



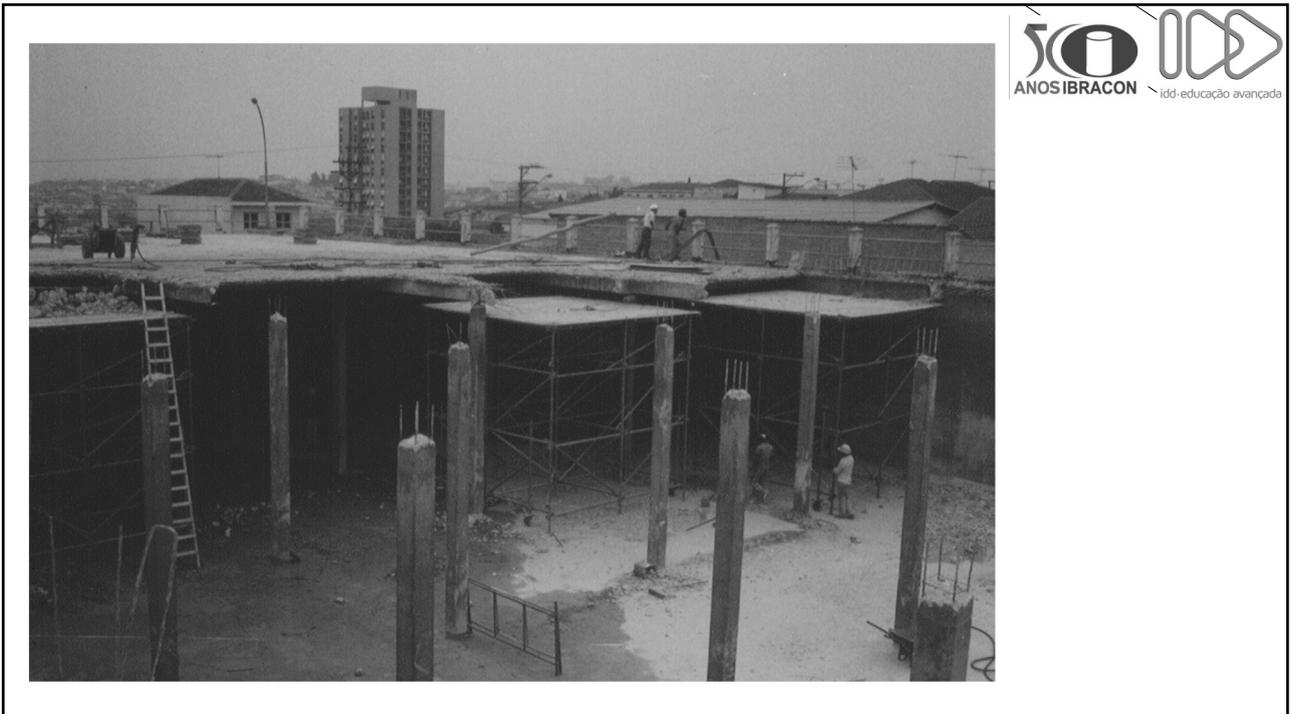
CURSO PREPARATÓRIO PARA
INSPETOR I – INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO SEGUNDO A ABNT NBR 16230:2013



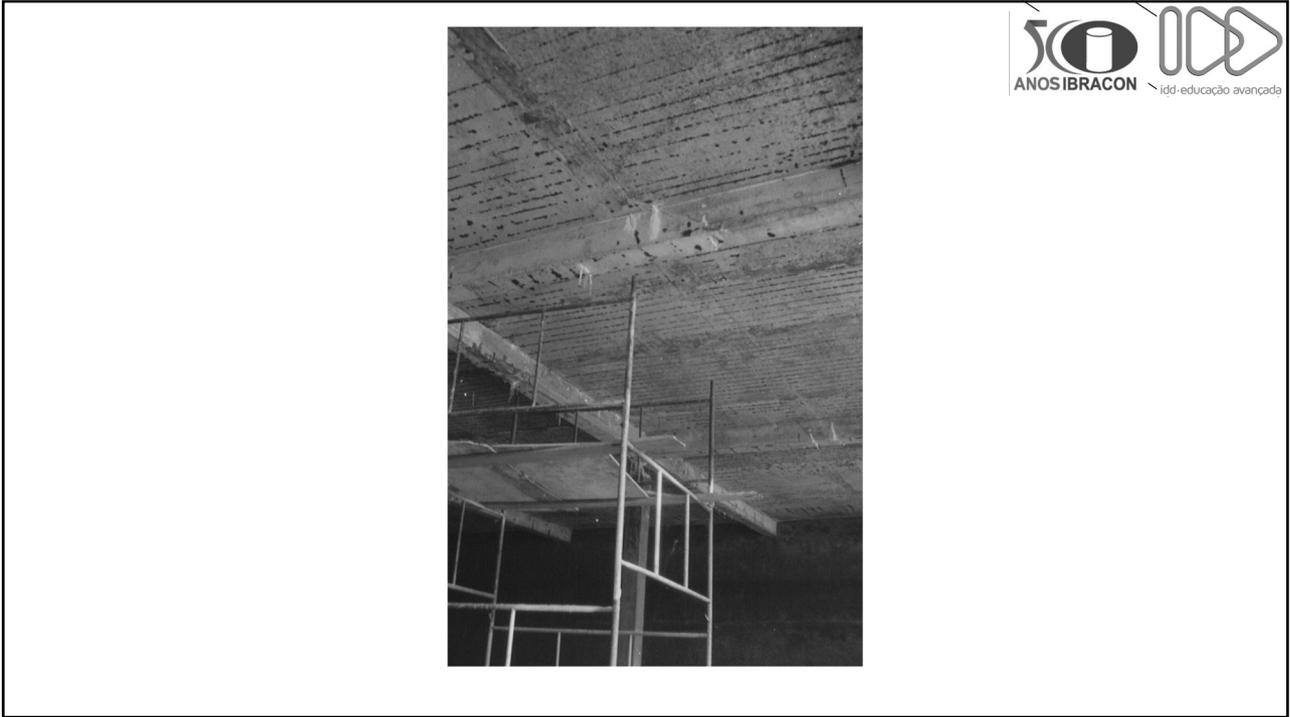
CORROSÃO ARMADURAS

Prof. Dr. Paulo Helene

1



2



3



4



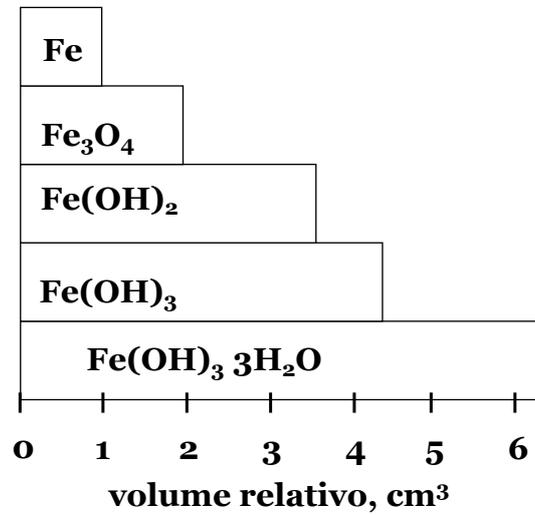
5

Corrosão das armaduras nas estruturas de concreto

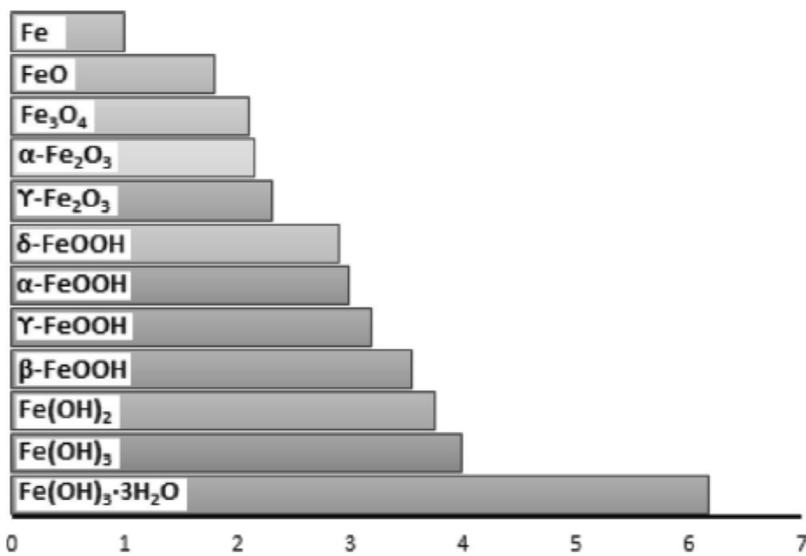
- Corrosão é o problema patológico mais importante
- NACE estima que os custos anuais derivados da corrosão alcançam nos USA,
U\$400 Bilhões!!!
- NACE estima que 25% a 30% desse custo deve ser atribuído à corrosão de armaduras

6

Produtos da Corrosão



7

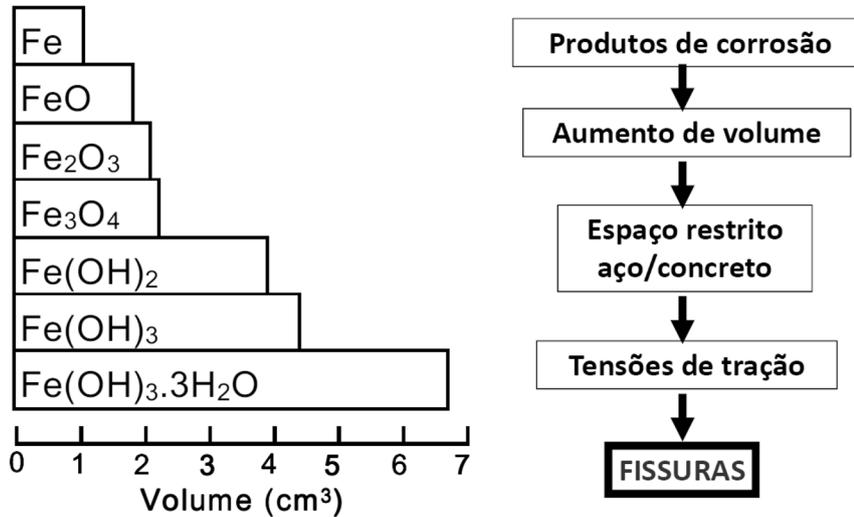


Volumes relativos do ferro e seu produto de reação.

ACI 222

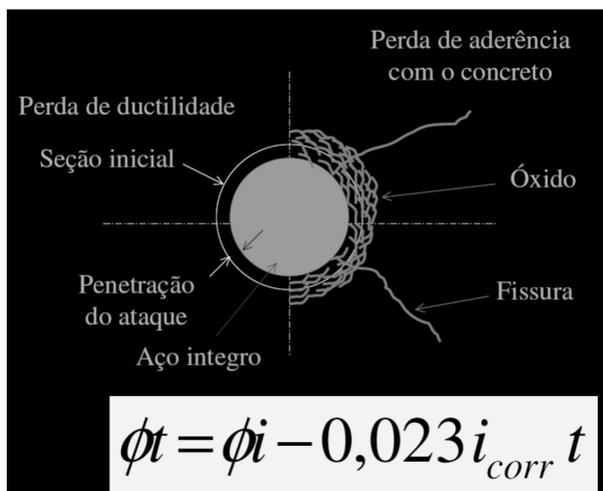
8

Corrosão da armadura



9

Consequências da corrosão de armaduras no comportamento estrutural



10

Corrosão de armaduras



- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão

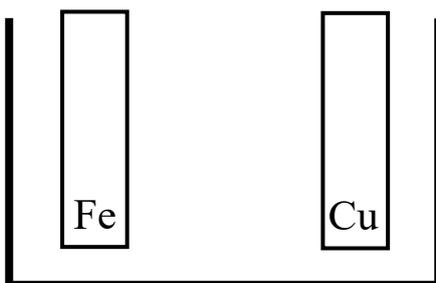


11

Corrosão de armaduras



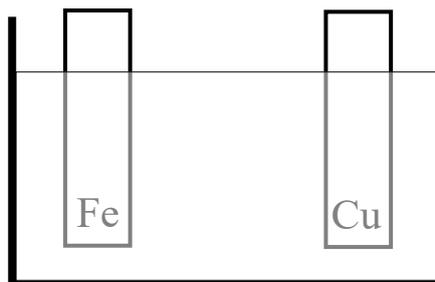
- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais diferentes (ddp)



12

Corrosão de armaduras

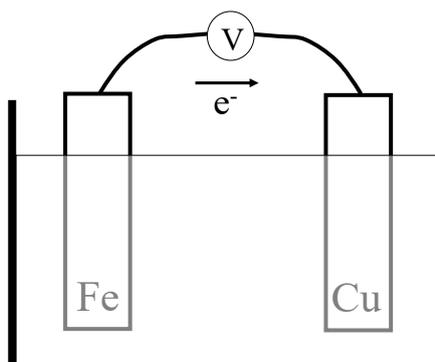
- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais diferentes (ddp)
- Eletrólito



13

Corrosão de armaduras

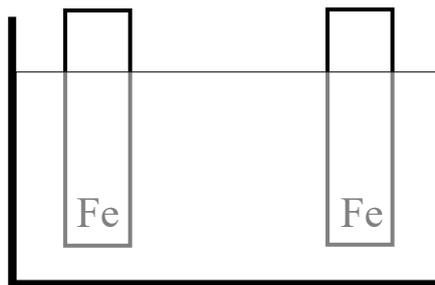
- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais diferentes (ddp)
- Eletrólito
- Contato elétrico



14

Corrosão de armaduras

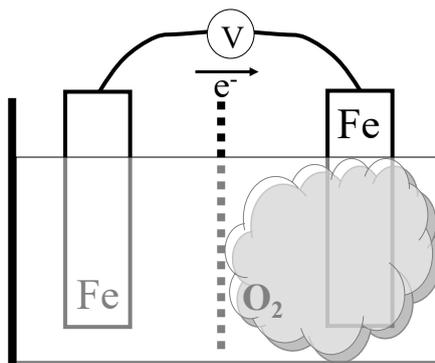
- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais “iguais” + eletrólito + contato elétrico



15

Corrosão de armaduras

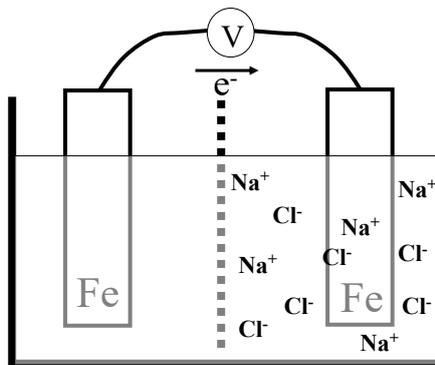
- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais “iguais” + eletrólito + contato elétrico
- Aeração diferencial



16

Corrosão de armaduras

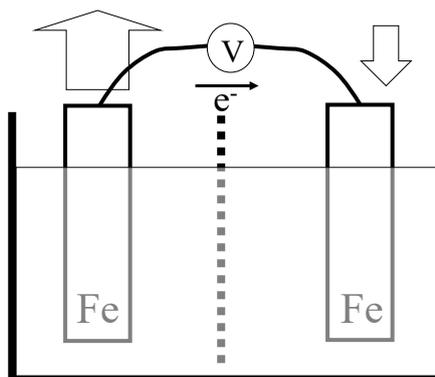
- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais “iguais” + eletrólito + contato elétrico
- Concentração salina diferencial



17

Corrosão de armaduras

- Pilha eletroquímica – Condições para que haja corrosão
- Metais “iguais” + eletrólito + contato elétrico
- Tensão (energia) diferencial



18

Corrosão de armaduras



- Condições para ocorrência no concreto
- Eletrólito
 - U.R.=40% \implies 70 litros de água/m³
 - U.R.=70% \implies 95 litros de água/m³
 - U.R.=95% \implies 140 litros de água/m³

19

Corrosão de armaduras



- Condições para ocorrência no concreto
- Diferença de potencial (ddp)
 - Imperfeições na superfície da barra.
 - Diferenças de:
 - Aeração
 - Umidade
 - Concentração salina
 - Tensão no aço

20

Corrosão de armaduras



- Condições para ocorrência no concreto
- Oxigênio + “água” → “ferrugem”

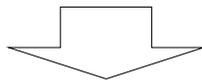


21

Corrosão de armaduras



Há condições para o desenvolvimento do processo corrosivo



Mas não há corrosão !

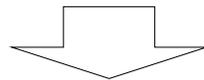
22

Corrosão de armaduras

Há condições para o desenvolvimento do processo corrosivo



Mas não há corrosão !



Passivação

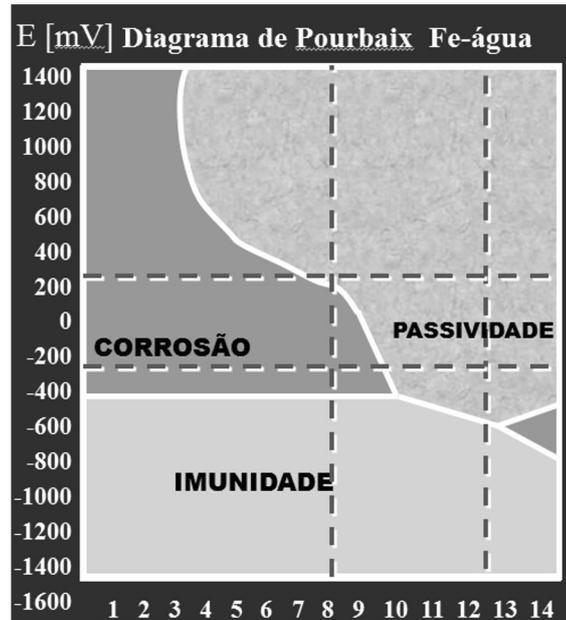
23

Passivação

- Película fina de um filme de óxido invisível, estável e aderente formado na superfície do concreto
- Estado em que o aço se encontra no interior do concreto por ser um meio bastante alcalino ($\text{pH} > 12,1$)

24

Diagrama de Pourbaix



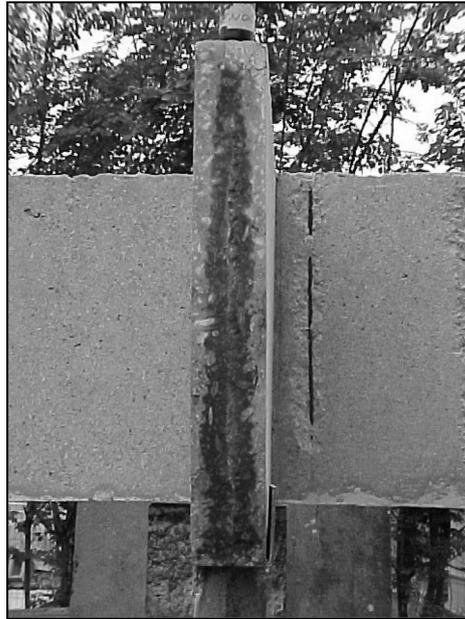
25

Perda de passivação

- Carbonatação do concreto
- Presença de íons cloreto
- Fungos, bolores
- Fissuras

26

Aço →
Corrosão por
carbonatação
Grelha da Civil
demolida



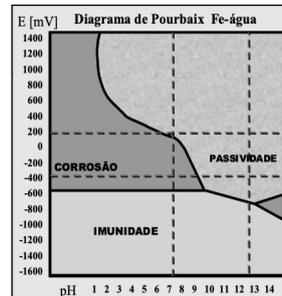
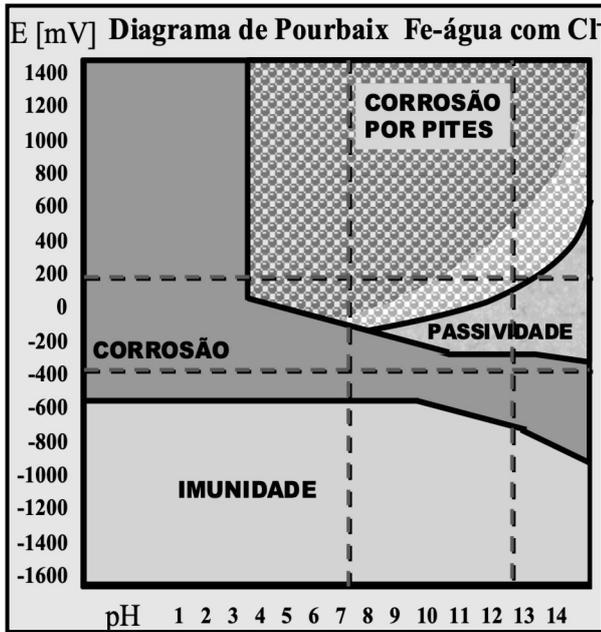
27

Cloretos

- Promove a despassivação precoce do aço, mesmo em ambientes muito alcalinos
- O teor crítico = 0,4% massa de cimento
- Origem dos cloretos no concreto:
 - Difusão de íons a partir do exterior (atmosfera marinha)
 - Aditivos aceleradores de pega (CaCl_2)
 - Uso de areia ou água contaminada
 - Tratamentos de limpeza (ácido muriático)

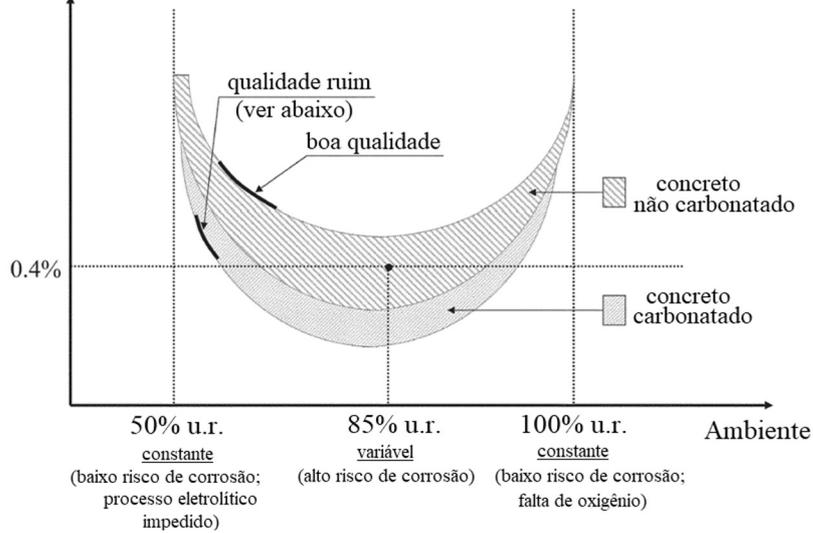
28

Cloretos



29

Relação crítica
Cloreto/Cimento



Teor crítico de cloreto de acordo com as recomendações do CEB-FIB (1992)

30



Ponte em Recife

31

Fungos & bolores → colonias ácidas



32

Fissuração

fib

Model Code for Service Life Design
Bulletin 34, 2006

item 3.3 → Cracks

$$C \geq 50\text{mm}$$

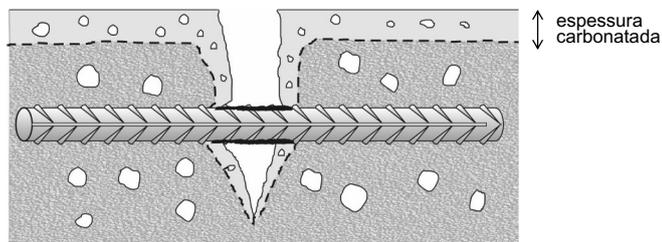
$$a/c \leq 0,50$$

$$w_k \leq 0,3\text{mm}$$

→ vida útil ≥ 50 anos!

33

Fissuração



NBR 6118
 $\leq 0,4$ a $0,2$ mm

34

“Tabuleiros de Pontes”



Nos locais sem fissura a penetração de cloretos a 5cm de profundidade leva, em média, 8anos para alcançar concentrações de $0,6\text{kg/m}^3$, e aos 20 anos de idade chega a $2,4\text{kg/m}^3$.

Pesquisa realizada em 57 pontes nos USA com idades de 2anos a 20anos.
Densidade de fissuras de $0,16\text{m/m}^2$ a $0,8\text{m/m}^2$. Aberturas de fissuras $< 0,3\text{mm}$.

(LINDQUIST, W.D. et ally. Effect of Cracking on Chloride Content in Concrete Bridge Decks. ACI Materials Journal, Dec. 2006. p. 467-73)

35

“Tabuleiros de Pontes”



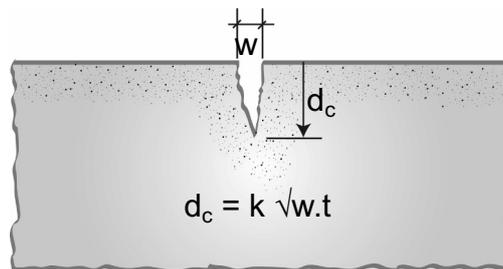
Nos locais com fissura a penetração de cloretos a 5cm de profundidade leva, em média, 6meses para alcançar concentrações de $0,6\text{kg/m}^3$, e aos 20 anos de idade chega a $5,4\text{kg/m}^3$.

Pesquisa realizada em 57 pontes nos USA com idades de 2anos a 20anos.
Densidade de fissuras de $0,16\text{m/m}^2$ a $0,8\text{m/m}^2$. Aberturas de fissuras $< 0,3\text{mm}$.

(LINDQUIST, W.D. et ally. Effect of Cracking on Chloride Content in Concrete Bridge Decks. ACI Materials Journal, Dec. 2006. p. 467-73)

36

Carbonatação na fissura



Para dobrar d_c  $w \times 4$
 $t \times 4$

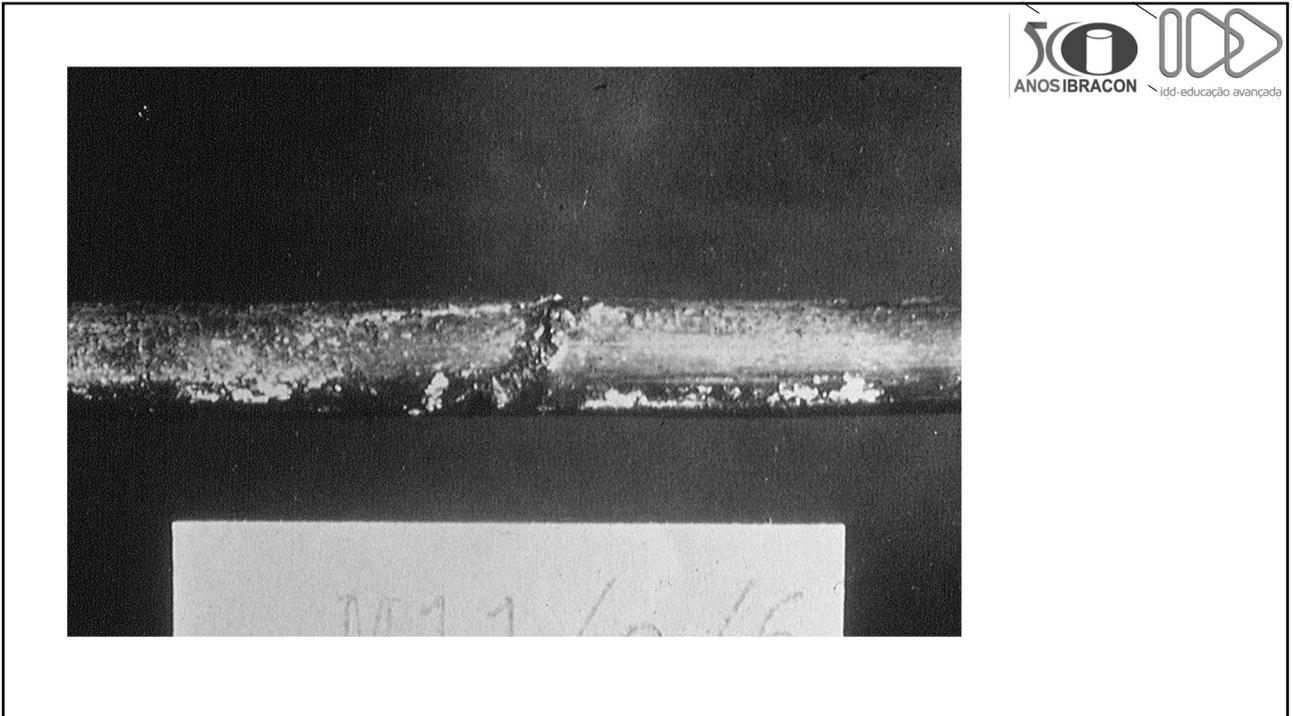
Para dobrar t  $w : 2$
 $d_c \times \sqrt{2}$

37

Consequências

- cloretos
- carbonatação

38



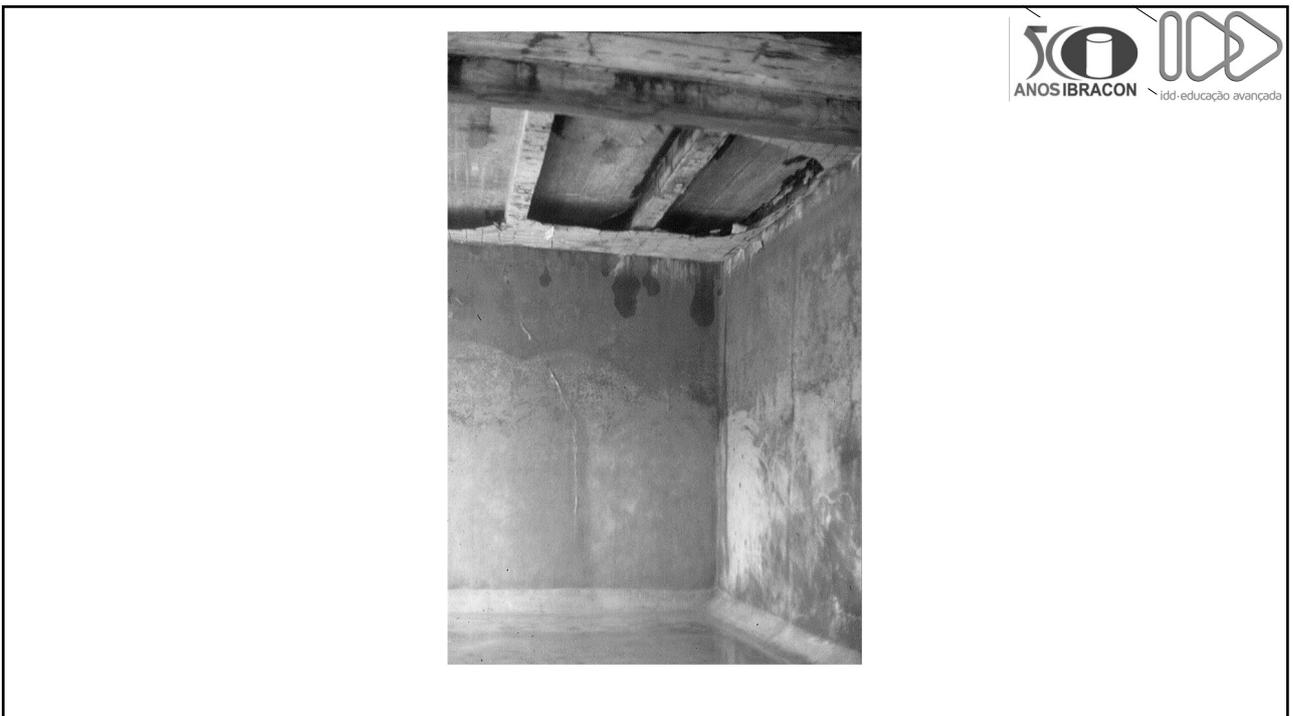
39



40



41



42



43



44

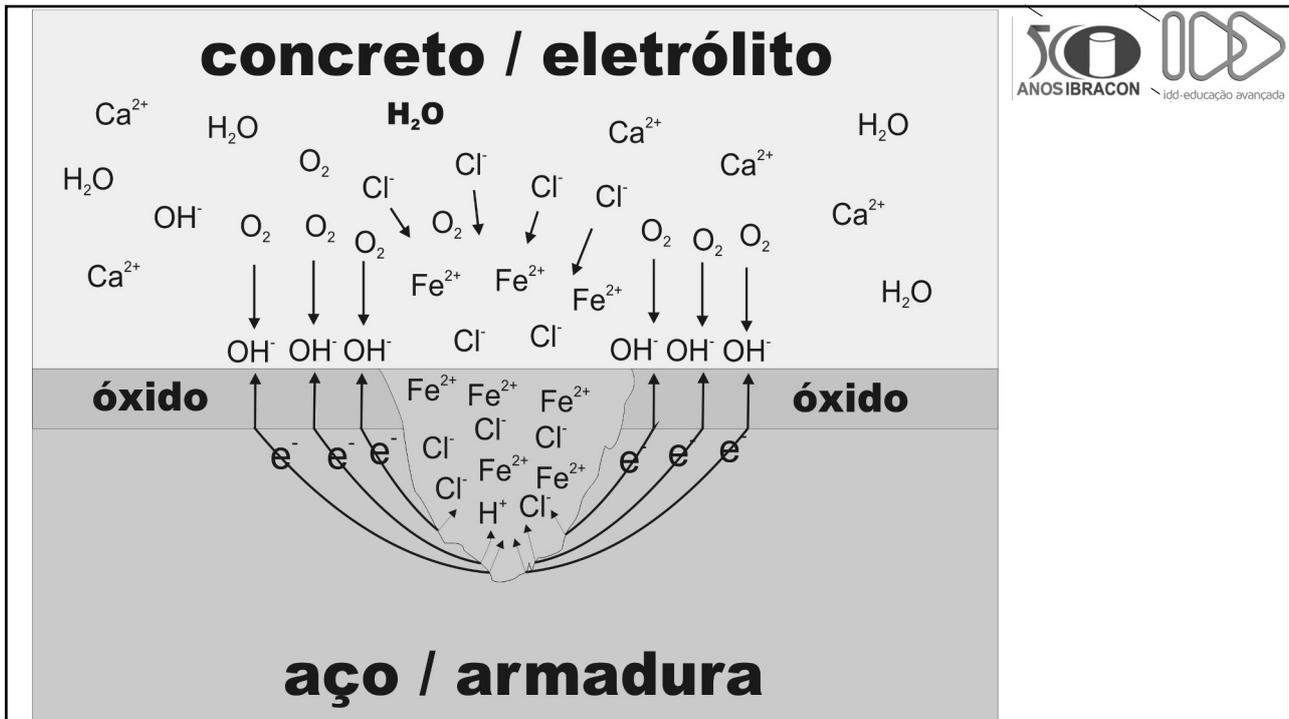
Cloretos

Carbonatação

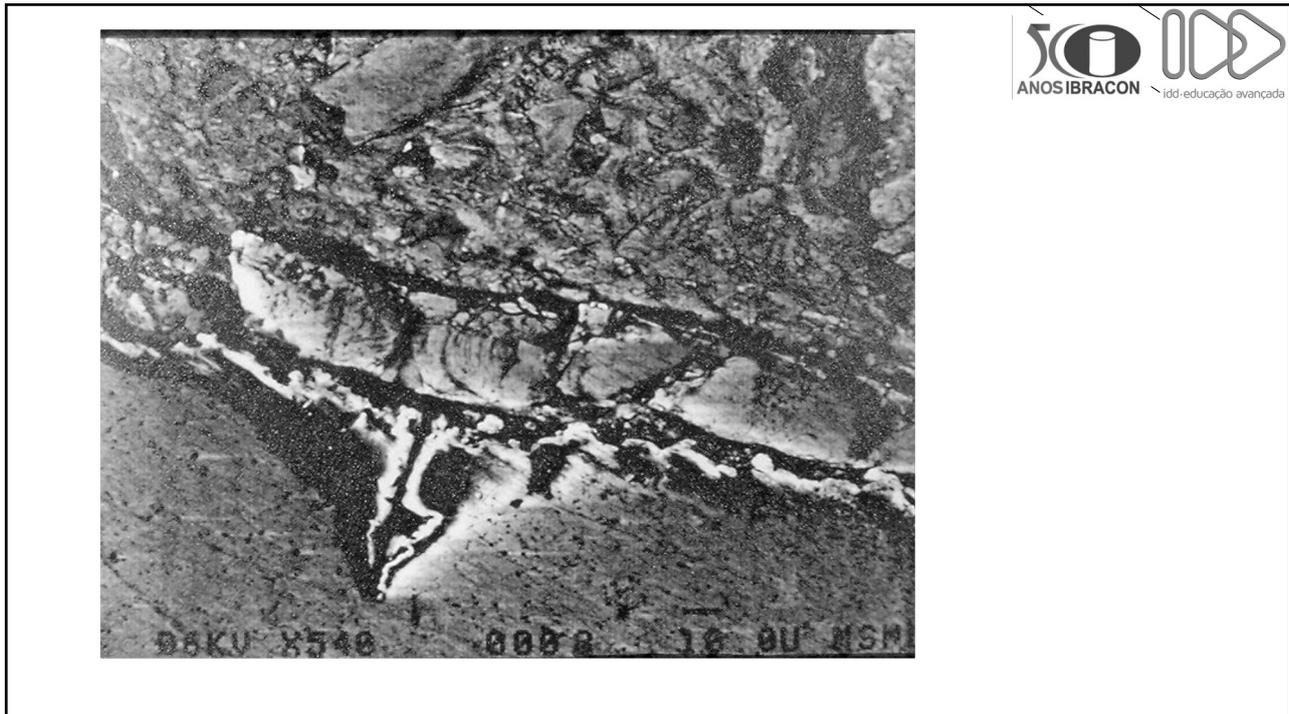
45

Cloretos

46



47



48

Limites admissíveis de cloreto para obra nova *ACI 222*



Categoria	Limite de cloreto para obra nova (% em massa de material cimentício*)	
	Método de ensaio	
	Solúvel em ácido	Solúvel em água
	ASTM C1152/ C1152M	ASTM C1218/ C1218M
Concreto protendido	0,08	0,06
Concreto armado em condições úmidas	0,20	0,15
Concreto armado em condições secas†	0,30	0,25

*Apenas sistemas baseados em cimento Portland. O material cimentício total inclui cimento Portland e os materiais cimentícios suplementares (MCS); No entanto, para determinar o nível admissível de cloreto, o teor de MCS não pode exceder o teor de cimento Portland.

†Interior do concreto tipicamente protegido de umidade, alta umidade, ou ambos.

49

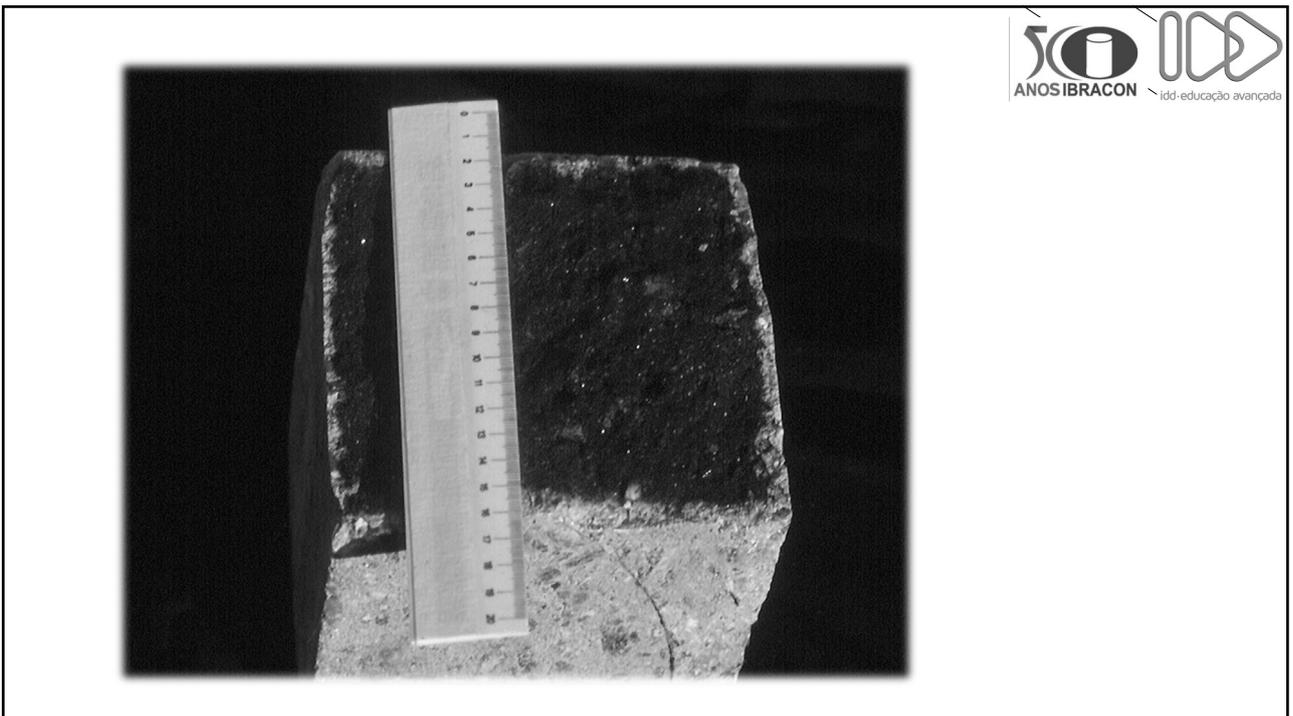


Carbonatação

50



51



52



53

Ponte do Socorro

São Paulo, 28 junho 1988

- laudo 5 meses antes
- 27 anos, $f_{ck} = 16$ MPa
- Inspeções 81, 83, 84, 87,
- Janeiro 88
- Vão de “52 m.”

- custo = incomensurável

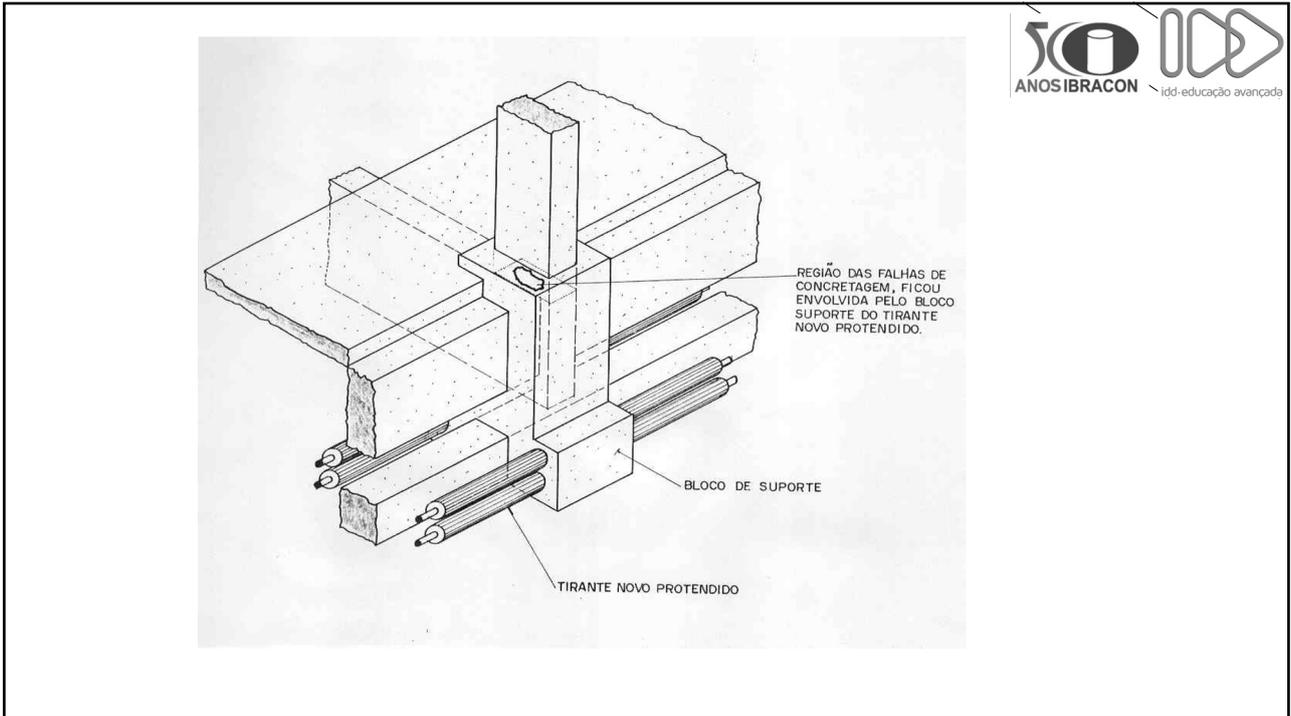
54



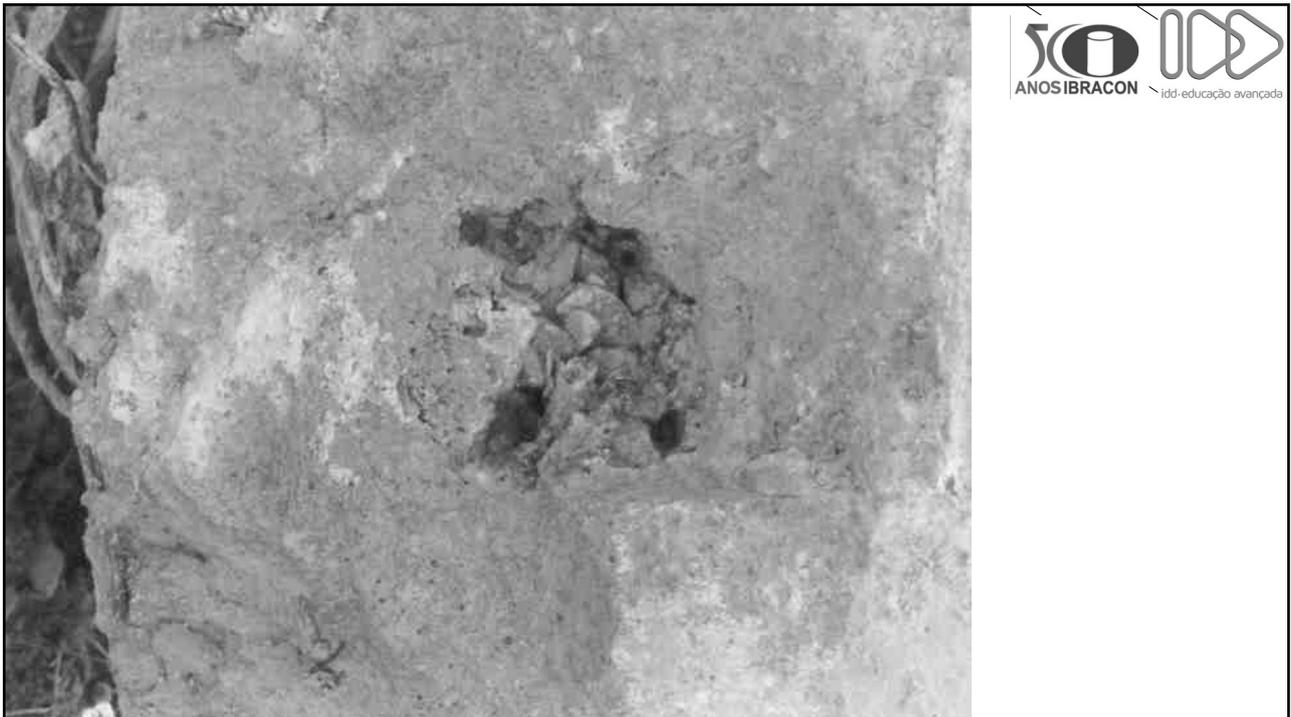
55



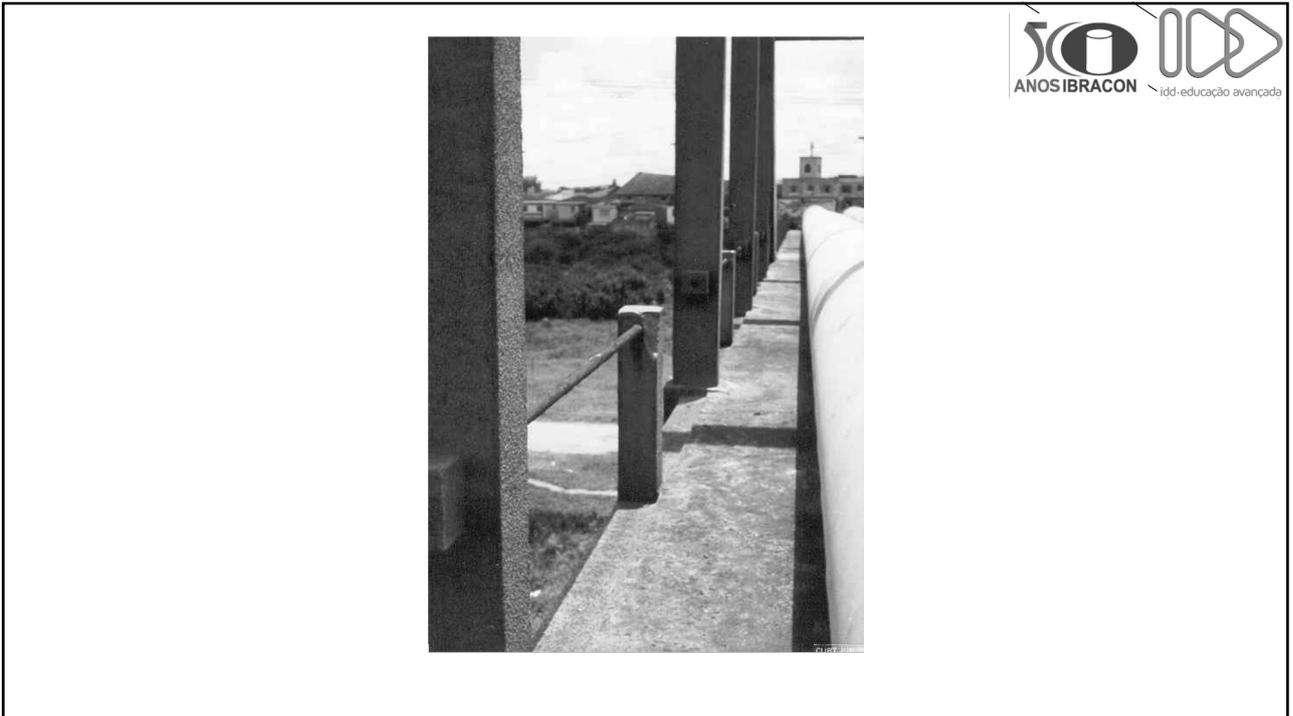
56



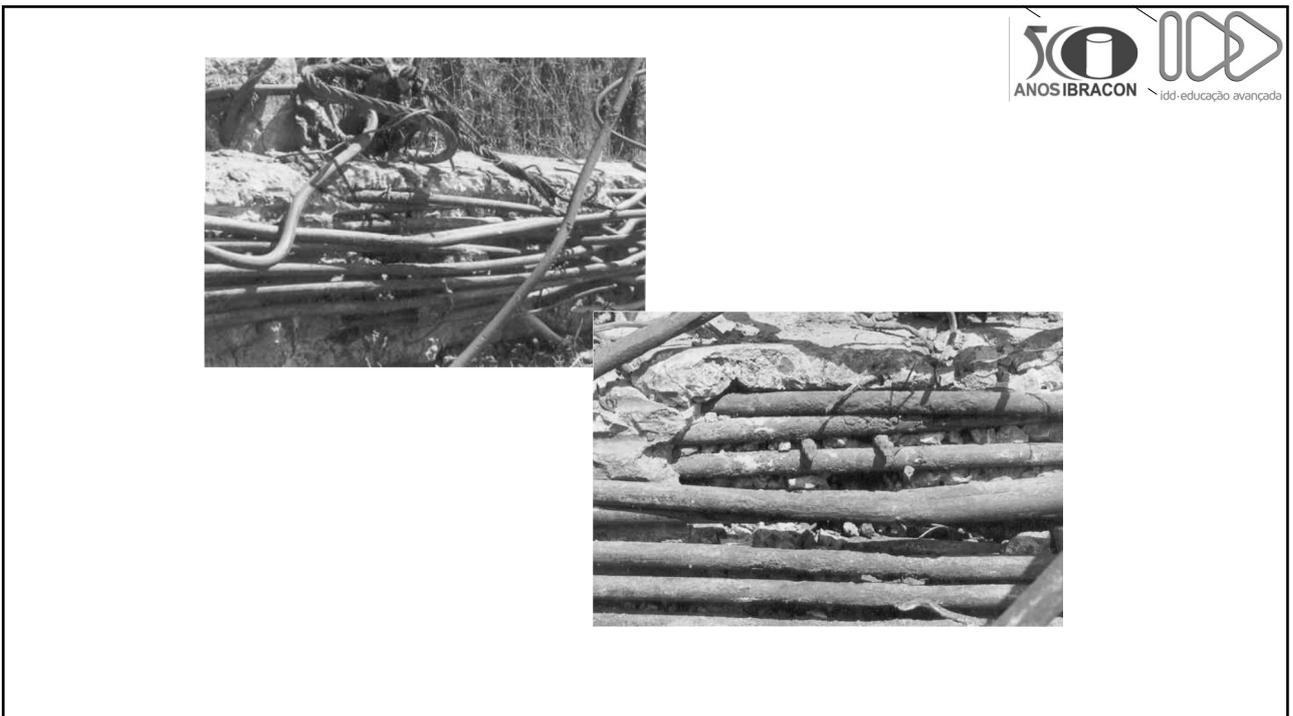
57



58



59



60

Ponte dos Remédios

São Paulo, 1997

Lauda 6 meses antes

36 anos

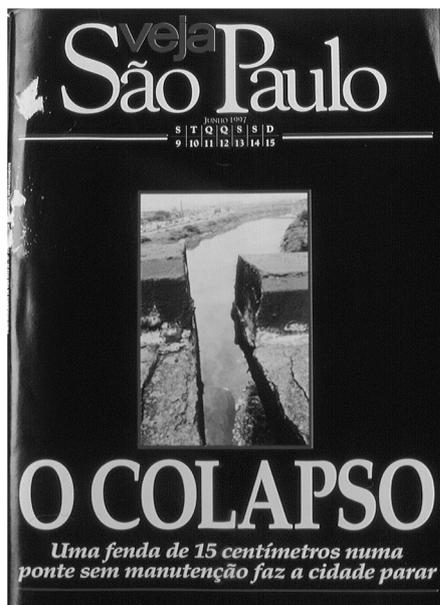
$f_{ck} = 21 \text{ MPa}$

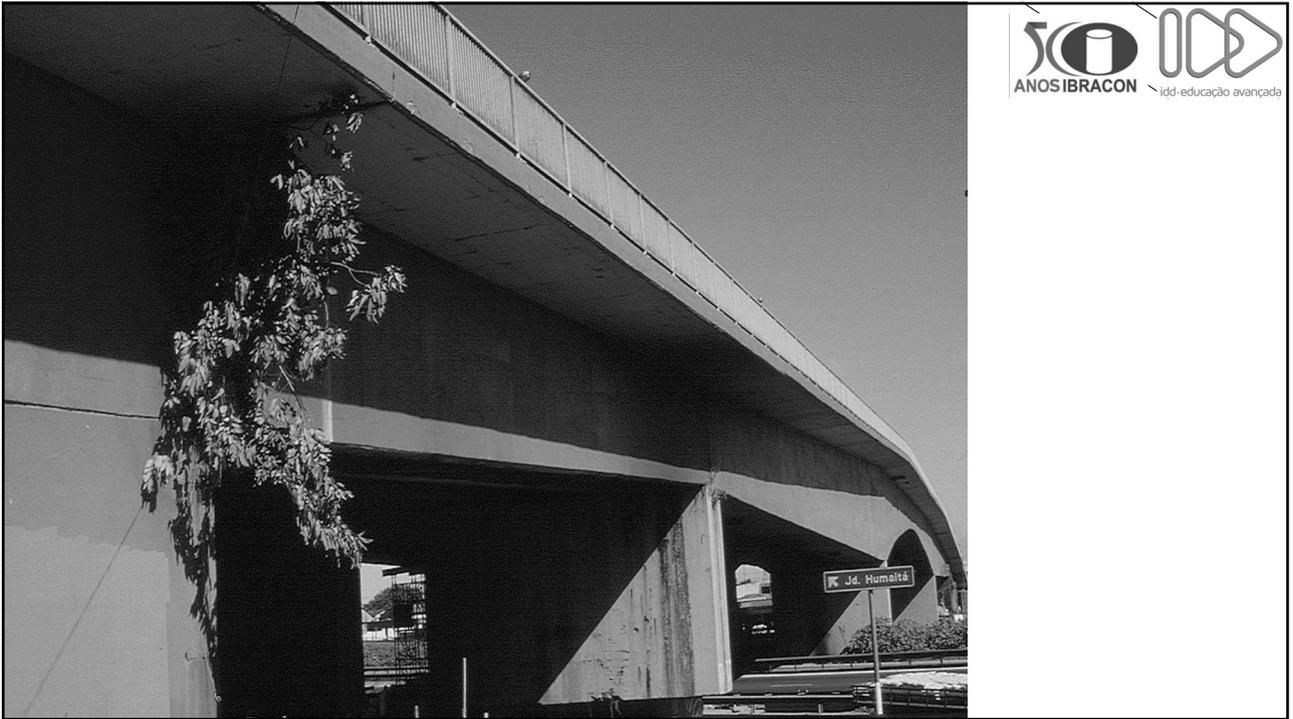
Custo = 3 vezes uma ponte nova

61

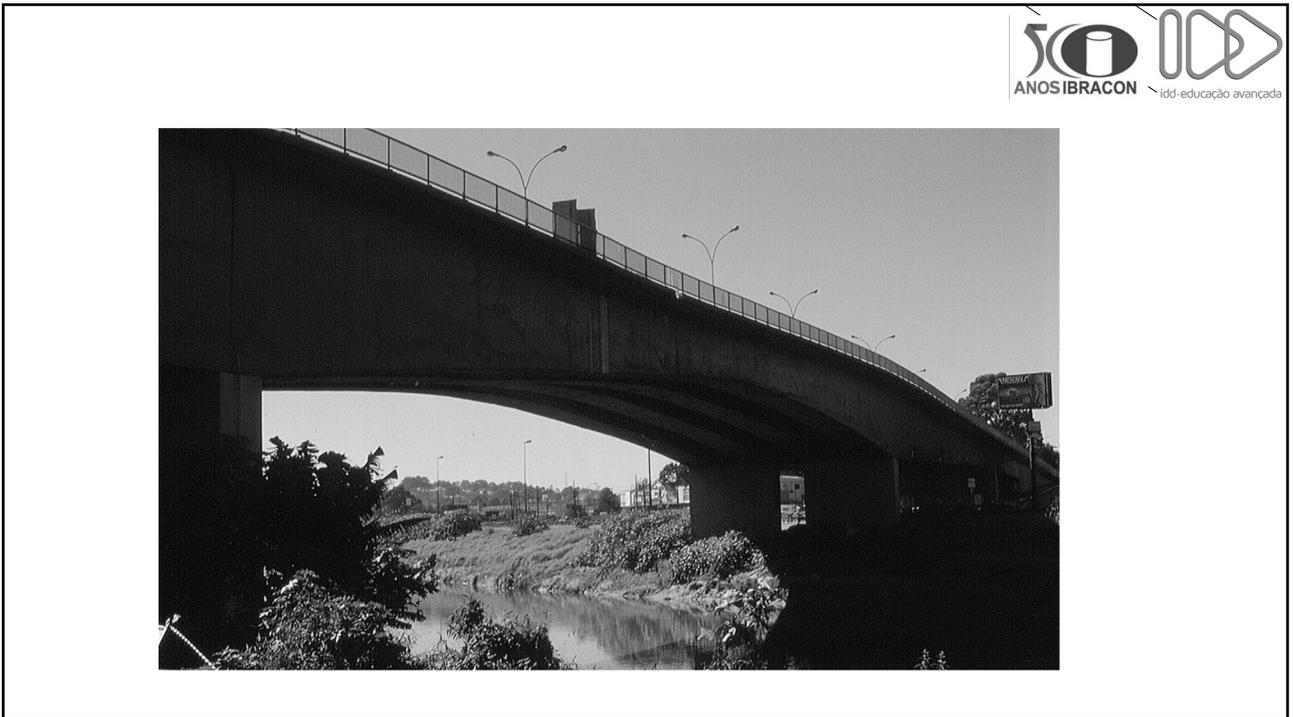


62





65

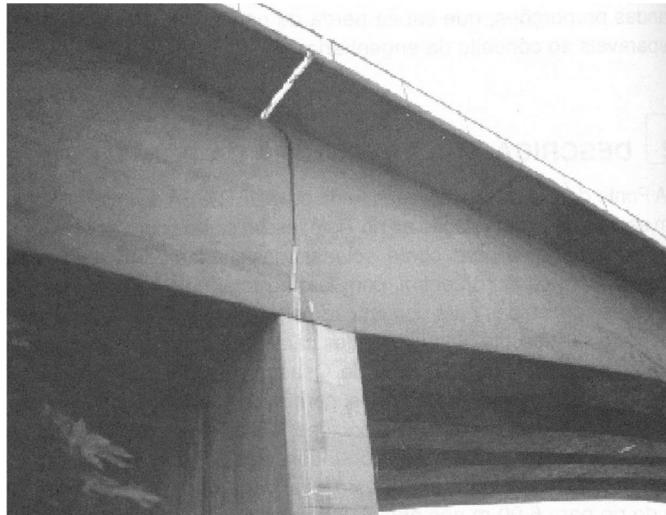


66



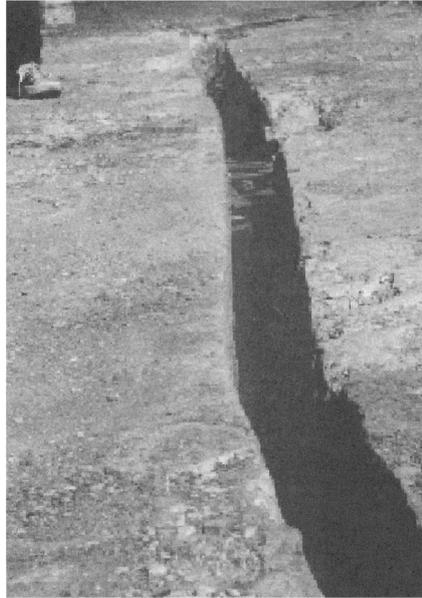
67

Ponte dos Remédios



Vista lateral da rachadura

68

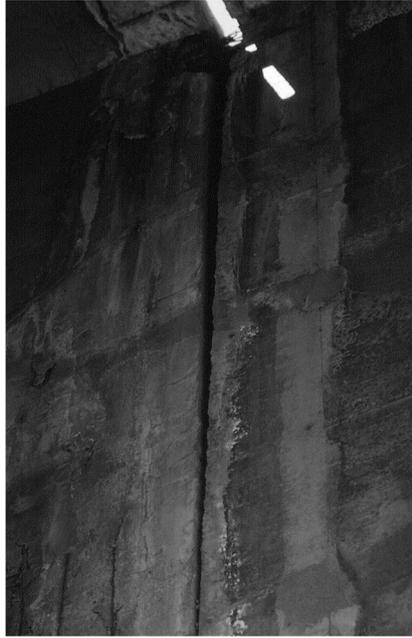


Vista superior da rachadura

69



70



71



72



73

OBRIGADO!



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

www.concretophd.com.br
www.phd.eng.br

11-2501-4822 / 23

74