimentações**;
- **Defeitos de execução**;
- Ações excepcionais.

INSPEÇÃO VISUAL

ORIGENS:

- Falhas de projeto;
- Falhas de execução;
- Materiais inadequados;
- Uso impróprio;
- Má conservação;
- Ocorrências acidentais (impactos, incêndios);

AGENTES (causas):

- Sobrecarga e vibrações;
- Variações térmicas;
- Bactérias e fungos;
- Chuva e vento;
- Gases e névoas;
- Partículas agressivas;

SINTOMAS (anomalias):

- Fissuras e/ou trincas
- Descolamentos;
- Deformações;
- Manchas e eflorescências;
- Segregação;
- Desagregação;
- Disgregação;
- Corrosão de armadura








Concreto
processo físico - químico

Carbonatação
reações com componentes da pasta de cimento

Lixiviação
ação extrativa de componentes da pasta de cimento e de agregados

Desagregação
reações envolvendo formação de produtos expansivos

- **Redução do pH**
- **eflorescência**
- **aumento da porosidade**
- **diminuição da resistência**
- **diminuição da resistência**
- **perda da integridade**

AGENTES:

Dióxido de carbono (CO_2)

Líquidos (águas moles e ácidas)

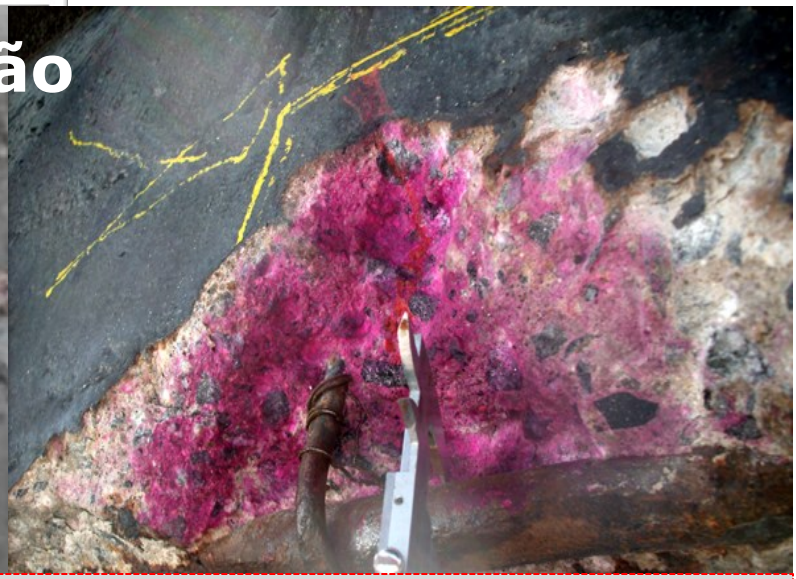
AGENTES:

Sulfatos (SO_4^{2-}) e Reação álcali-agregados

Carbonatação

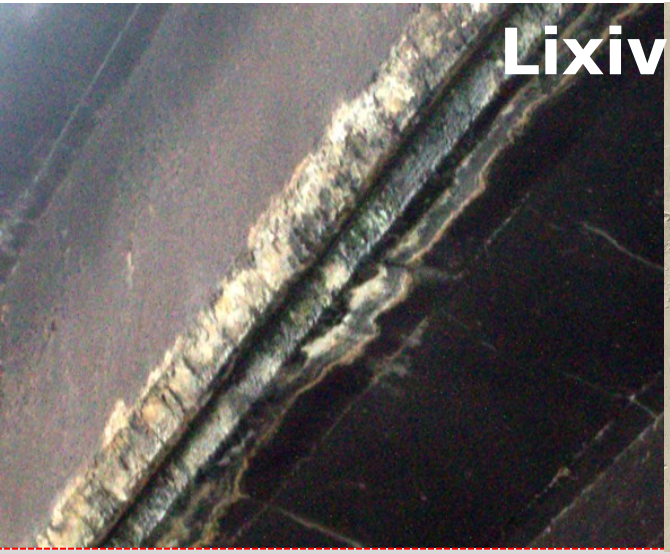






A carbonatação é um fenômeno que resulta na redução da alcalinidade (pH ≥ 12,5) da água de poros do concreto que garante a estabilidade eletroquímica da armadura. Essa redução ocorre pela reação do CO_2 atmosférico com compostos de alta alcalinidade da pasta de cimento (rica em $Ca(OH)_2$).

Lixiviação/Eflorescência







Quando águas puras, moles ou ácidas entram em contato com a pasta de cimento dissolvem o $Ca(OH)_2$, que é lixiviado.
A água corrente ou de infiltração dilui e lixivia o $Ca(OH)_2$ que, na superfície do concreto, reage com o CO_2, gerando o carbonato de cálcio - $CaCO_3$ (eflorescência esbranquiçada).



Desagregação – sulfatos e álcalis/agregados reativos (RAA)



Fissuração/ trincas e desagregação

Ataque por sulfato: Os íons sulfato (SO_4^{2-}) presentes na mistura ou oriundos do ambientes circundante reagem com aluminatos, formando compostos expansivos (etringita/ gesso) que absorvem água, gerando tensões que fissura e desagrega o concreto.

RAA: reações que envolvem alguns constituintes mineralógicos do agregado, formando um gel que, na presença de água, se expande e exerce pressões internas.

Concreto
processo físico - mecânico

Desagregação

- abrasão
- erosão
- cavitação

AGENTES:

gases, líquidos e partículas

Fissuração

cargas estruturais
(flexão, torção e cisalhamento)
mudanças de volume
(retração e mov. higrotérmica),

AGENTES:

variações térmicas e de umidade

sobrecarga e vibrações





Desagregação



Abrasão: refere-se a atrito seco.

Erosão: ações de colisão, escorregamento ou rolagem das partículas em fluido em movimento, ar ou água.

Cavitação: erosão por impacto de bolhas de ar que implodem em fluido em movimento.





Fissuração



Principal e mais frequente sintoma patológico!
Permitem o ingresso de água e agentes agressivos!
Indicador de ocorrência de processos de degradação!
Sinal de alerta assim como são as deformações dos elementos!

Fissuras estruturais: sobrecargas, recalque, cisalhamento, flexão, torção, tração etc.

Fissuras não estruturais: variação da temperatura, má execução da junta de concretagem, retração térmica e por secagem, corrosão da armadura, impacto etc.

Fissuração anteriormente ao endurecimento

- ✓ **assentamento** (vibração e exsudação) do concreto;
- ✓ **movimentação/deformação de fôrmas** e assentamento de fundações em solo;
- ✓ **concretagem em plano inclinado**;
- ✓ **retração por secagem/hidráulica** (contração volumétrica pela saída de água);
- ✓ **movimentação térmico** (calor de hidratação e mudança das condições atmosféricas);
- ✓ **Falhas no acabamento superficial do concreto** etc.



Fissuração após endurecimento

- ✓ **ação mecânica** (erro de projeto, sobrecargas, recalque, impactos, cargas cíclicas, desforma precoce);
- ✓ **origem térmica** (gradientes de temperatura e congelamento, fogo);
- ✓ **Pressão de cristalização de sais nos poros** (sulfato, carbonatação, lixiviação);
- ✓ **retração por secagem ou hidráulica** (perda lenta da água de amassamento);
- ✓ **corrosão da armadura**;
- ✓ **reação álcali-agregado** etc.



AGENTES DESPASSIVANTES DA ARMADURA:

CO_2
(frente de carbonatação) → dissolução do filme protetor

íons cloreto (Cl^-) → Quebra localizada do filme protetor

Cloretos

Interagem com o filme passivante, resultando na sua quebra localizada com formação de pites. Com o avanço do ataque, os pites aumentam em número e tamanho e acabam generalizando a corrosão.

O ingresso de cloreto é decorrente da exposição das estruturas ao ambiente marinhos ou quimicamente agressivos.





Teor crítico de cloreto para início da corrosão em ambiente marinho (ABNT NBR 12655, 2006):

- concreto armado: 0,15 %;
- concreto protendido: 0,05 %.

MANCHAS DE CORROSÃO







Em processo generalizado de corrosão, há o acúmulo significativo de produtos de corrosão que podem ser lixiviados, manchando a superfície do concreto. Essas manchas aparecem, preferencialmente, na face inferior dos elementos em concreto exposto a umidificação, poroso ou fissurado ou com baixa espessura de cobrimento.

FISSURAÇÃO e DISGREGAÇÃO



A disgregação do concreto se caracteriza pelo lascamento originado por esforços internos ou externos superiores a resistência do material. Usualmente, é resultante da corrosão da armadura, choque ou impacto ou esmagamento (aparelho de apoio e juntas de dilatação).

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Tabelas: registro das anomalias com identificação, quantificação e localização nos elementos.

Croquis e fotografias para visualização geral da situação nos elementos com problemas (estrutural, funcional e durabilidade);

Definir/realizar **ensaios** necessários para confirmar e determinar a extensão da deterioração

Relatório (diagnóstico e prognóstico):

- **Diagnóstico: abordar a natureza, extensão e evolução do problema** (estrutural, funcional e durabilidade);
- **Prognóstico**: **recomendar métodos de tratamento superficial, reabilitação, prevenção/mitigação da corrosão.**



ABNT NBR 15575 (2013): Edificações habitacionais - Desempenho

ABNT NBR 6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto

ABNT NBR 12655 (2015): Preparo, controle, recebimento e aceitação

ABNT NBR 14037 (2011): Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações

ABNT NBR 16230 (2013): Inspetor de estruturas de concreto

ABNT NBR 9452 (consulta pública): Vistorias de pontes e viadutos de concreto

ABNT NBR 16230 (2013)

Requisitos mínimos de escolaridade e experiência profissional

Categoria	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Inspetor I	Curso superior na área de construção civil, com um ano de experiência em patologia e terapia das estruturas de concreto.	Ensino médio profissionalizante em construção civil com dois anos de experiência em patologia e terapia das estruturas de concreto.	Ensino médio com cinco anos de experiência na atividade de inspeção, recuperação ou reforço
Inspetor II	**Engenheiro civil especialista em patologia e terapia das estruturas** ou em estruturas de concreto, com dois anos de experiência na atividade.	**Engenheiro civil com cinco anos de experiência em patologia** e terapia das estruturas de concreto.	**Curso superior na área de construção civil com dez anos de experiência** em patologia e terapia das estruturas de concreto

- Desenho técnico
- Noções de comportamento estrutural
- Patologia das estruturas de concreto
- Materiais de construção civil
- Técnicas construtivas
- Normalização

- Concepção estrutural
- Comportamento estrutural
- **Patologia das estruturas de concreto**
- **Ensaios em estruturas de concreto**
- Normalização
- Materiais constituintes da estrutura
- Diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto e critérios de projeto que visam a durabilidade (NBR 6118).

ABNT NBR 9452 (2016)

Registro de anomalias, sendo as mais comumente encontradas:

a) Na estrutura da OAE

- **Defeitos construtivos** (falhas de montagem, desaprumo ou desalinhamento de elemento, armaduras aparentes, juntas frias, falhas nas condições superficiais do concreto, falhas de concretagem e outros);
- **Danos causados por acidentes**, como impacto;
- Descolamento linear ou angular;
- Deformações excessivas;
- Desaprumo de pilares;
- **Estado de fissuração dos elementos;**
- **Exposição de armaduras;**
- **Corrosão de armaduras**;
- Condições superficiais do concreto;
- Esborcinamento (quebra) de concreto;
- Esmagamento de concreto;
- Deterioração por agentes agressivos;
- Falhas de acabamento na ancoragens das armaduras protendidas, se visíveis;
- Drenos de injeção não arrematados.

b) Aparelhos de apoio;
c) Nas pistas e seu entorno;
d) Nas juntas de dilatação.

ABNT NBR 9452 (2016)
Roteiro básico e ficha para inspeção especial:

D.1.4 Ensaios

Sempre que forem realizados ensaios, registrar as informações a seguir:

- **Localização em croquis;**
- **Resultados com interpretação;**
- **Metodologia, caso necessário;**
- **Normas brasileiras (ou outras) de referência.**

D.1.1 Localização da OAE;
D.1.2 Descrição da obra;
D.1.3. Inspeção

D.2 Relatório: terapia e metodologias de recuperação com indicação de reforma e/ou reforço.
D.3 Relatórios técnicos complementares: análises estruturais, ensaios tecnológicos, instrumentação para monitoramento etc.

ABNT NBR 9452: classificação segundo os **parâmetros durabilidade**

Anomalias na armadura	**Elemento/Nota de classificação**		
	Principal	**Secundário**	**Complementar**
Armadura expostas com corrosão incipiente	3	4	4
Armadura expostas em processo evolutivo de corrosão	2	3	4
Armadura protendida exposta, mesmo sem corrosão, em ambiente de baixa e média agressividade	3	4	-
Armadura protendida exposta e corroída	1	2	3
Obras com deficiência de cobrimento sem armadura exposta	4	5	5
Obras com deficiência de cobrimento com estufamento por expansão da corrosão	3	4	4

Principal: dano pode ocasionar o colapso; Secundário: ocasionar ruptura localizada;
Complementar: não causa nenhum comprometimento estrutural

5 – Excelente; 4- Boa; 3 – Regular; 2 – Ruim; 1 – Crítica.

ABNT NBR 9452: classificação segundo os **parâmetros estruturais**

Anomalias na armadura	**Elemento/Nota de classificação**		
	Principal	**Secundário**	**Complementar**
Armadura principal exposta e corroída, com perda de seção de até 20 % do total da armadura	3	4	5
Armadura principal exposta e corroída, com perda de seção acima de 20 % da área total de armadura ou que comprometa a estabilidade da peça	2	3	4
Armaduras principais rompidas	1	2	3
Ruptura de parte da armadura principal passiva ou ativa	1	2	3
Tirantes rompidos	1	-	-
Armadura protendida exposta e corroída	2	-	-
Perda ou falta de protensão em elemento principal	2	-	-

Principal: dano pode ocasionar o colapso; **Secundário**: ocasionar ruptura localizada;
Complementar: não causa nenhum comprometimento estrutural

5 – Excelente; 4- Boa; 3 – Regular; 2 – Ruim; 1 – Crítica.

Agenda

- **Conceitos**: inspeção, desempenho e vida útil;
- **Exame visual**: manifestações patológicas e normalização;
- **Ensaios não destrutivos**: ensaios principais de avaliação do concreto e da armadura.

Coteq 2019



Ensaios em campo: objetivos

- **Detectar precocemente mecanismos de deterioração** e acompanhar a sua evolução;
- Detectar **zonas críticas não detectáveis através da inspeção visual;**
- **Ajudar a encontrar a resposta para o problema específico** em análise;
- Ajudar a **diminuir a subjetividade associada às classificações atribuídas as condições verificadas pela inspeção visual**.

Coteq 2019

ACI 228.2R (2013): Apesar da falta de normalização, é **crescente a aplicação de ENDs na investigação das estruturas** devido:

- ✓ **Avanço nas tecnologias** (*hardware* e *software*) de aquisição e análise de dados;
- ✓ **Vantagens econômicas** na avaliação de grandes áreas em relação a outros métodos;
- ✓ **Especificação crescente dos ENDs na garantia da qualidade e da reabilitação das estruturas.**

ENDs são aplicados para:

- **Controle de qualidade de construções novas;**
- **Solucionar problemas nas construções novas e existentes deterioradas;**
- **Avaliar as condições das construções existentes a serem reabilitadas;**
- **Avaliar a qualidade dos reparos realizados na reabilitação.**

Avaliação do concreto



Resistividade elétrica:
4 eletrodos
2 eletrodos



Termografia de infravermelhos



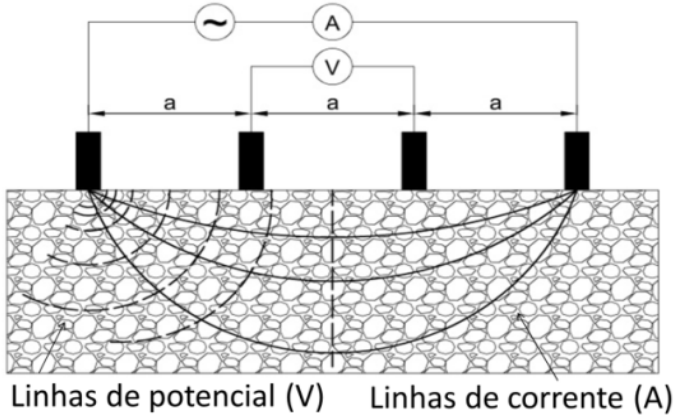
Micro-ondas

TAKEDA; MAZER, 2018

Resistividade elétrica : 4 eletrodos

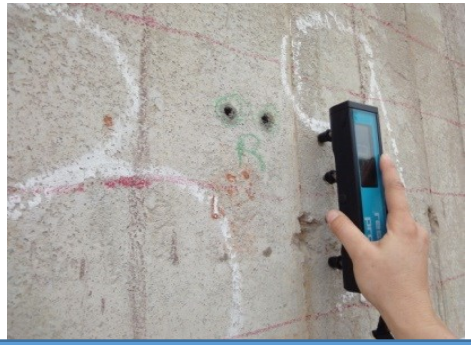
A resistividade é uma propriedade física do concreto que indica a resistência ao fluxo de corrente elétrica.

A resistividade é determinada a partir da diferença de potencial estabelecida entre os dois eletrodos internos durante fluxo de uma pequena corrente elétrica alternada entre os dois eletrodos externos.



Para CP cilíndrico 10 x 20 cm, adota-se o valor de 0,377 (fator geométrico) p/ correção (AENOR, 2012)

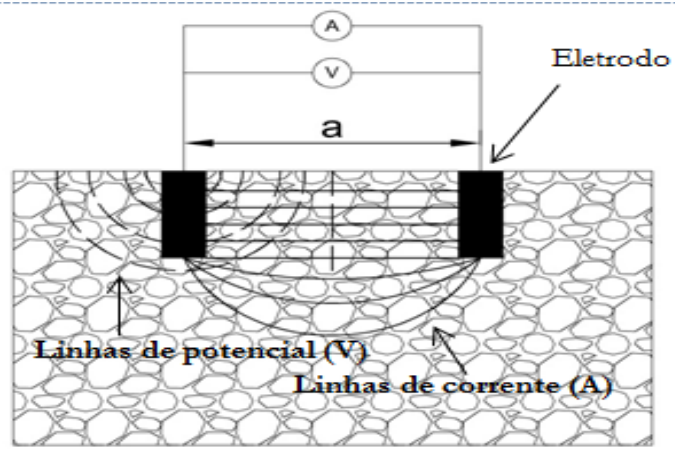




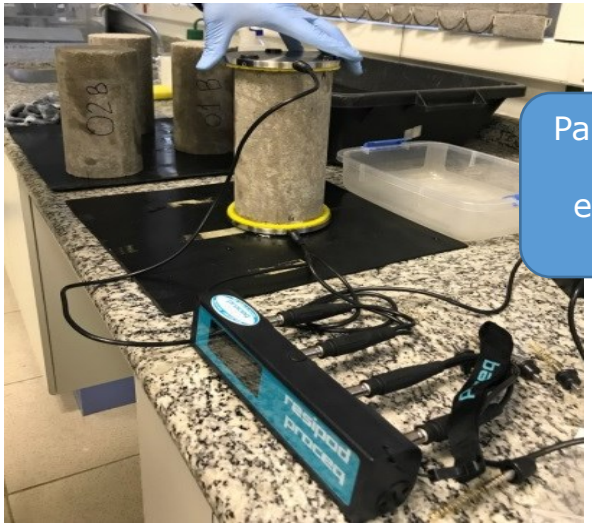
RILEM TC 154-EMC (Polder et al., 2000)

Resistividade elétrica : 2 eletrodos

A resistividade é determinada a partir da diferença de potencial estabelecida entre os dois eletrodos, com fluxo de uma pequena corrente elétrica alternada e de leitura da diferença de potencial estabelecida.







Para CP cilíndrico 10 x 20 cm, não há fator de correção embora exista a introdução de pequeno erro.

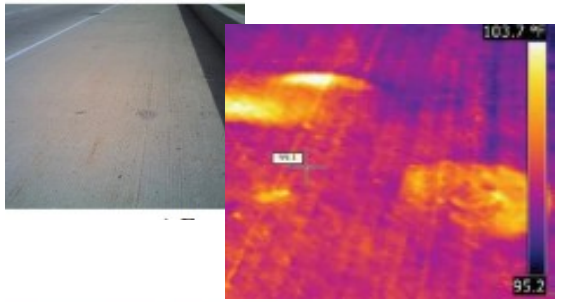
Critérios de avalição da resistividade elétrica do concreto

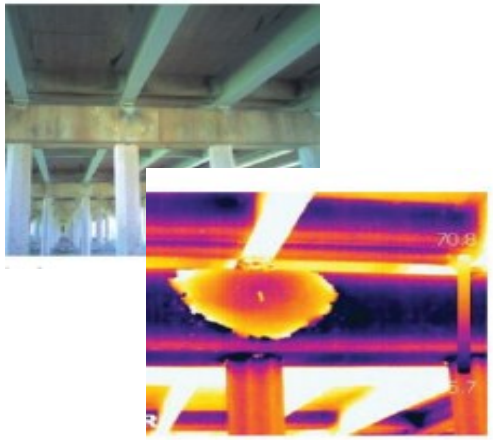
Valores de resistividade elétrica do concreto (kΩ·cm)							Risco de corrosão
GONZÁLEZ et al. (2004)	Smith et al. [2004]	Morris et al. [2002]	Polder [2001], COX et al. [1997], Broomfiled et al. 1993 apud Broomfield [1997]	FELIÚ et al. [1996]	Browne; Geohegan apud CEB 192 [1989]; Browne [1982]	Langford e Broomfiled 1987 apud Broomfield [1997]	
<20	< 8	< 10	_	< 10	< 5	< 5	**Muito alto (taxa severa)**
20 a 50	8 a 12	10 a 300	< 10	10 a 100	5 a 10	5 a 10	**Alto**
			10 a 50		_	10 a 20	**Moderado**
50 a 100	> 12	> 300	50 a 100		10 a 20	> 20	**Baixo**

Termografia infravermelha

Identificar anomalias superficiais como vazios internos e delaminações que afetam o fluxo de calor do concreto. Também é usada para identificar áreas de reparo e gradiente de umidade.

A radiação infravermelha emitida pelo concreto é registrada imagem térmica gerada por meio de um **detector infravermelho** acoplado em câmara específica.





Rocha; Póvoas, 2017

Termocâmera portátil



Sem contato com a superfície.
Permite inspecionar grandes áreas em pequenos intervalos de tempo, com resultados de fácil interpretação.
O ensaio é altamente influenciado pelas condições ambientais

O procedimento para execução do ensaio de termografia é estabelecido pela NBR 15424:2016

Micro-ondas

Mapeamento do gradiente de umidade que é estabelecido entre o concreto e o ambiente.

A água líquida livre no concreto absorve as **micro-ondas**, sendo a recepção alterada em faixa que determina o teor de água líquida em massa.

Micro-ondas que são radiações eletromagnéticas cuja frequência está compreendida entre 300 MHz e 300 GHz.

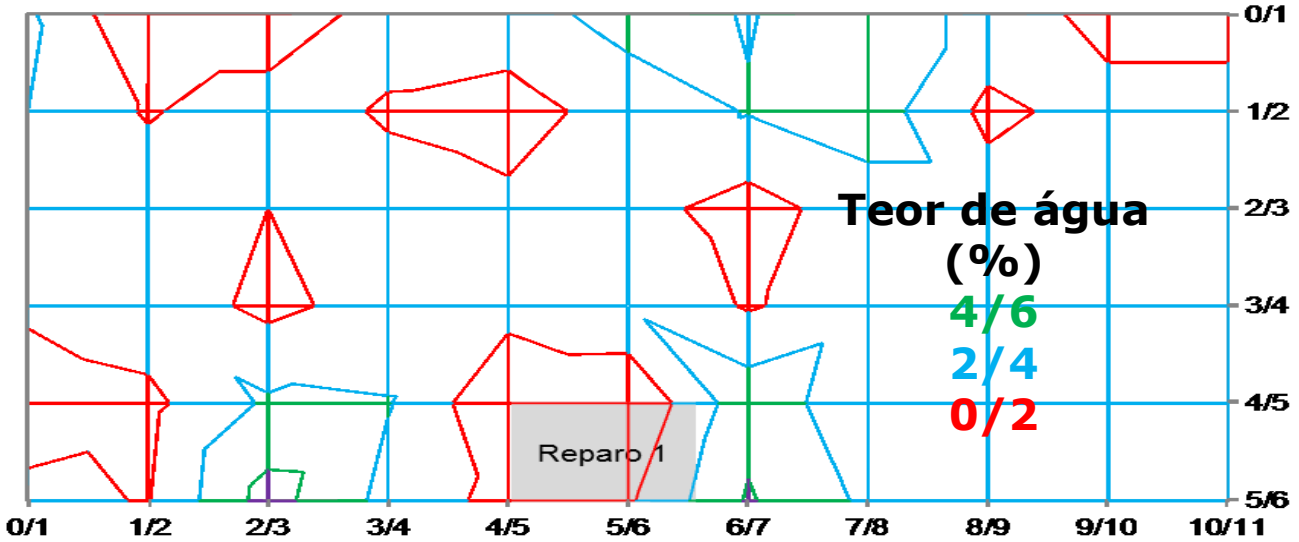
Tipo	Densidade (g/cm^3)	Material parcialmente seco	Material saturado
		% de água líquida em massa,	
Concreto C20/25	2,23	2,40	8,7
Concreto C30/37	2,27	1,80	7,5



Micro-ondas



Mapa de gradiente de umidade

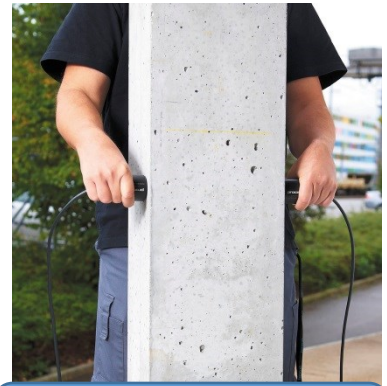




Seção de Materiais de Construção Civil- IPT

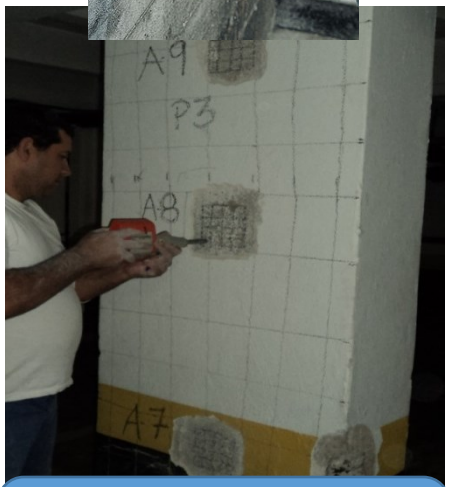
Detectar descontinuidades, profundidade de fissuras, integridade de juntas, assessorar na extração de testemunhos.

O ensaio baseia-se no fato de velocidade de propagação da **onda ultrassônica** é influenciada pela densidade e propriedades elásticas do material. A determinação dessa indica as características do concreto.



Ultrassom





Esclerometria

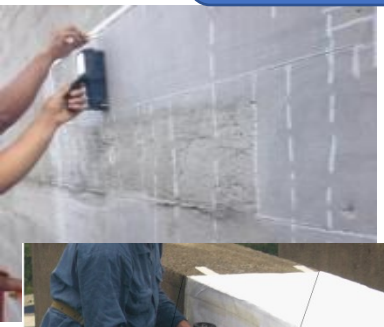
Determinação da resistência à compressão superficial do concreto e de sua uniformidade.

O ensaio se baseia na medida da força de retorno após **impacto superficial de uma massa martelo,** impulsionada por mola.

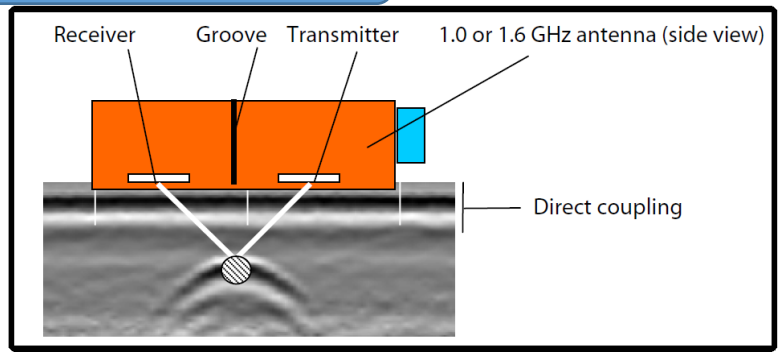
O procedimento para execução do ensaio de Esclerometria é estabelecido pela NBR 7584:1995 e de ultrassom pela NBR 8802: 2019

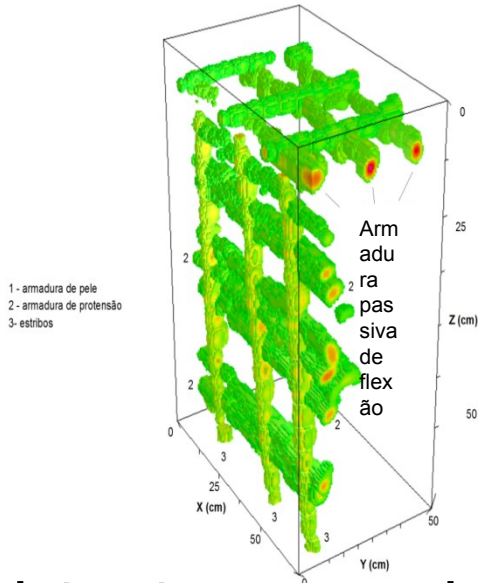
Avaliação da armadura

Radar GPR









Posicionamento, profundidade e diâmetro

Visualização da armadura existente por meio da emisão **pequenos pulsos de energia eletromagnética** que se propagam no concreto e são refletidas nas interfaces que apresentam propriedades dielétricas diferentes, como a interface concreto/armadura.

Seção de Engenharia de Estruturas - IPT

- Localização das armaduras do concreto armado e protendido usando o radar GPR;
- monitoramento de aberturas de juntas, de juntas dilatação e de fissuras;
- prova de carga estática.







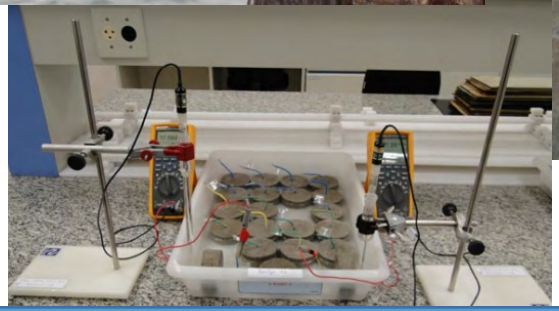




Avaliação do armadura – estado eletroquímico







Potencial de corrosão



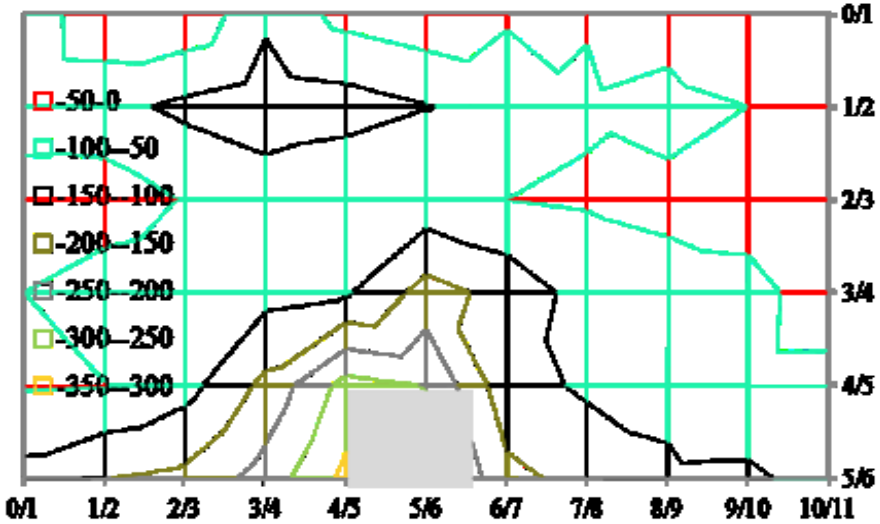


Taxa de corrosão

Potencial de corrosão - E_{corr}

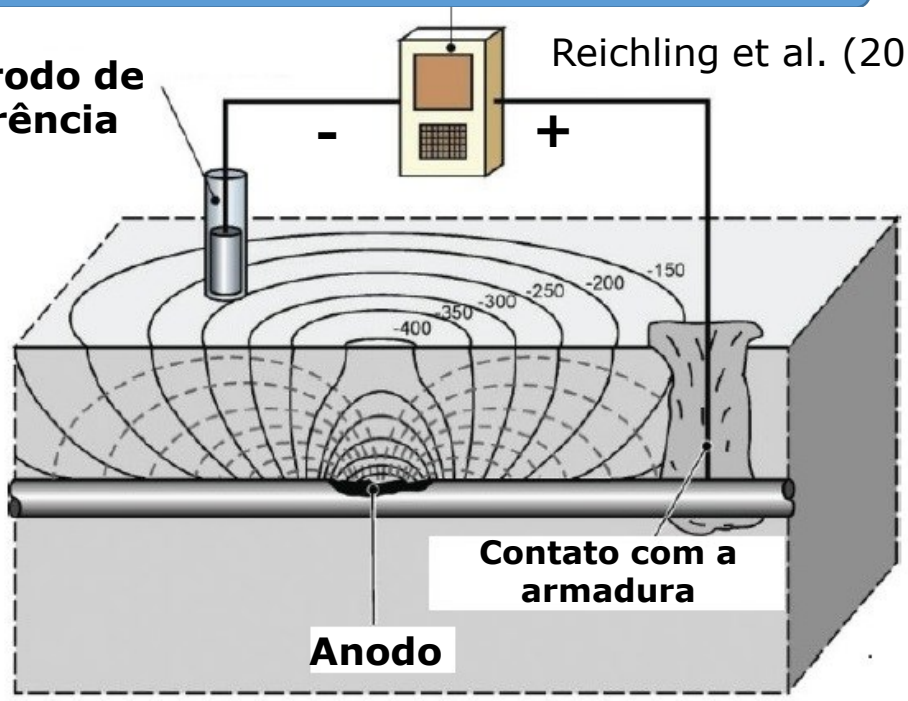
Potencial espontaneamente adquirido pelo aço-carbono, aço-carbono zincado, aço inoxidável etc (eletrodo) embutido no concreto ou outro meio eletrolítico.

- Indica o **estado ativo ou passivo** da armadura;
- **As medidas podem ser tomadas isoladamente ou em forma sistemática p/ obter um mapa de potenciais** do trecho do elemento em análise;
- As **informações são qualitativas** e por isso devem ser utilizadas como complemento de outros ensaios.



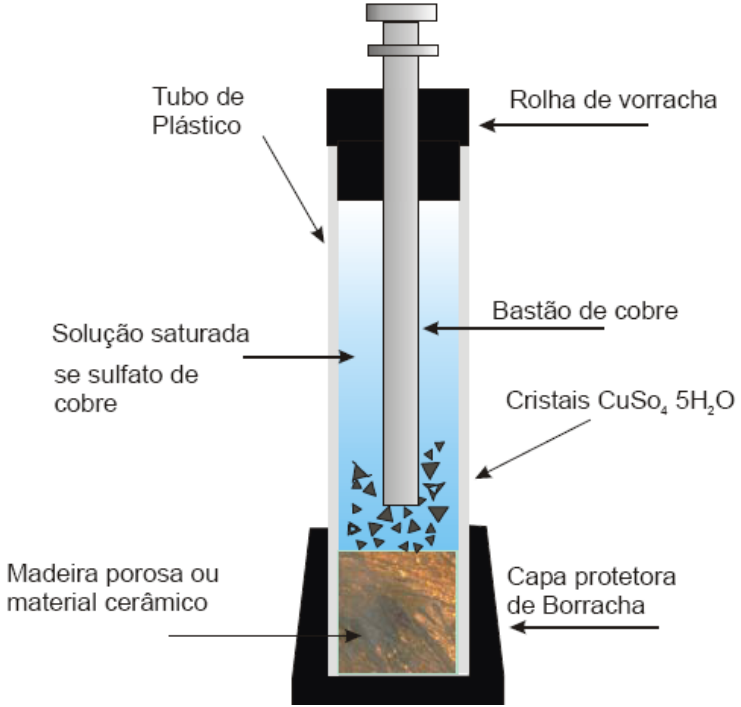
Potencial de corrosão - E_{corr}

Reichling et al. (2013)



Linhas de contorno de potenciais de mesmo valor e, perpendicularmente, linhas de corrente elétrica.

Eletrodo de referência de $Cu/CuSO_4$



ASTM C876:2015
RILEM TC 154-EMC
NACE Publication 11100:2000

NACE Publication 11100: 2000

Copper / copper sulfate sat	CSE	+ 0.318 V SHE
Calomel (Hg / Hg2Cl2) KCl sat.	SCE	+ 0.241 V SHE
Silver chloride (Ag / AgCl) KCl sat.	SSCE	+ 0.199 V SHE

eletrodo de referência
$Cu/CUSO_4$ sat.

Table 2
SCE and Ag/AgCl/KCl Potentials Corresponding to the CSE Potentials Related to the Probability of Corrosion Activity on Atmospherically Exposed Structures as Given in ASTM C 876

Probability of corrosion activity	CSE	SCE	Ag/AgCl/1.0 M KCl	Ag/AgCl/KCl (sat.)
>90% probability of no corrosion occurring	more positive than -200 mV	more positive than -126 mV	more positive than -117 mV	more positive than -81 mV
Probability of corrosion uncertain	-200 to -350 mV	-126 to -276 mV	-117 to -267 mV	-81 to -231 mV
>90% probability of corrosion occurring	more negative than -350 mV	more negative than -276 mV	more negative than -267 mV	more negative than -231 mV

RILEM TC 154-EMC (Elsener et al., 2002)

Condição do concreto de cobrimento	UR atmosférica provável (%)	Estado provável do aço-carbono	Valores de E_{corr} (mV)	
			ECSC ($Cu/CuSO_4$ sat.)	EPCP (Ag/AgCl/KCl sat.)
Concreto saturado	> 98 (UR saturada)	Estado ativo com taxa de corrosão desprezível	-900 a -1000	-791 a -891
Concreto com teor de umidade alto e contaminado com Cl^-	85 a 98 (UR alta)	**Estado ativo**	**-400 a -600**	**-291 a -491**
Concreto com teor de umidade médio e livre de Cl^-	65 a 85 (UR média)	Estado passivo	+100 a -200	+209 a -91
Concreto com teor de umidade médio e carbonatado		**Estado ativo**	**+100 a -400**	**+209 a -291**
Concreto com teor de umidade baixo e carbonatado	45 a 65 (UR baixa)	Estado ativo, mas com taxa de corrosão pouca significativa.	+200 a 0	+309 a +109
Concreto aerado com teor de umidade baixo		Estado passivo		

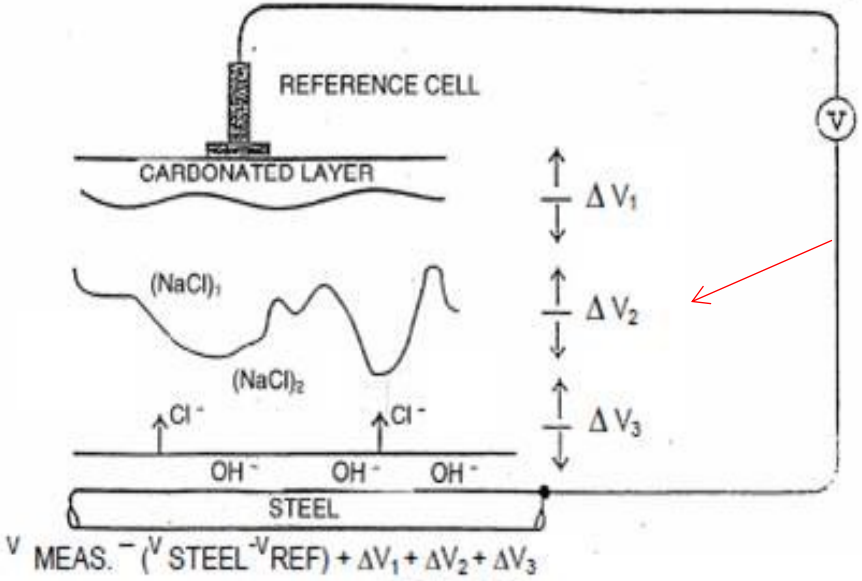
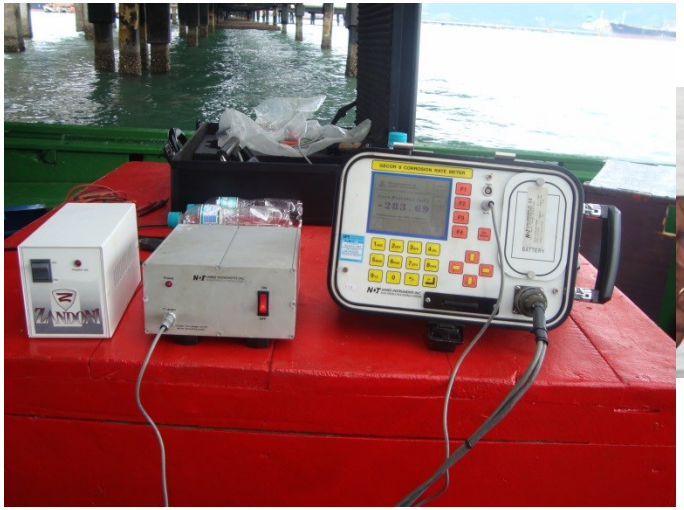


FIGURE A2
Junction Potential Error in Concrete



NACE Publication 11100: 2000

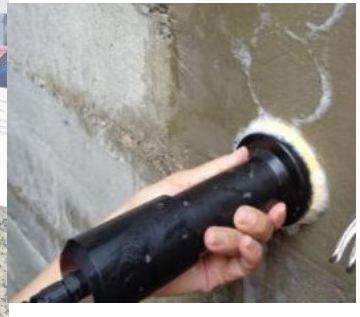
Gradiente de concentração de íons no eletrólito da camada superficial e o das camadas profundas do concreto, usualmente devido à carbonatação do concreto e ou ao ingresso de **Cl^-**. Deve-se considerar também a influência da resistividade elétrica do concreto nas medidas de E_{corr} que varia conforme as características do concreto, condições de exposição à água e espessura de concreto de cobrimento da armadura.











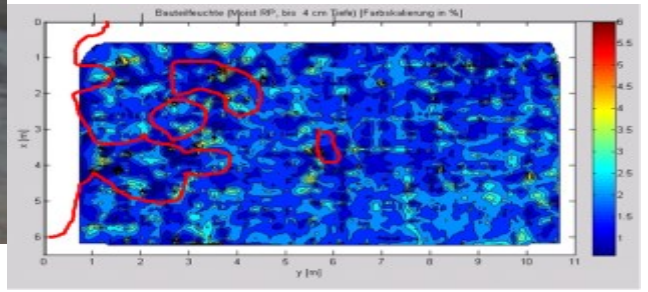


BetoScan: sistema robotizado

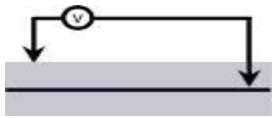


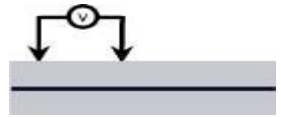


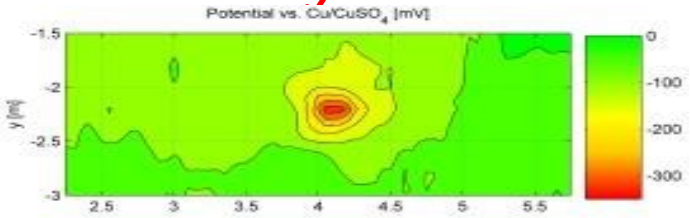


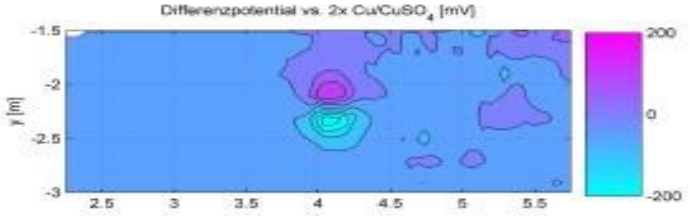


Mapeamento do gradiente de potencial de corrosão









Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)

Coteq 2019



Taxa de corrosão - i_{corr}

A taxa de corrosão é um parâmetro que indica o nível de corrosão nas armaduras.

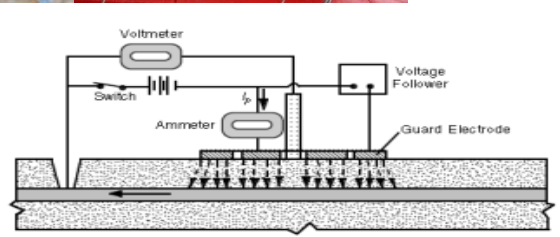
A técnica consiste na aplicação de um pulso de corrente com monitoramento do potencial ao longo do tempo.
A taxa de corrosão instantânea é determinada pela determinação da resistência de polarização linear.

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

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

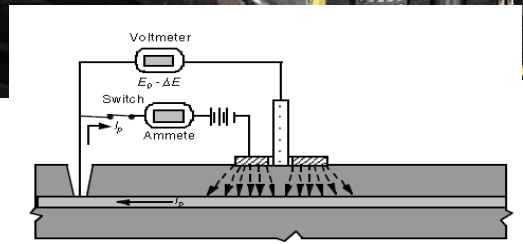








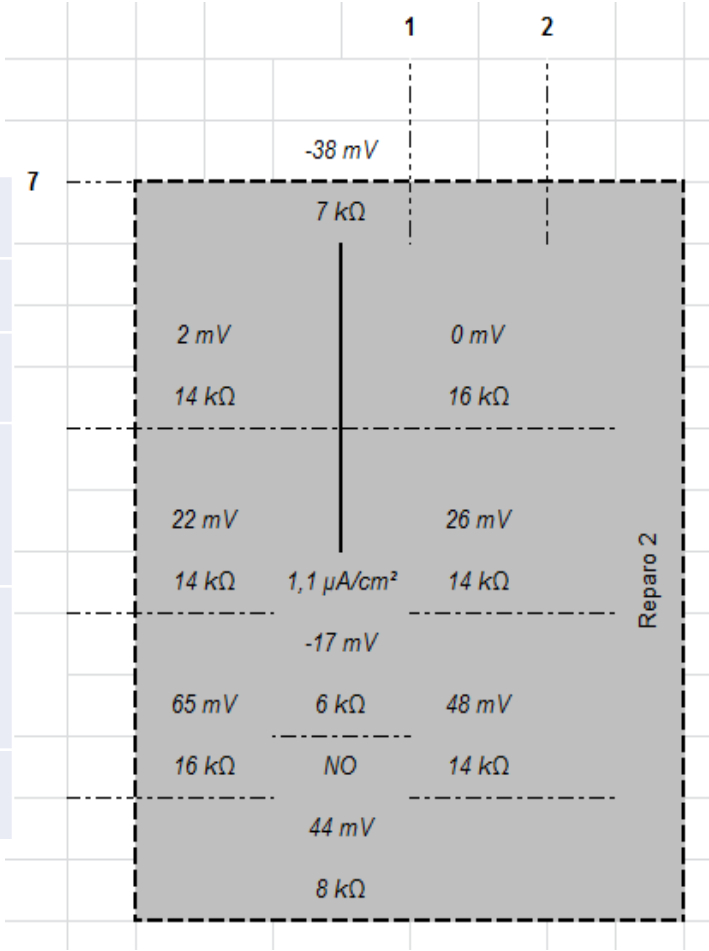


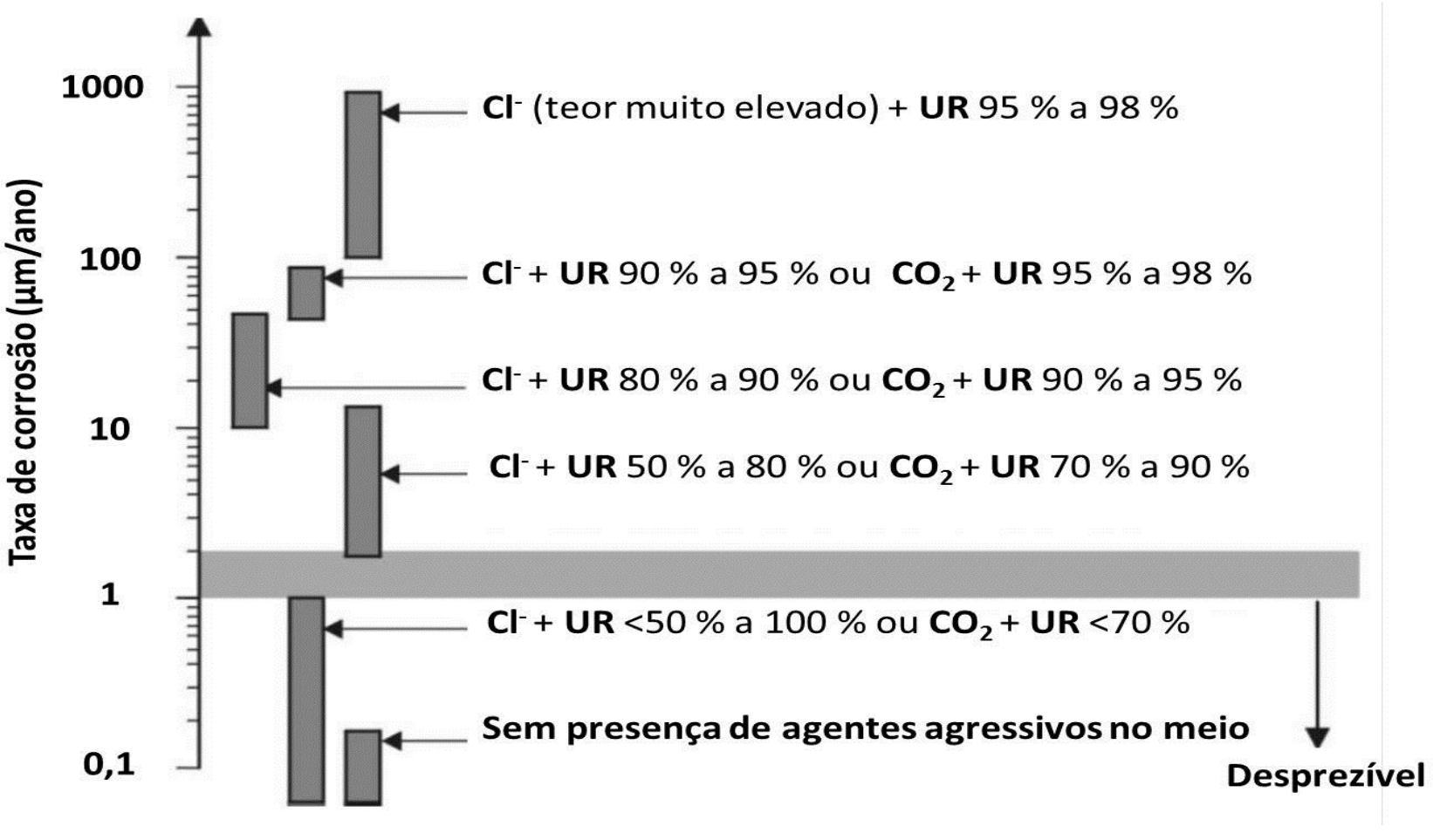


Taxa de corrosão

Nível de corrosão da armadura	Valores de i_{corr}		
	μA/cm²	mm/ano	μm/ano
Desprezível	≤ 0,1	≤ 0,001	≤ 1,16
Baixo	0,1 a 0,5	0,001 a 0,005	1,16 a 5,8
Moderado	0,5 a 1	0,005 a 0,010	5,8 a 11,6
Severo	> 1	> 0,010	> 11,6

RILEM TC 154-EMC
(Andrade et al., 2004)




Taxa de corrosão (µm/ano)
1000
100
10
1
0,1
Cl- (teor muito elevado) + UR 95 % a 98 %
Cl- + UR 90 % a 95 % ou CO2 + UR 95 % a 98 %
Cl- + UR 80 % a 90 % ou CO2 + UR 90 % a 95 %
Cl- + UR 50 % a 80 % ou CO2 + UR 70 % a 90 %
Cl- + UR <50 % a 100 % ou CO2 + UR <70 %
Sem presença de agentes agressivos no meio
Desprezível

Gazeta on Line (04/2019):
Abraçadeiras de plástico são usadas em viaduto repleto de rachaduras

Secretário de obras da prefeitura de Vila Velha diz que não sabe quem colocou o material no local e promete obras emergenciais



Foto: Eduardo Dias | Rádio CBN Vitória



Foto: Eduardo Dias

Coteq 2019

ipt INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

GOVERNO DO ESTADO SÃO PAULO
Secretaria de Desenvolvimento
Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação



OBRIGADA!

Adriana de Araujo,
Laboratório de Corrosão e Proteção
aaraujo@ipt.br

