



I Seminário de Desempenho,
Manutenção e Durabilidade das
Estruturas de Concreto



Mini curso
**Técnicas não destrutivas para
avaliação do concreto**



Paulo Helene
*Diretor PhD Engenharia
Prof. Titular Universidade de São Paulo
Diretor e Conselheiro Permanente IBRACON
Presidente Honorífico ALCONPAT Internacional
Member fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life
of Concrete Structures
Conselheiro CNTU e SEESP*

Auditório Leopoldo Amaral 30 de março de 2017 Salvador/BA

1

BIBLIOGRAFIA

ISAIA, Geraldo C. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações.
IBRACON, 2005

- Cap. 33 “Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com problemas de resistência, fissuras e deformações” *Enio Pazini Figueiredo. p. 985-1016*
- Cap. 34 “Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com problemas de reação álcali-agregado” *Simão Priszkulnik. p. 1017-1070*
- Cap. 35 “Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com problemas de corrosão de armaduras” *Oswaldo Cascudo. p. 1071-1108*
- normas da ABNT

2

ENSAIOS em ESTRUTURAS DE CONCRETO

➤ CONTROLE DA QUALIDADE DURANTE A EXECUÇÃO

- $f_{ck,est} < f_{ck}$

➤ ESTRUTURAS EXISTENTES:

- MUDANÇA DE UTILIZAÇÃO
- COMPORTAMENTO INADEQUADO
- DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE RESIDUAL

Incêndio

Sobrecarga não prevista

Impactos

Deteriorações físico-químicas.

3

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

MÉTODO	CUSTO	VELOCIDADE DE OBTENÇÃO DE RESULTADO	DANO À ESTRUTURA	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	APLICAÇÃO
MEDIDA DO COBRIMENTO E DE POSICIONAMENTO DA ARMADURA <small>pacometria</small>	BAIXO	RÁPIDA	NENHUM	IN LOCO	CAUSA E RISCO DE CORROSÃO
PERFIL da CONCENTRAÇÃO DE CLORETOs	ALTO	MODERADA	PEQUENO	LABORATÓRIO	
POTENCIAL DE CORROSÃO	MODERADO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	RISCO DE CORROSÃO
RESISTIVIDADE elétrica/ionica	MODERADO	RÁPIDA	PEQUENO/ NENHUM	IN LOCO	
RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO	MALTO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	VELOCIDADE DE CORROSÃO
IMPEDÂNCIA	ALTO	LENTA	PEQUENO	LABORATÓRIO	
TEOR DE UMIDADE	BAIXO	MODERADA/ LENTA	PEQUENO	IN LOCO	CAUSA E RISCO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO E CORROSÃO
ANÁLISE PETROGRÁFICA	ALTO	LENTA	MODERADO	IN LOCO	
RADIOGRÁFICOS	ALTO	LENTA	NENHUM	LABORATÓRIO	
ÁLCALI-SILICATO	ALTO	LENTA	MODERADO	LABORATÓRIO	

4

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

MÉTODO	CUSTO	VELOCIDADE DE OBTENÇÃO DE RESULTADO	DANO À ESTRUTURA	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	APLICAÇÃO
ESCLEROMETRIA	BAIXO	RÁPIDA	NENHUM	IN LOCO	HOMOGENEIDADE/UNIFORMIDADE, ESTIMATIVA DA, DUREZA SUPERFICIAL
ULTRA-SOM	BAIXO	RÁPIDA	NENHUM	IN LOCO	UNIFORMIDADE/HOMOGENEIDADE/MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO/DEFEITOS NÃO VISÍVEIS
PROVA DE CARGA	ALTO	MODERADA	NENHUM/PEQUENO	IN LOCO	DEFORMAÇÕES
EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS	MODERADO	MODERADA	PEQUENO	IN LOCO	RESIST. CARAC. ESTIMADA À COMPRESSÃO/MÓDULO DEF. LONGITUDINAL/DIAGRAMA $\sigma \times \epsilon$ /RESISTÊNCIA À TRAÇÃO/COEFICIENTE DE POISSON
PERMEABILIDADE À ÁGUA E GASES	MODERADO	LENTA	MODERADO/PEQUENO	LABORATÓRIO/IN LOCO	CAUSA E RISCO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO E DE CORROSÃO
ABSORÇÃO	MODERADO	LENTA	MODERADO/PEQUENO	LABORATÓRIO	
CONTEÚDO DE SULFATOS	BAIXO/MODERADO	MODERADA/LENTA	MODERADO/PEQUENO	LABORATÓRIO	
PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	BAIXO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	CAUSA E RISCO DE CORROSÃO

5

Sequência de Atividades para análise de Problemas Patológicos

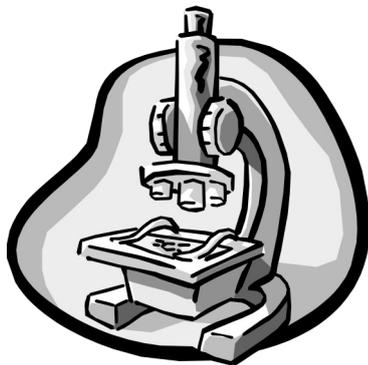
- 1º → Inspeção Preliminar
- 2º → Inspeção Detalhada
- 3º → Diagnóstico da Situação
- 4º → Estudo de Alternativas
- 5º → Definição da conduta

6

Ferramentas básicas para análise de Problemas Patológicos



7



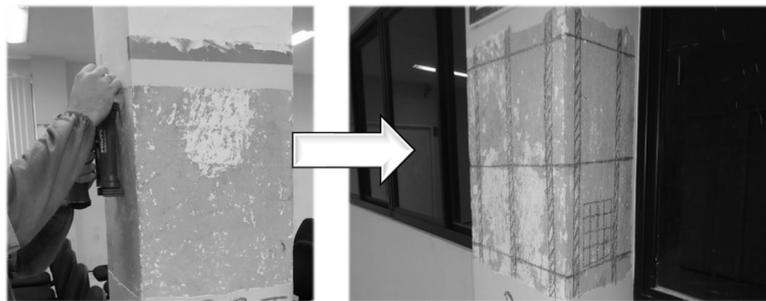
**Investigação
quanto à
Resistência
e homogeneidade**

8

Quanto à Resistência e homogeneidade

Localização das armaduras

Equipamento: pacômetro



9

Quanto à Resistência e homogeneidade

Localização das armaduras

Princípio:
Eletromagnetismo



10

Quanto à Resistência e homogeneidade

Localização das armaduras

Técnica auxiliar a muitas outras:

- Extração de testemunhos
- Resistividade elétrica
- Potencial de corrosão
- Velocidade de corrosão
- Exclerometria
- Ultrassom



11

Quanto à Resistência e homogeneidade

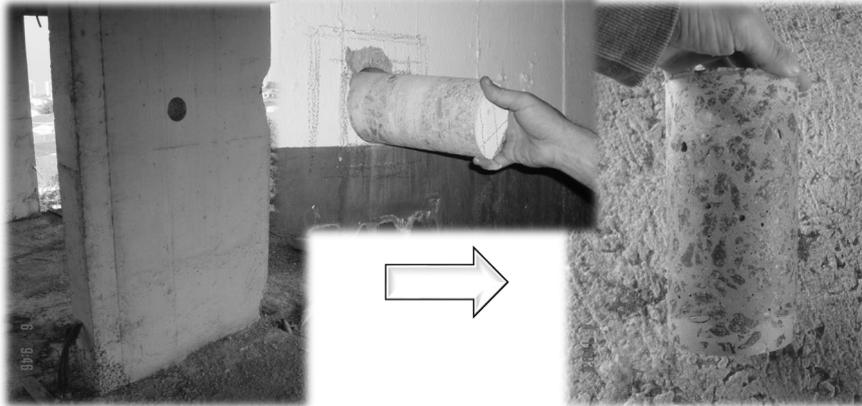
Extração de testemunhos:



12

Quanto à Resistência e homogeneidade

Extração de testemunhos:



13



14

Quanto à Resistência e homogeneidade

Extração de testemunhos:



15

Extração de testemunhos – Vantagens

- **Confiabilidade**
 - Condições de cura e compactação reais
- **Ensaio típicos:**
 - Absorção de água;
 - Módulo de elasticidade;
 - Resistência à compressão;
 - Resistência à tração (compressão diametral)
 - Caracterização da microestrutura
 - Reconstituição de traço

16

Extração de testemunhos - Desvantagens

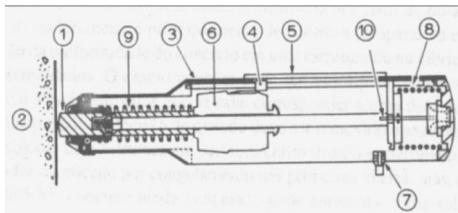
- Custo
- Tempo para a obtenção dos resultados
- Interferências do aço
- Ensaio destrutivo

17

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

- **Norma Brasileira:** ABNT NBR 7584/2012
- **Aplicação:** Verificação da dureza superficial, uniformidade e resistência à compressão do concreto
- **Equipamento mais utilizado:** esclerômetro de Schmidt



18

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

- **Princípio:** Esforço de compressão do pistão contra a superfície do concreto endurecido. Quando o pistão fica totalmente comprimido no interior do esclerômetro, ocorre a liberação da mola de impacto que projeta o pistão contra a superfície do concreto.



19

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria



20

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

- **Resultado:** Índice de reflexão

Pode ser relacionado por meio de uma *curva empírica de correlação* com a resistência do concreto da superfície.

Trata-se, portanto, de um ensaio que avalia a *dureza superficial* do concreto e a relaciona com sua *resistência à compressão*.

21

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

Pode ser empregada de forma qualitativa:

- Permite a comparação do concreto de diferentes regiões de uma estrutura.

Ex.: Um concretagem em que um caminhão betoneira entregou um concreto que não atingiu f_{ck} e não foi feito o mapeamentos de lançamento do concreto.

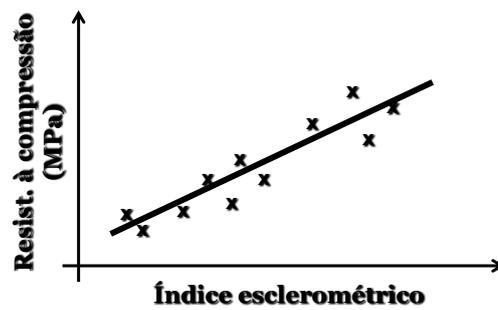
22

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

Pode ser empregada de forma quantitativa:

- Estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da correlação com a resistência de testemunhos extraídos.

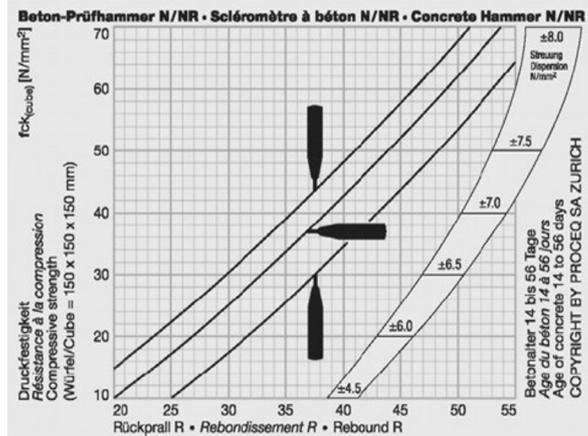


23

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

Ábaco do equipamento

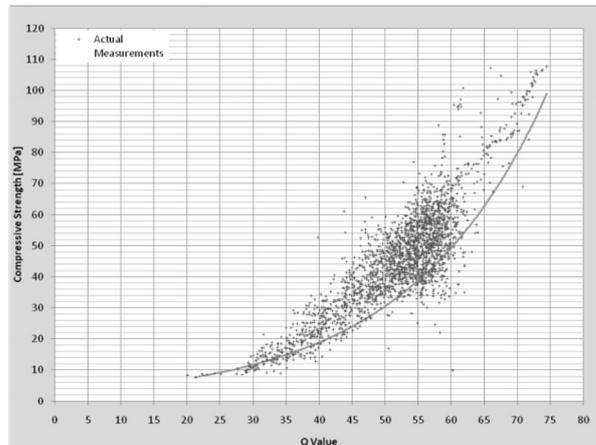


24

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

Ábaco do equipamento



25

Quanto à Resistência e homogeneidade

Esclerometria

Recomendações

- Evitar leituras a distância < 6 cm das arestas;
- Efetuar no mínimo 9 leituras em cada área;
- Evitar impacto sobre armadura e agregados;
- Não realizar mais de 1 impacto no mesmo ponto;
- Usar distância mínima entre impactos de 30 mm.

26

Quanto à Resistência e homogeneidade

Ultrassom

- **Norma Brasileira:** ABNT NBR 8802:2013
- **Aplicação:**
 - Verificação da uniformidade do concreto;
 - Detectar eventuais falhas internas;
 - Avaliar a profundidade de fissuras;
 - Determinar o módulo de deformação do concreto.

27

Velocidade de propagação de onda ultrassônica (ABNT NBR 8802:2013)

- Verificação da uniformidade do concreto;
- Detectar eventuais presença de falhas internas
 - Vazios de concretagem
 - Fissuras
- Avaliar a profundidade de fissuras;
- Medir o módulo elasticidade dinâmico

28

Quanto à Resistência e homogeneidade

Ultrassom

- **Princípio:** Propagação do som através do material
- Conhecendo-se a distância entre o *transdutor emissor* e o *transdutor receptor* da onda ultrassônica e medindo-se o *tempo* decorrido para este percurso, calcula-se a velocidade de propagação da onda no concreto.

$$Velocidade = \frac{Espaço}{Tempo} \text{ m/s}$$

29

Quanto à Resistência e homogeneidade

Ultrassom

Velocidade de propagação está ligada a qualidade do concreto.

$$V_{\text{som-gases}} < V_{\text{som-líquidos}} < V_{\text{som-sólidos}}$$

Este fato ajuda a entender a forma de analisar os resultados de diferentes concretos

30

Quanto à Resistência e homogeneidade

Ultrassom

Funcionamento:

- Emissor e receptor na superfície com uma distância conhecida entre eles para assegurar o contato.
- Usar vaselina ou graxa para facilitar o contato.
- Fazer várias leituras até obter um valor mínimo, quando se considera que o contato é adequado.

31

Quanto à Resistência e homogeneidade

Ultrassom

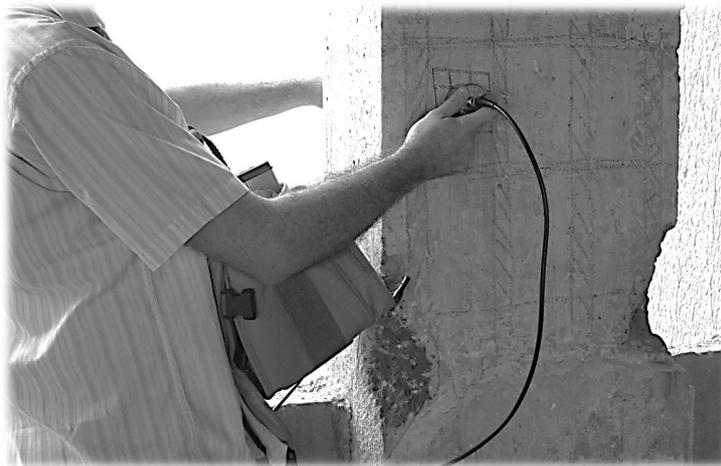
calibração



32

Quanto à Resistência e homogeneidade

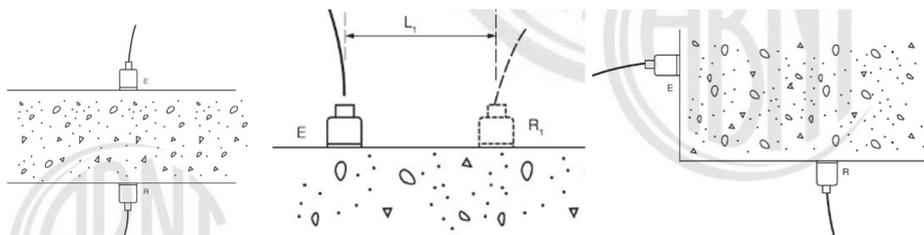
Ultrassom



33

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Ultrassom



**Tipos de transmissão: transmissão direta,
transmissão semi-direta e transmissão indireta.**

34

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Ultrassom - resultados do ensaio

➤ CÁLCULO DA VELOCIDADE $V = \frac{L}{T}$, em m/s

➤ CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO

$$E = \frac{V^2 \times \gamma}{g} \times \frac{(1 + \eta) \times (1 - 2\eta)}{(1 - \eta)}, \text{ em kgf/cm}^2$$

onde:

V = velocidade em cm/s

γ = densidade (kgf/cm³) $\cong 2,4 \times 10^{-3}$

g = gravidade $\cong 1000 \text{ cm/s}^2$

η = Coef. Poisson $\cong 0,2$

35

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Ultrassom – cálculo da resistência

➤ CÁNOVAS

$$\checkmark 20 \text{ GPa} \leq E \leq 47 \text{ GPa}$$

$$\checkmark f_c = 3,5 \times 10^{-9} * E^2 - 10^{-3}E + 200$$

➤ GORISSE

$$\checkmark f_c = (16,7)^{E/122500}$$

➤ CURVAS DE CORRELAÇÃO (V x MPa)

✓ fabricantes

✓ estudos

36

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Ultrassom

➤ **Fatores que influenciam no ensaio**

- ✓ Umidade ($\approx 8\%$)
- ✓ Armadura transversal
- ✓ Armadura longitudinal
- ✓ Falhas de concretagem
(queda de v de 10 a 20%)
- ✓ Natureza e característica do agregado ($\approx 10\%$)

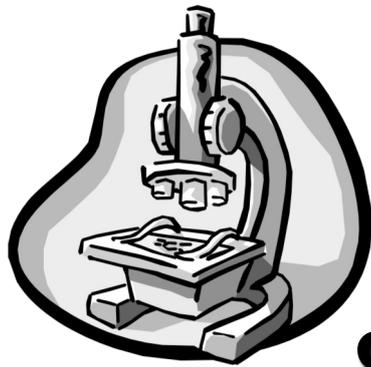
37

Quanto à Resistência e homogeneidade

Ultrassom

Velocidade da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

38



Investigação quanto à Problemas de deformação

39

Quanto à Problemas de deformação

Provas de carga ABNT NBR 9607:2012

Consiste em colocar sobre a estrutura um parte dela cargas verticais iguais ou superiores às suportadas em condições normais com o objetivo de observar seu comportamento.

Usados após:

- Incêndios;
- Abalos sísmicos;
- Impactos;
- Edificações submetidas a ambientes mais agressivos do que previstos em projeto;
- Mudanças nas condições de serviço.

40

Quanto à Problemas de deformação

Provas de carga

Estáticas:

Quando não há variação periódica de cargas

Dinâmicas:

Quando produzem oscilações na estrutura
(pontes de grandes vãos, ferroviárias)

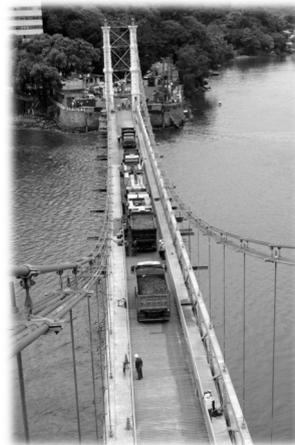
41

Quanto à Problemas de deformação

Provas de carga

Pontes

- Caminhões
- Locomotivas
- Pedras
- Outras fontes de carregamentos disponíveis no local



42

Quanto à Problemas de deformação

Provas de carga

Edifícios

- Reservatório feitos de lona d'água
- Sacos de cimento ou areia



43

Quanto à Problemas de deformação

Provas de carga

- O carregamento não deve ocasionar dano de caráter irreversível à estrutura
- Acompanhar as deformações ocasionadas pela carga aplicada



44

Quanto à Problemas de deformação

Módulo de elasticidade de corpos de prova extraídos

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

σ = tensão aplicada (MPa)

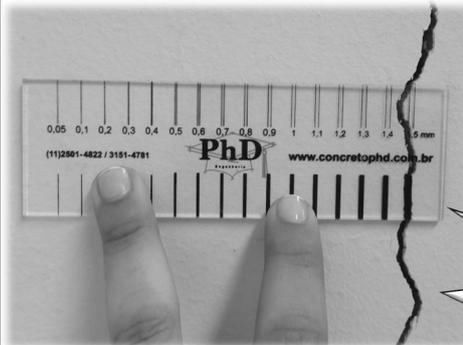
ε = deformação do corpo de prova



45

Quanto à Problemas de fissuras

Fissurômetro



Fissuras ativas

Fissuras passivas

**É importante investigar
a causa!!!**

46



Investigação quanto à corrosão de armaduras

47

Quanto à corrosão de armaduras

Despassivação por Carbonatação

- Ca(OH)_2 --- $\text{pH} \geq 12$
(aço passivado)
- $\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Mais alcalino	Menos alcalino
------------------	-------------------

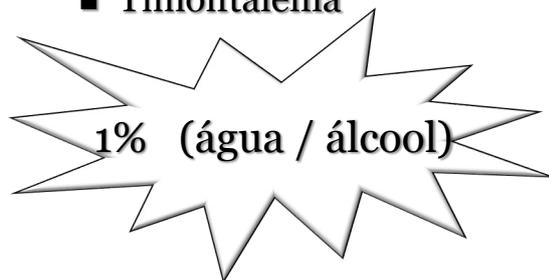


48

Quanto à corrosão de armaduras

Despassivação por Carbonatação

- Fenolftaleína
- Timolftaleína



49

Quanto à corrosão de armaduras

Despassivação por Cloretos

- ABNT NBR 12655:2015

Tabela 5 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Classe de agressividade (5.2.2)	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl ⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

50

Quanto à corrosão de armaduras

Despassivação por Cloretos

Extração de amostras



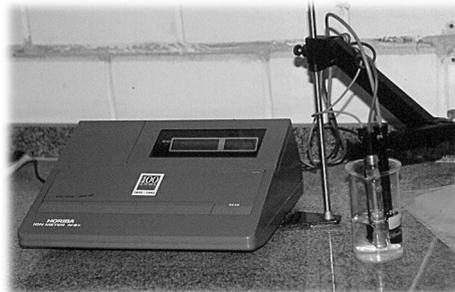
51

Quanto à corrosão de armaduras

Despassivação por Cloretos

Determinação química

ASTM C 1152
Standard Test Method for
Acid-Soluble Chloride in
Mortar and Concrete



52

Quanto à corrosão de armaduras

Resistividade Elétrica

Equipamento dos quatro eletrodos Wenner



53

Quanto à corrosão de armaduras

Resistividade Elétrica

Princípio:

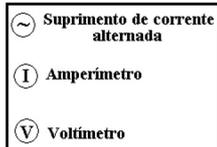
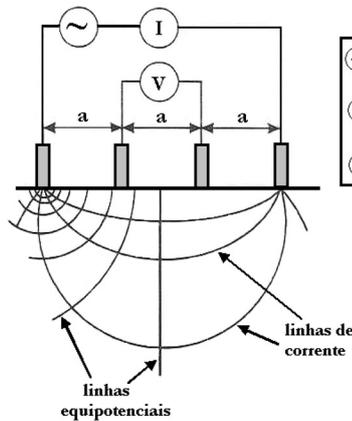
O equipamento imprime uma corrente entre os eletrodos externos e conseqüentemente uma voltagem é captada nos eletrodos internos.



54

Quanto à corrosão de armaduras

Resistividade Elétrica



$$\rho = 2 \pi a V/I$$

Onde:

ρ é a resistividade (ohm x cm);
 a é o espaçamento entre eletrodos (cm);

V é a voltagem (Volts);

I é a corrente (Ampere).

55

Quanto à corrosão de armaduras

Resistividade Elétrica

CEB 192

RESISTIVIDADE DO CONCRETO	INDICAÇÃO DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO
$\rho > 20 \text{ kohm x cm}$	Desprezível
10 a 20 kohm x cm	Baixa
5 a 10 kohm x cm	Alta
$\rho < 5 \text{ kohm x cm}$	Muito alta

56

Quanto à corrosão de armaduras

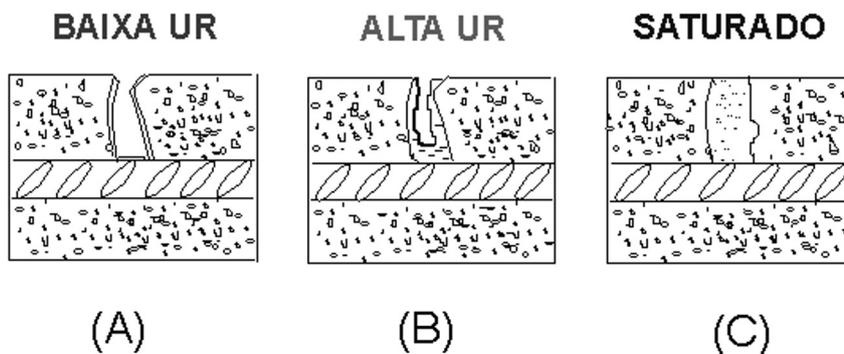
Umidade:



57

Quanto à corrosão de armaduras

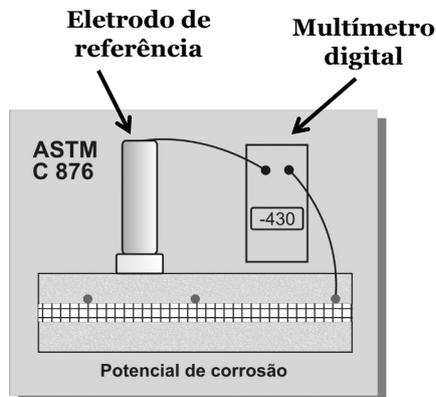
Umidade: Influência na corrosão



58

Quanto à corrosão de armaduras

Potencial de corrosão



59

Quanto à corrosão de armaduras

Potencial de corrosão

Aplicação:

- Localizar zonas com corrosão;
- Monitorar estruturas de concreto armado X tempo;
- Avaliar serviços de recuperação.



60

Quanto à corrosão de armaduras

Potencial de corrosão

ASTM C 876 (2015)

VALOR DE POTENCIAL DE CORROSÃO	PROBABILIDADE DE ESTAR OCORRENDO CORROSÃO
>95%	$E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$
Aproximadamente 50%	$-200 \text{ mV} < E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$
<5%	$E_{\text{corr}} > -200 \text{ mV}$

61

Quanto à corrosão de armaduras

Velocidade (corrente) de corrosão

Gecor



62

Quanto à corrosão de armaduras

Velocidade (corrente) de corrosão

Vida útil



63

Quanto à corrosão de armaduras

Velocidade (corrente) de corrosão

Critério de avaliação (Andrade – Manual Geocisa)

VELOCIDADE DE CORROSÃO		NÍVEL DE CORROSÃO
$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{ano}$	
< 0,1	< 1	Desprezível
0,1 – 0,5	1 – 5	Baixo
0,5 – 1	5 – 10	Moderado
> 1	> 10	Alto

64



65