



Vida Útil das Estruturas de Concreto

Tecnologia das Estruturas de Concreto

visão atualizada e sucinta

São Paulo, 02 e 04 de dezembro de 2008

1

Durabilidade das Estruturas de Concreto

- 1. Envelhecimento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Classificar Meio Ambiente**
- 4. Classificar o Concreto**
- 5. Modelos de Previsão**
- 6. Critérios de Projeto**
- 7. Proporcionamento dos Materiais**
- 8. Procedimentos de Execução**
- 9. Manutenção Preventiva**

2

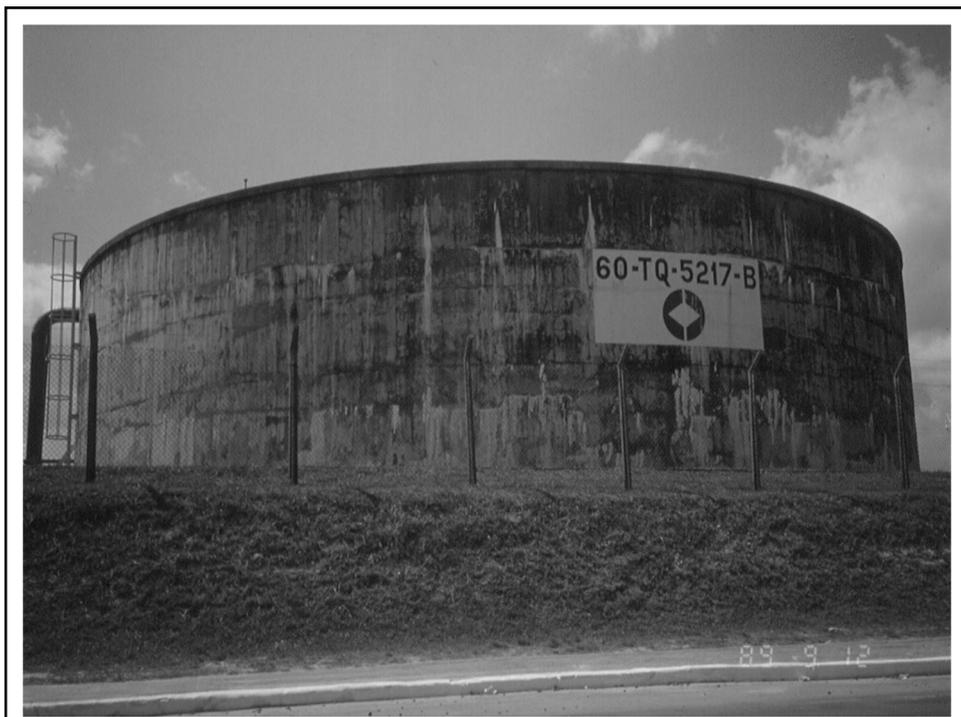
Manifestações Patológicas Típicas

Envelhecimento (aging)

Sintomatologia

Falha, Dano, Lesão, Vício Oculto, Vício de Construção

3



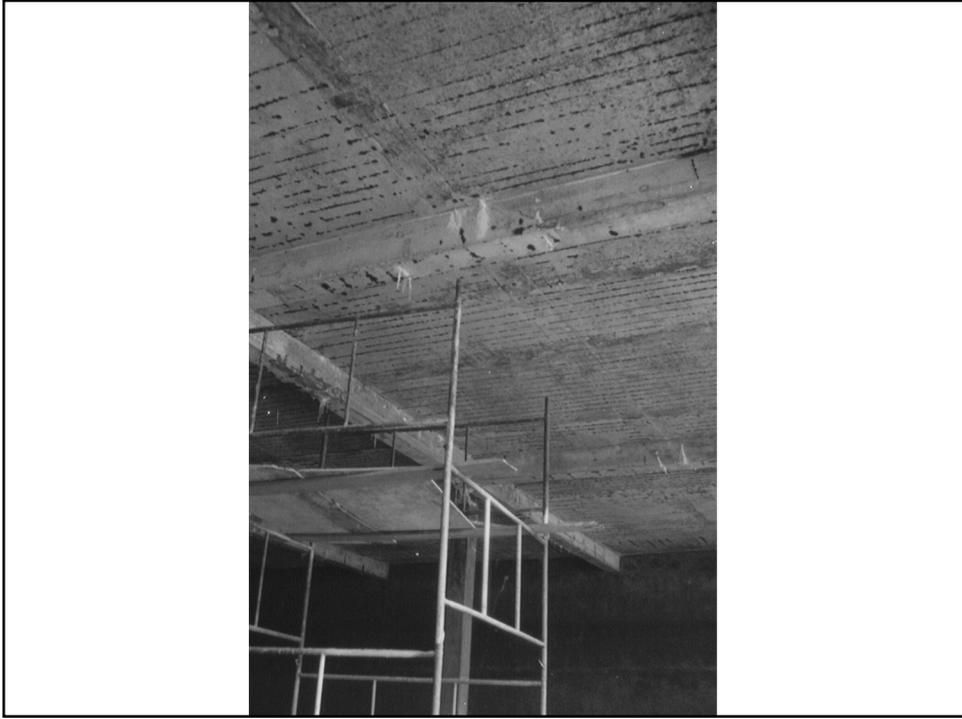
4



5



6



7



8



9



10

A ENGENHARIA TEM FEITO
MAIS QUE A MEDICINA EM
FAVOR DA QUALIDADE DE
VIDA E DA SAÚDE DA
HUMANIDADE,
PRINCIPALMENTE ATRAVÉS
DO SANEAMENTO BÁSICO

11



Edifício Martinelli

São Paulo

30 pavimentos

Altura 109m

Rua Líbero Badaró

$f_{ck} = 13,5 \text{ MPa}$

1929-2007 = 78 anos

12

Naquela época acreditava-se que...

**Os PROBLEMAS de CORROSÃO e
de DURABILIDADE estavam
resolvidos definitivamente
pois o aço seria protegido
“ETERNAMENTE”
pela “rocha” concreto**

13

**National Association of Cement Users
Philadelphia, USA, Feb.1910**

**STANDARD BUILDING
REGULATIONS for the USE
of REINFORCED CONCRETE**

**“the main reinforcement in column
shall be protect by a minimum of two
inches (> 5cm) of concrete cover,
reinforcement in girders and beams by
one and one-half inches (>3,8cm) and
floor slabs by one inch (>2,5 cm).”**

14

**National Association of Cement Users
Philadelphia, USA, Feb.1910**

**STANDARD BUILDING
REGULATIONS for the USE
of REINFORCED CONCRETE**

- ✓ **Column → 2” → 5cm**
- ✓ **Beams → 1,5” → 3,8cm**
- ✓ **Slabs → 1” → 2,5cm**

15

**Associação Brasileira de Concreto
São Paulo, Brasil. Jul. 1931**

**REGULAMENTO para
as CONSTRUÇÕES em CONCRETO ARMADO**

- ✓ **Pilares → 2,0 cm**
- ✓ **Vigas → 1,5 cm**
- ✓ **Lajes → 1,0 cm**

16

Infelizmente a história demonstrou que essa expectativa não é verdadeira



O deterioro precoce da armadura se apresenta frequentemente devido à elevada instabilidade do aço frente a ambientes agressivos

17

A consciência de que há problemas de durabilidade por perda PRECOCE da Vida Útil das Estruturas de Concreto só aconteceu na DÉCADA de 90!!!!

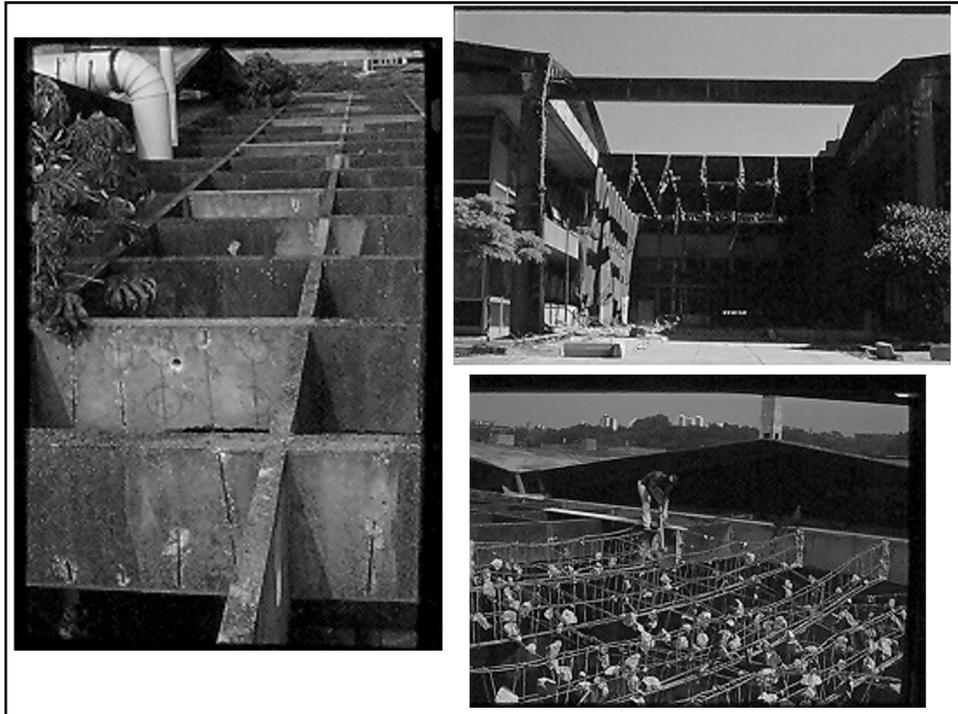
18



19



20



21

**Os conceitos e critérios indiretos e
insuficientes de durabilidade
constantes das primeiras normas sobre
Estruturas de Concreto vigoraram até**

DÉCADA de 90!!

ou até

HOJE, 2007??

22

No Brasil o conceito de Vida Útil só foi introduzido TIMIDAMENTE no texto da NBR 6118 (NB1) de 2003, obrigatório somente a partir de abril de 2004!!!

23

VIDA ÚTIL

Período de tempo durante o qual a estrutura mantém certas características mínimas de segurança, estética, estabilidade e funcionalidade, sem necessidade de intervenção não prevista

24

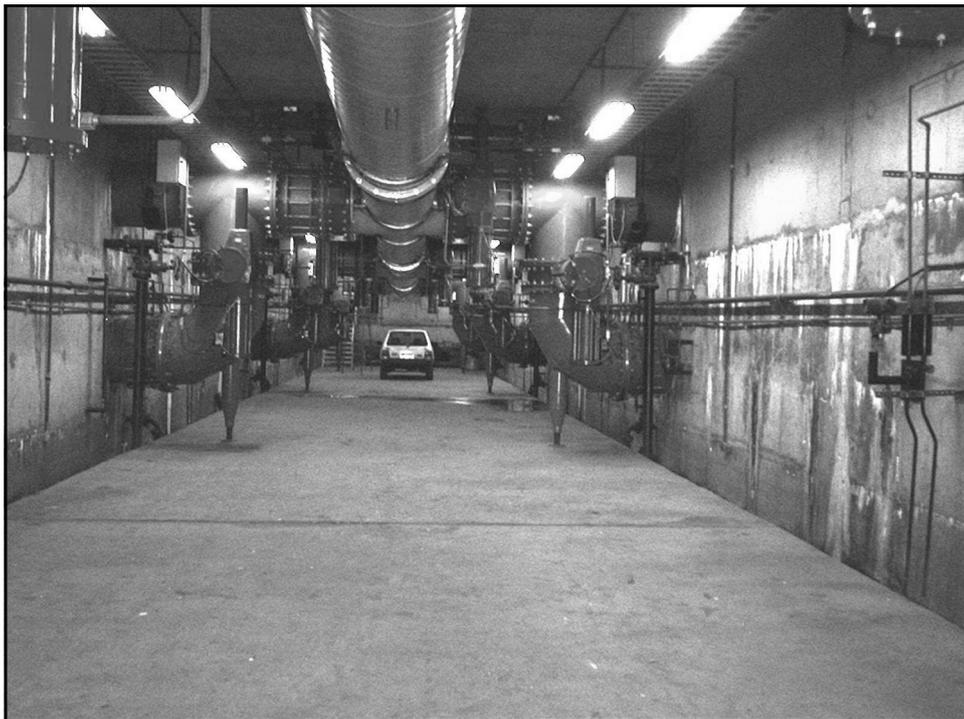
Durabilidade

3.8 Durabilidade

Capacidade de uma estrutura, componente, produto ou construção de manter sua aptidão funcional para aquilo que haja sido projetada ou construída, durante um tempo mínimo especificado.

Segundo este conceito, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

25



26

Vida Útil

3.21 Vida útil

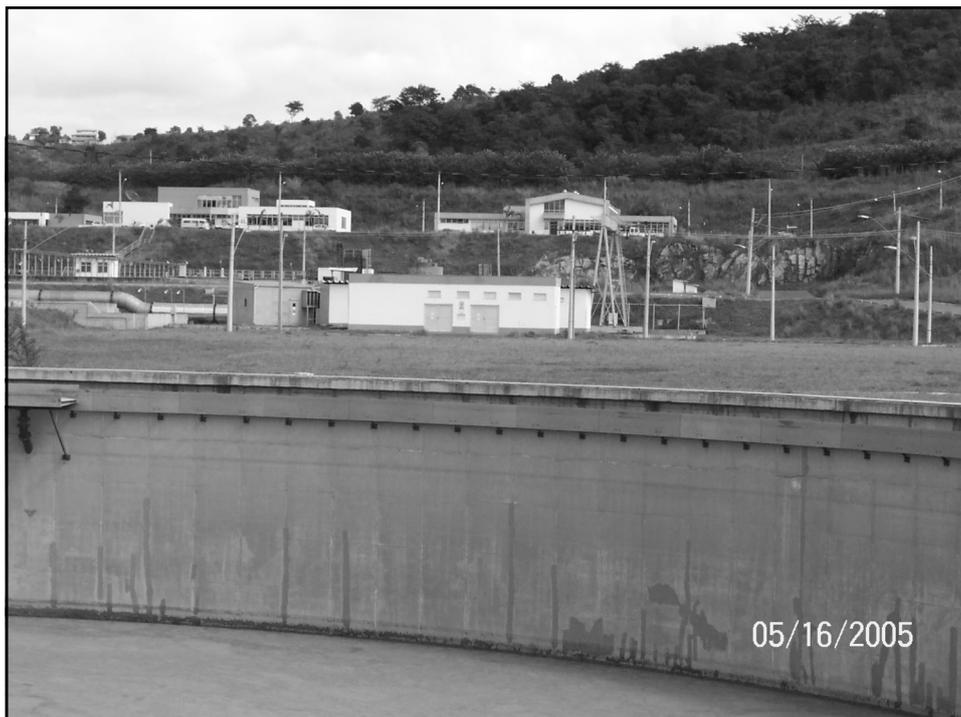
Período de tempo depois da construção durante o qual todas as propriedades essenciais alcançam ou superam o valor mínimo aceitável, com uma manutenção rotineira.

Os parâmetros que limitam a vida útil podem ser técnicos, funcionais ou econômicos.

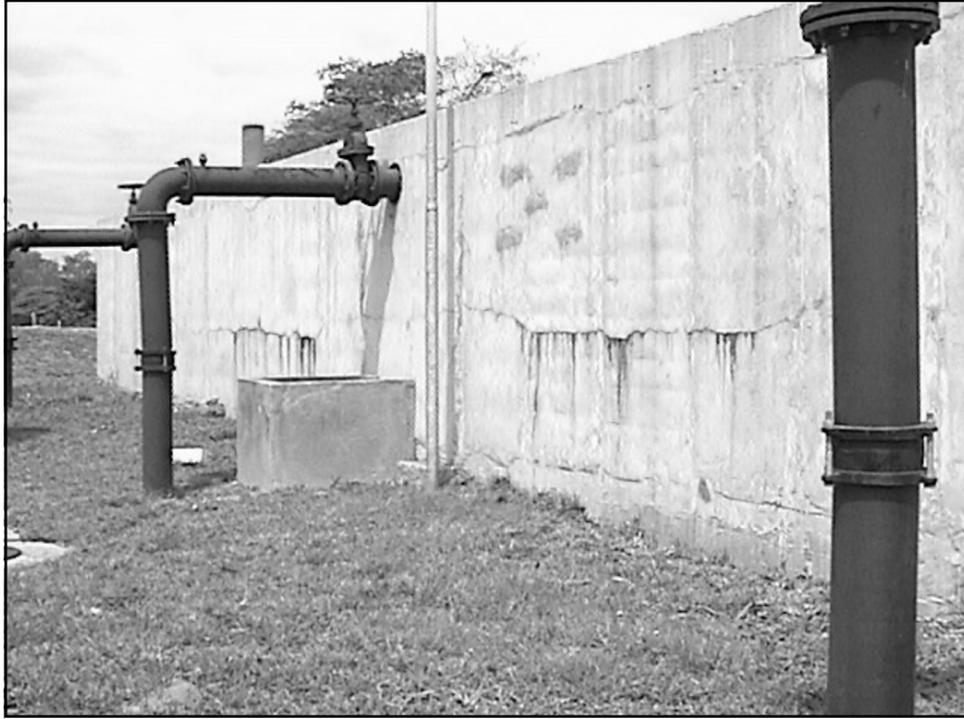
3.22 Vida útil residual

Tempo de vida, contando a partir da inspeção, de acordo com uma previsão de vida útil.

27



28



29



30

BS 7543, 1992 Guide to

**Durability of Buildings and Building Elements,
Products and Components**

Vida Útil	Tipo de estrutura
< 10 anos	temporárias
> 10 anos	substituíveis
>30 anos	ed.industriais e reformas
> 60 anos	ref. públicas e ed. novos
>120 anos	obras públicas e edifícios

31

**Qual é o
Problema?**

**Atende ou
não à norma?**



32

ELU – Estado Limite Último

(NBR 6118 itens 3.2.1)

Estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.

33

ELU – Estado Limite Último

(NBR 6118 itens 10.3/16.2.3)

Deve ser verificado:

- **Perda de equilíbrio da estrutura admitida como corpo rígido;**
- **Ruptura dos elementos estruturais.**

34

ELS – Estado limite de Serviço (NBR 6118 item 10.4)

Estados limites de serviço são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados.

35

ELS – Estado limite de Serviço

1. **serviceability limit state of crack formation (SLS-F)** (see 13.4.2 and 17.3.4).
2. **serviceability limit state of crack opening (SLS-W)** maximum specified in 13.4.2 (see 17.3.3).
3. **serviceability limit state of excessive deflection (SLS-DEF):** the limits defined for normal use as in 13.3 (see 17.3.2).
4. **serviceability limit state of decompression (SLS-D)** (see 13.4.2).
5. **serviceability limit state of partial decompression (SLS-PD)**(see table 13.3)
6. **serviceability limit state of excessive compression (SLS-EC)**(see 17.2.4.3.2.a).
7. **serviceability limit state of excessive vibrations (SLS-EV)**

36

ELS – Estado limite de Serviço

(NBR 6118 itens 10.4/16.2.4)

Devem ser verificados:

- **Deformações excessivas** (item 13.3); (1/250 a 1/750)
- **Fissuração** (item 13.4); w_k (0,4mm; 0,2mm)
- **Vibração excessiva;**
- **Outros ????????**.

37

**“Por que é
necessário
introduzir o
conceito correto
de Vida Útil?”**

38

NORMA NBR 6118/2003

TABELA 1: Classes de agressividade ambiental.

Classe de Agressividade	Agressividade	Risco de Deterioração da Estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

39

NORMA NBR 6118/2003

TABELA 2: Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição.

macro-clima	micro-clima			
	interior das edificações		exterior das edificações	
	seco	úmido	seco	úmido
rural	I	I	I	II
urbana	I	II	I	II
marinha	II	III	-	III
industrial	II	III	II	III
específico	II	III ou IV	III	III ou IV
respingo de maré	-	-	-	IV
submersa $\geq 3m$	-	-	-	I
solo	-	-	I	II, III, IV

40

critérios • qualidade do concreto

Concreto	Classe de agressividade (ver tabela 11)				
	Tipo	I	II	III	IV
relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

NOTAS

1 CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado

2 CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

41

critérios • cobrimento

C _{nom} mm	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 11)			
		I	II	III	IV ³⁾
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga / pilar	25	30	40	55
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

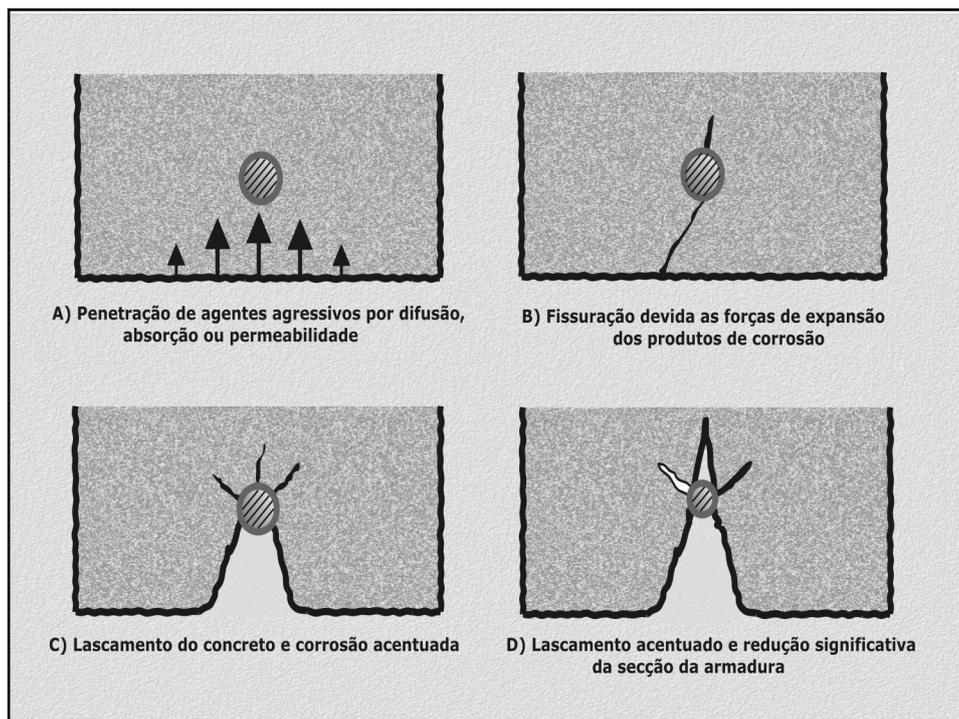
²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamentos tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos, e outros tantos, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelo item 10.4.6, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15mm.

³⁾ As faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos devem ter cobrimento nominal ≥ 45mm.

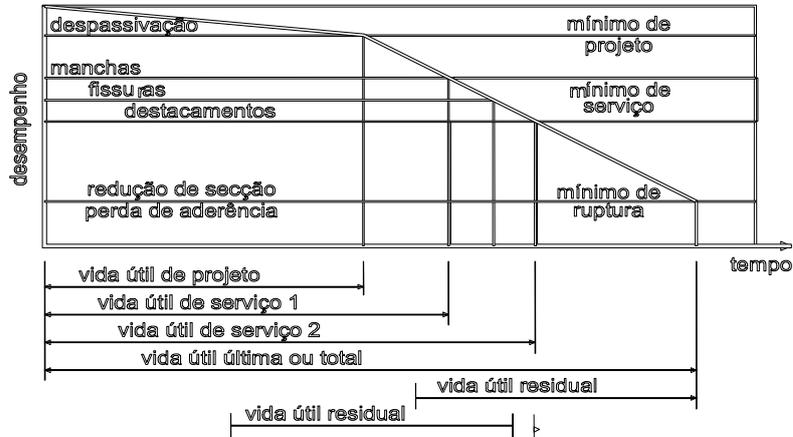
42

“Como deveria ser definida a vida útil?”

43



44



Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno de corrosão das armaduras

45

**“Como podem
ser mais
Duráveis?”**

46

Durabilidade das Estruturas de Concreto

- 1. Envelhecimento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Classificar Meio Ambiente**
- 4. Classificar o Concreto**
- 5. Modelos de Previsão**
- 6. Critérios de Projeto**
- 7. Proporcionamento dos Materiais**
- 8. Procedimentos de Execução**
- 9. Manutenção Preventiva**

47



ENVELHECIMENTO

- Carbonatação
- Cloretos
- Fuligem
- Fungos
- Lixiviação
- Retração
- Sulfatos
- Álcali-agregado

- << pH
- Corrosão
- Fissuração
- Destacamento

48

diretrizes

Mecanismos de envelhecimento

Relativos ao concreto:

- **lixiviação**
- **expansão**
- **intemperismo**

Relativos à armadura:

- **carbonatação**
- **cloretos**

49

diretrizes

Mecanismos de envelhecimento

Relativos à estrutura:

regra dos 4C

- **Compactação ou adensamento**
- **Cura efetiva**
- **Composição ou traço do concreto**
- **Cobrimento**

50

critérios

Estrutura

- a) prever drenagem eficiente;
- b) evitar formas arquitetônicas e estruturais inadequadas;
- c) garantir concreto de qualidade apropriada, particularmente nas regiões superficiais dos elementos estruturais;
- d) garantir revestimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras;
- e) detalhar adequadamente as armaduras;
- f) controlar a fissuração das peças;
- g) prever espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental muito agressivas; e
- h) definir um plano de inspeção e manutenção preventiva.

51

MODELOS de PREVISÃO de VIDA ÚTIL

- **Experiência**
- **Ensaio Acelerado**
- **Mecanismos de Transporte**
- **Estocásticos**

52

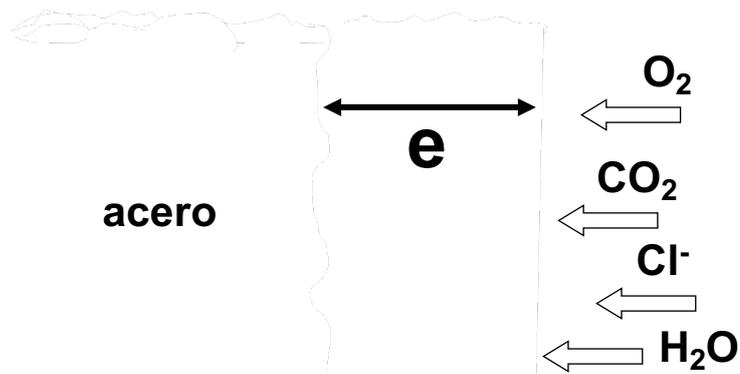
Ingresso de gases e fluidos *mecanismos de transporte*

- Permeabilidade
- Capilaridade
- Difusibilidade
- Migración
- Convecção

53

Generalização

$$e = k \bullet \sqrt{t} \quad (\text{cm})$$



54

Carbonatação

$$t = \frac{e_{\text{CO}_2}^2}{k_{\text{CO}_2}^2} \quad (\text{año})$$

- $e_{\text{CO}_2} \rightarrow 1 \text{ a } 5 \text{ cm}$
- $k_{\text{CO}_2} \rightarrow 0.1 \text{ a } 1.0 \text{ cm/año}^{1/2}$

55

Carbonatação

$$e = 2,0 \text{ cm}$$

$$f_{\text{ck}} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 8 \text{ años}$$

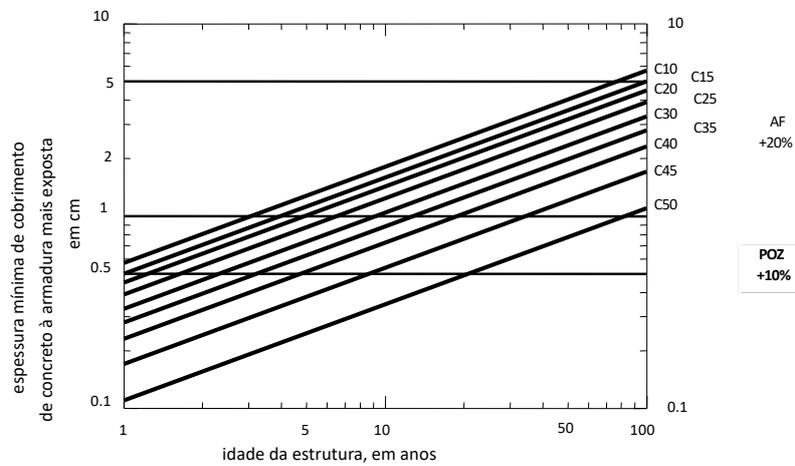
$$f_{\text{ck}} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 350 \text{ años}$$

$$f_{\text{ck}} = 25 \text{ MPa} \rightarrow t = 38 \text{ años}$$

56

referência

Carbonatação em faces externas dos componentes estruturais de concreto expostos à intempérie



57

INTRODUÇÃO	OBJETIVOS	CARBONATAÇÃO	MODELOS	EXPERIMENTAL	SISTEMA	CONCLUSÕES	CONTINUIDADE
------------	-----------	--------------	---------	--------------	---------	------------	--------------

MODELOS

- THOMAS & MATHEWS (1992)

Diagrama de Thomas & Mathews (1992) que relaciona o período inicial de cura (DIAS) e a taxa de carbonatação (mm/af) com a resistência à compressão (MPa) e o teor de água volátil (%). O diagrama mostra que a taxa de carbonatação aumenta com o tempo e com a resistência à compressão, e que o teor de água volátil diminui com o tempo.

58

Cloretos - difusão

$$t = \frac{c_{Cl}^2}{4 \cdot z^2 \cdot D_{ef,Cl}} \text{ (anos)}$$

$$c_{Cl} \rightarrow 1 \text{ a } 5 \text{ cm}$$

$$D_{ef,Cl} \rightarrow 0,15 \text{ a } 2,7 \text{ cm}^2/\text{ano}$$

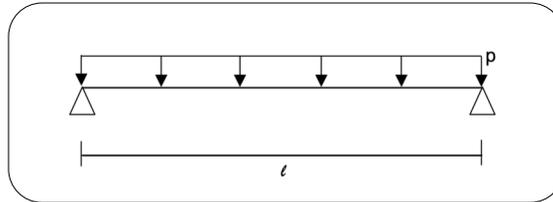
59

Aplicação

Comparação de duas vigas de concreto armado situadas num ambiente marinho, correspondente à Classe de Agressividade Ambiental 4 da NBR-6118, e à região com risco de corrosão segundo o ACI 318-02.

60

Cenário



- Trata-se de uma viga simplesmente apoiada situada em ambiente marinho submetida ao seguinte carregamento:
 - Carregamento permanente: 5 kN/m (DL)
 - Carregamento acidental: 4,5 kN/m (LL)

61

Parâmetros iniciais

$b = 25,4 \text{ cm}$ (adotado)

Momento = 173 kN.m

$h = ???$

Armadura = ????

Aço CA-50 para NBR 6118

Aço CA-42 para ACI 318

62

Exigência das Normas

ACI 318 – 02

Para splash zone

- Cobrimento*:
- 60 mm R.7.7.5
- Classe de concreto:
 $f'_c = 35 \text{ MPa}$ 4.2.2

NBR 6118 – 03

Para maré

- Cobrimento:
- 50 mm
- Classe de concreto:
 $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

63

Exigência das Normas

ACI 318 – 02

$(f'_c):$
 $f_{cr} = f'_c + 1,34s$
 $f_{cr} = f'_c + 2,33s - 3,45$
(5.3.2.1)

Módulo de elasticidade

$$E = 4700 * f'_c^{1/2}$$
$$E = 27,8 \text{ GPa}$$

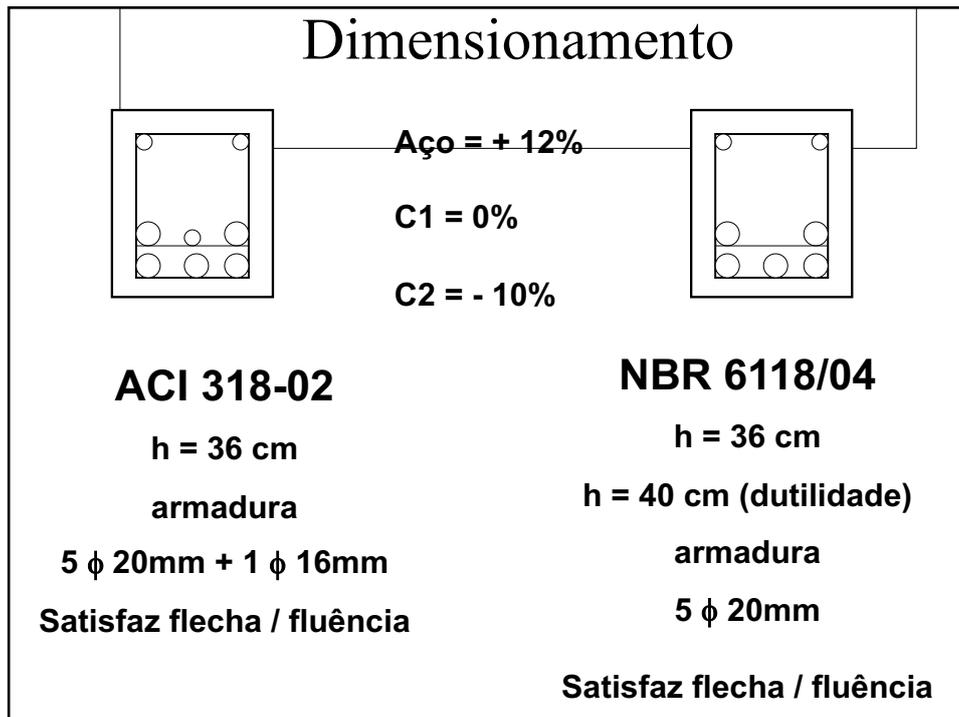
NBR 6118 – 03

$f_{ck}:$
 $f_{cm} = f_{ck} + 1,65s$
(NBR-12655 5.5.3.2.1)

Módulo de elasticidade

$$E = 4760 * f_{ck}^{1/2}$$
$$E = 26,1 \text{ GPa}$$

64



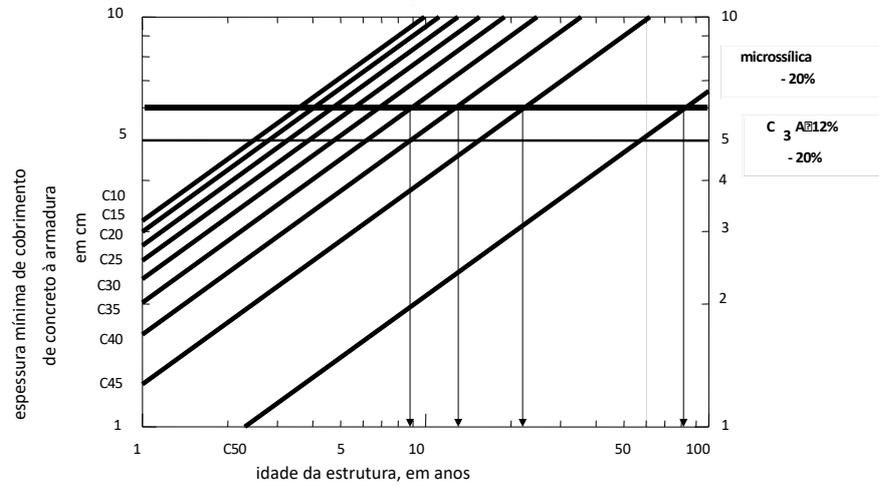
65



66

comentários

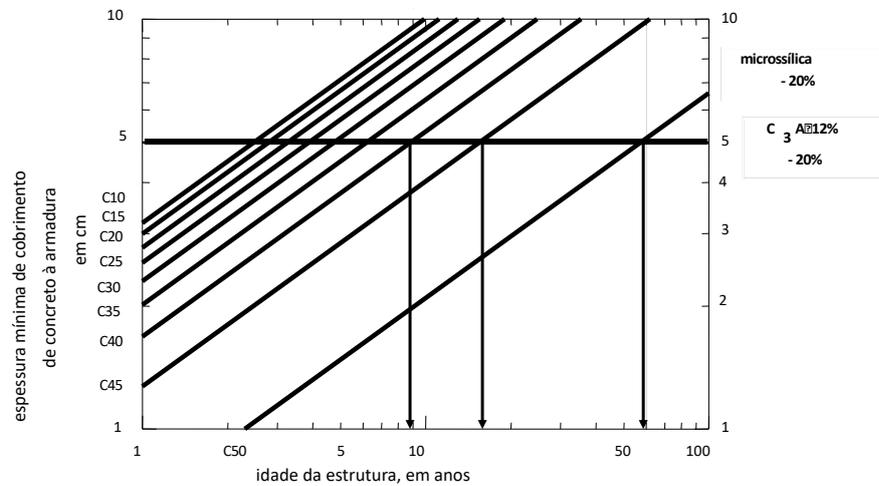
Difusão de cloretos em faces externas de componentes estruturais de concreto expostos à zona de respingos de maré



67

comentários

Difusão de cloretos em faces externas de componentes estruturais de concreto expostos à zona de respingos de maré



68

diretrizes

**Mecanismos de
envelhecimento**

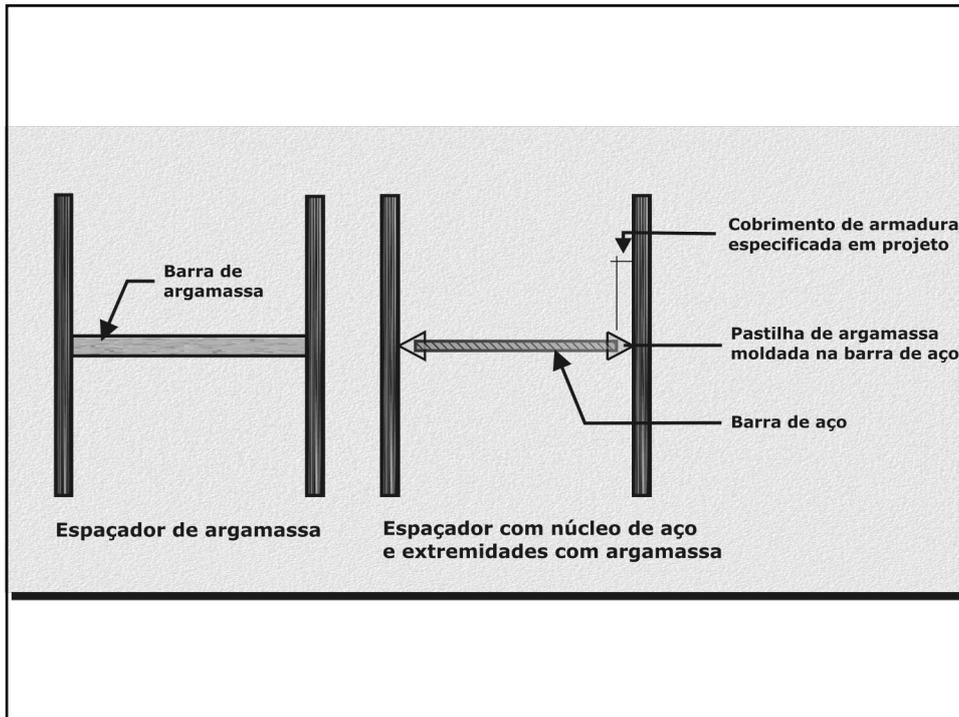
Relativos à estrutura hidráulica:

ESTANQUEIDADE!

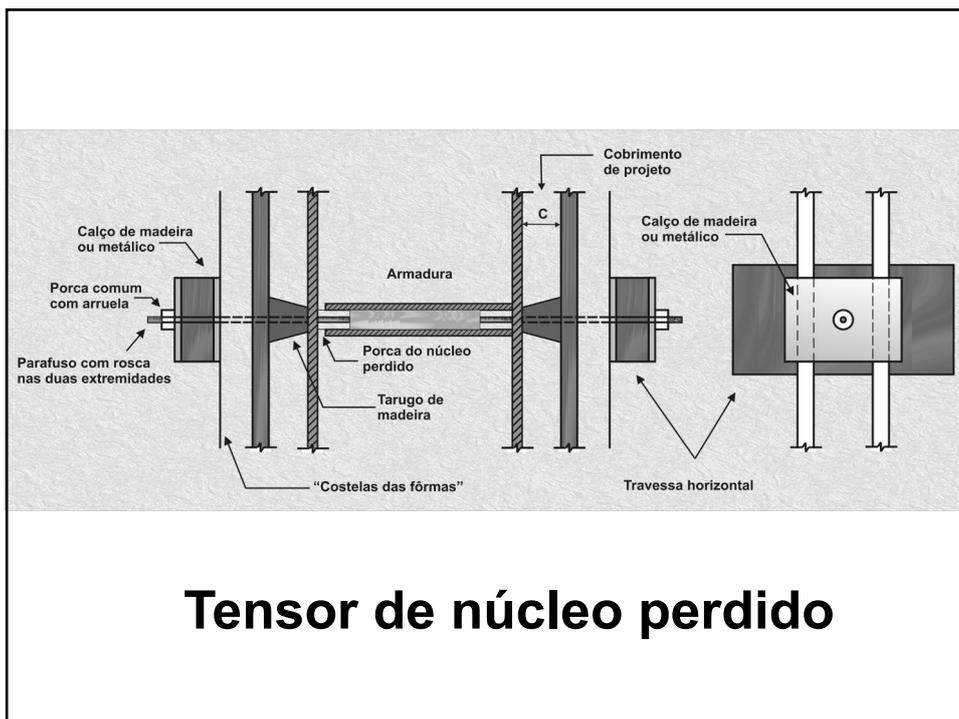
69



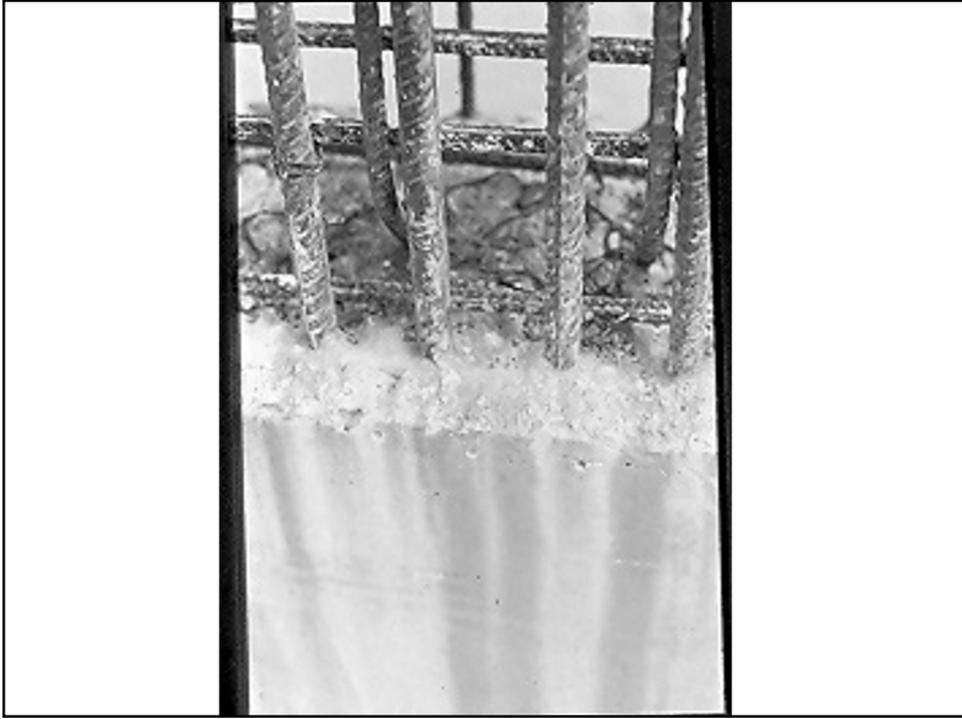
70



71



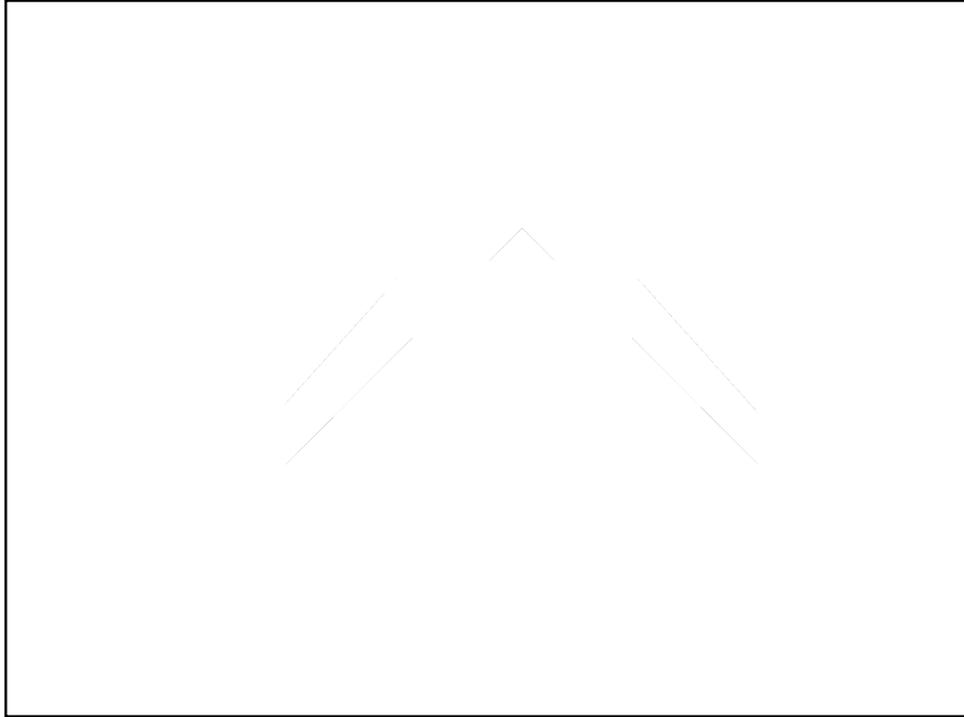
72



73



74



75

diretrizes **Mecanismos de
envelhecimento**

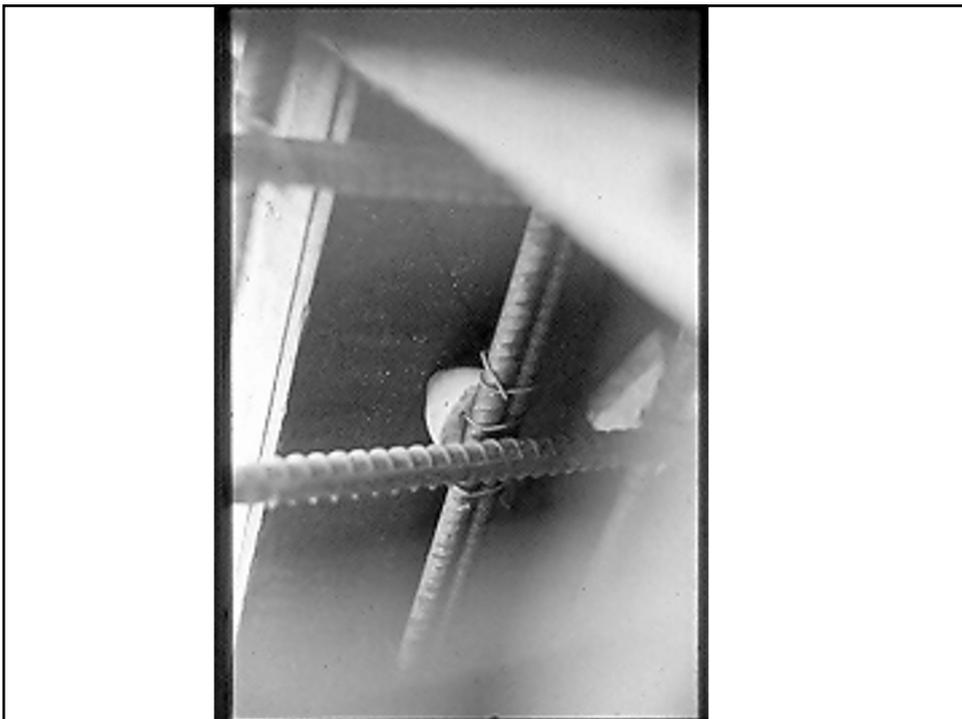
Relativos à estrutura hidráulica:

**Proteção contra
Corrosão!**

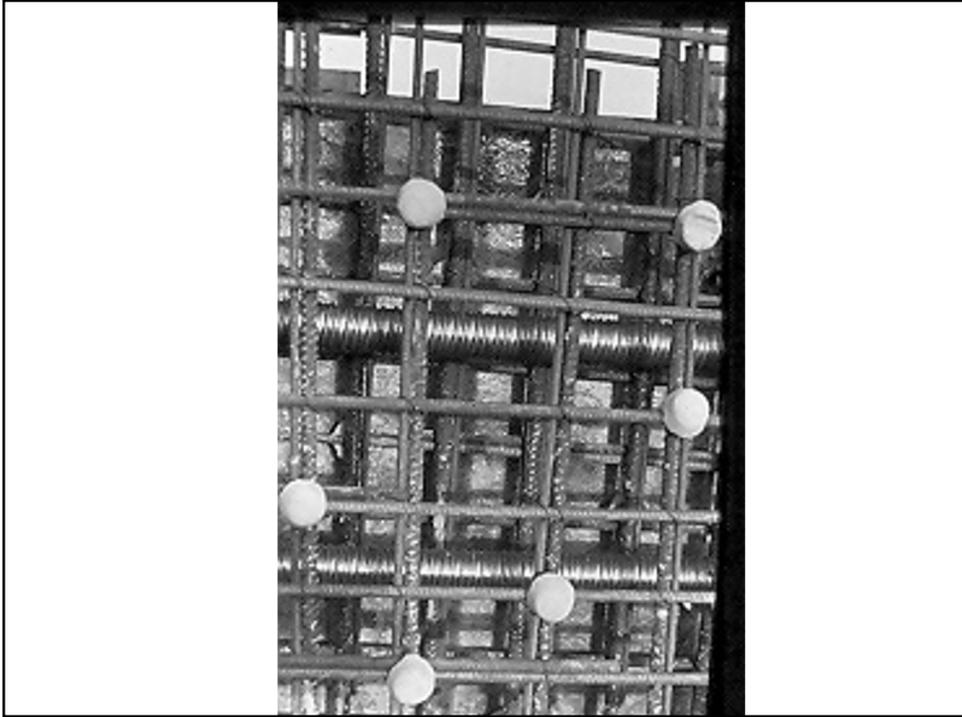
76



77



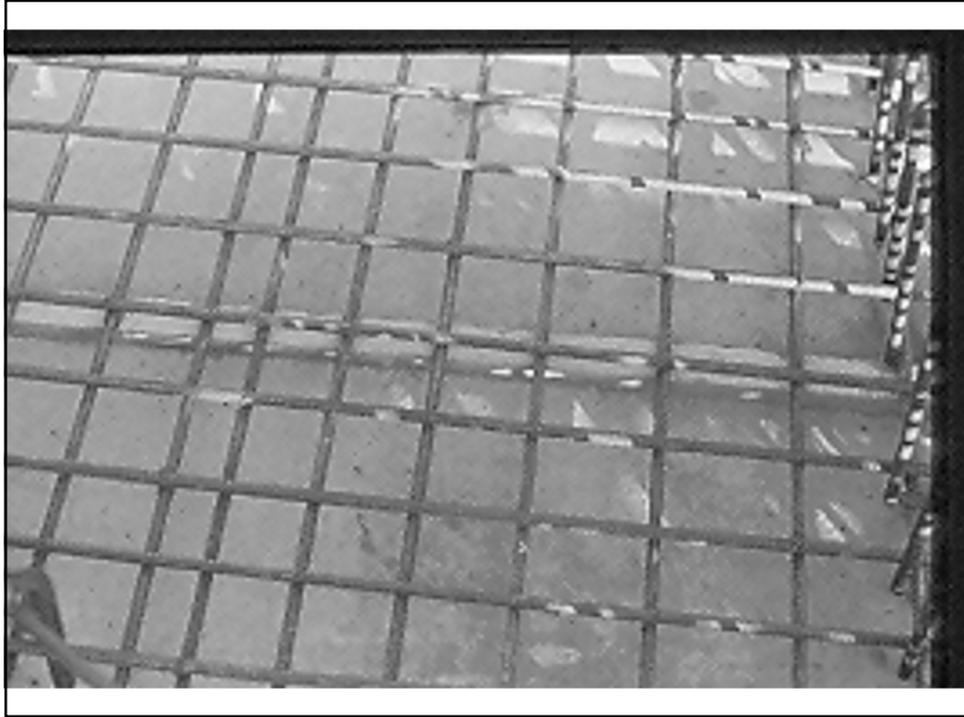
78



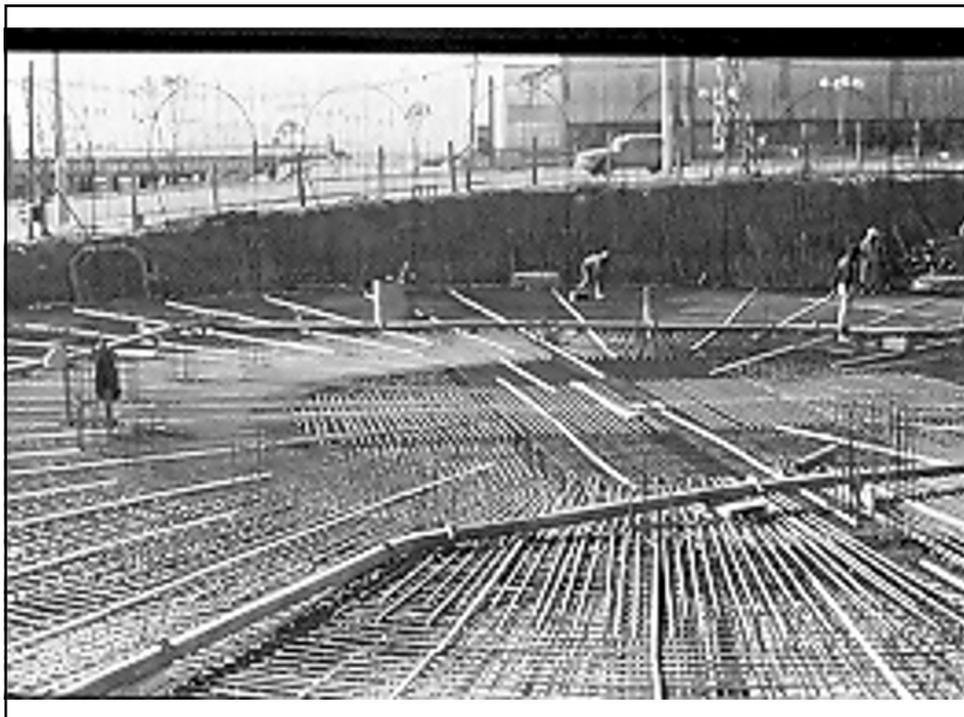
79



80



81



82

Ingresso de gases e fluidos

mecanismos de transporte

- **Permeabilidade**
- **Capilaridade**
- **Difusibilidade**
- **Migração**
- **Convecção**

83

Permeabilidade do concreto à água

fib(CEB-FIP) Model Code 90

$$k_w = 10^{-(10+0.07*f_{ck})}$$

k_w = coeficiente de permeabilidade à água,
conforme lei de Darcy, em m/s

f_{ck} = resistência característica do concreto à
compressão aos 28 dias, em MPa

84

Permeabilidade do concreto ao O₂

fib(CEB-FIP) Model Code 90

$$k_g = 10^{-(14+0.05*f_{ck})}$$

k_g = coeficiente de permeabilidade ao gás oxigênio, em m²

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias, em MPa

85

Difusibilidade da água no concreto

fib(CEB-FIP) Model Code 90

$$D_w = \frac{10^{-8}}{f_{ck}}$$

D_w = coeficiente de difusão à água, em m²/s

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias, em MPa

86

Frente de Carbonatação

fib(CEB-FIP) Model Code 90

$$e_{CO_2,t} = 4 * \sqrt{10^{-(12,5+0,05*f_{ck})}} * \sqrt{t}$$

$e_{CO_2,t}$ = profundidade carbonatada em m

t = tempo de exposição ao CO_2 com HR = 65% ou idade do concreto em s

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias, em MPa

87

Difusibilidade de íons Cloreto

fib(CEB-FIP) Model Code 90

$$D_{Cl} = 10^{-10} \text{ para } \cdot CPI \text{ \& } CPII, f_{ck} = 20MPa$$

$$D_{Cl} = 3 * 10^{-11} \text{ para } \cdot CPIII \text{ \& } CPIV, f_{ck} = 20MPa$$

$$D_{Cl} = 10^{-11} \text{ para } \cdot CPI \text{ \& } CPII, f_{ck} = 50MPa$$

$$D_{Cl} = 3 * 10^{-12} \text{ para } \cdot CPIII \text{ \& } CPIV, f_{ck} = 50MPa$$

D_{Cl} = coeficiente de difusão de íons cloreto em m^2/s

88

Capilaridade à Água

fib(CEB-FIP) Model Code 90

$$w = 10^{-(4+0.02*f_{ck})} * \sqrt{t}$$

w_t = água absorvida em m^3/m^2

t = tempo de absorção de água em s

89

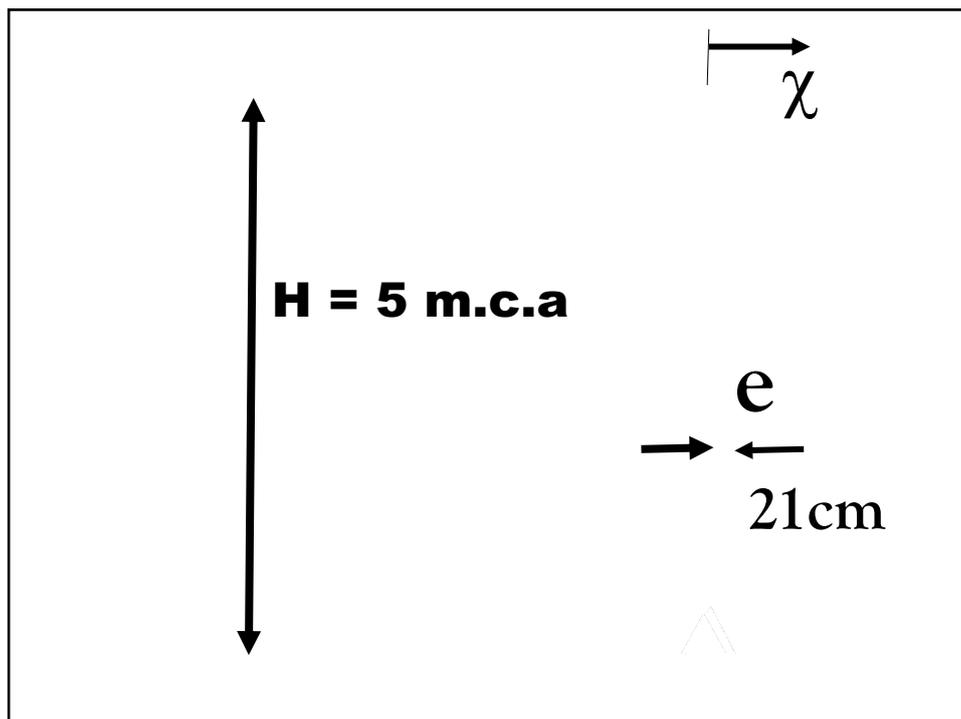
propriedade	20 MPa	50 MPa
coeficiente de permeabilidade à água k_w (cm/s)	$4*10^{-10}$	$3*10^{-12}$
coeficiente de permeabilidade a gás O_2 k_g (m^2)	$1*10^{-15}$	$3*10^{-17}$
carbonatação em 50 anos e_{CO_2} (mm)	52	2
coeficiente de difusão de cloretos D_{Cl} (m^2/s)	$1*10^{-10}$	$1*10^{-11}$
absorção capilar de água em 24h w (dm^3/m^2)	$40*10^{-5}$	$4*10^{-5}$

90

Permeabilidade ou Estanqueidade?



91



92

Lei de Darcy
permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$V = \frac{Q}{S} = k_w \cdot \frac{H}{x}$$

V → velocidade de percolação de água em cm/s
 Q → vazão de água em cm³/s
 S → área da superfície confinada por onde percola a água em cm²
 H → pressão da água de contacto em cm.c.a
 x → espessura de concreto percolada pela água em cm
 k_w → coeficiente de permeabilidade do concreto em cm/s

93

Lei de Darcy
permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$V = \frac{Q}{S} = k \cdot \frac{H}{x} \quad \Rightarrow \quad \frac{dx}{dt} = \frac{k \cdot H}{x}$$

$$\Rightarrow \quad x dx = H \cdot k \cdot dt$$

$$\Rightarrow \quad \int_0^e x dx = \int_0^t H \cdot k \cdot dt$$

$$\Rightarrow \quad t = \frac{e^2}{2 \cdot H \cdot k}$$

94

Concreto

(lei de Darcy) permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$f_{ck} = 20\text{MPa} \Rightarrow \frac{a}{c} = 0,75 \Rightarrow k = 10^{-9} \text{ cm/s}$$

$$f_{ck} = 40\text{MPa} \Rightarrow \frac{a}{c} = 0,45 \Rightarrow k = 10^{-11} \text{ cm/s}$$

$$f_{ck} = 60\text{MPa} \Rightarrow \frac{a}{c} = 0,35 \Rightarrow k = 10^{-13} \text{ cm/s}$$

95

Concreto

(lei de Darcy) permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$t = \frac{e^2}{2 \cdot H \cdot k_w}$$

$$H \rightarrow 5 \text{ m.c.a}$$

$$e \rightarrow 21 \text{ cm}$$

$$k_w \rightarrow 10^{-9} ; 10^{-11} ; 10^{-13} \text{ m/s}$$

96

Concreto

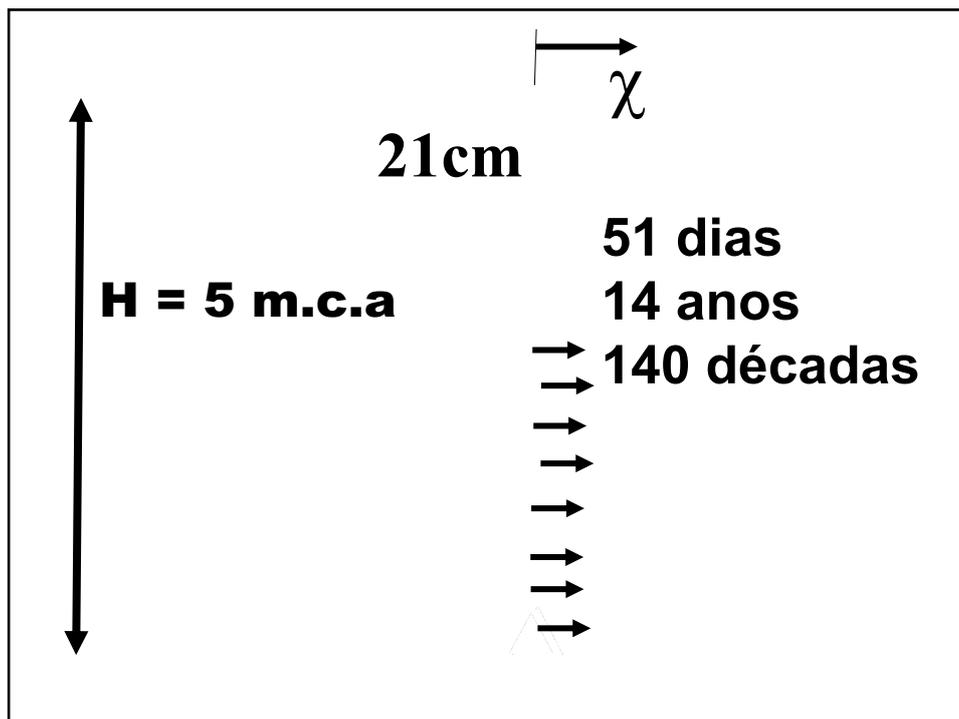
(lei de Darcy) permeabilidade
(gradiente de pressão)

$$f_{ck} = 20\text{MPa} \rightarrow t = 51 \text{ dias}$$

$$f_{ck} = 40\text{MPa} \rightarrow t = 14 \text{ anos}$$

$$f_{ck} = 60\text{MPa} \rightarrow t = 140 \text{ décadas}$$

97



98

CONCRETO é “impermeável”

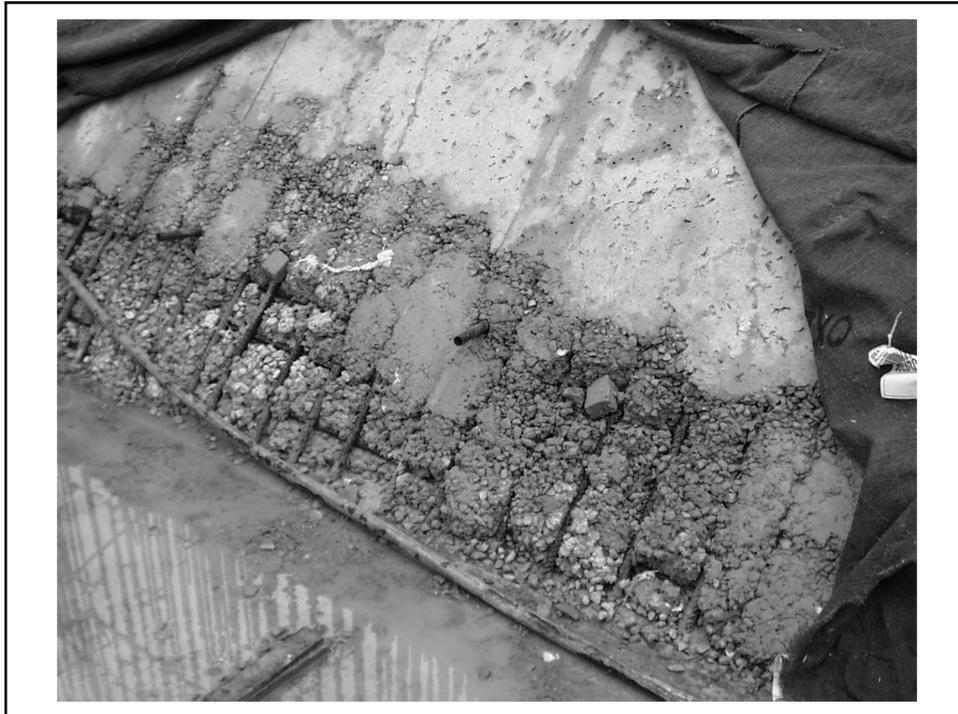
difícil → estanqueidade

**pois independe do
material e depende 100%
do projetista e 100% da
CONSTRUTORA**

99



100



101

Durabilidade das Estruturas de Concreto

- 1. Envelhecimento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Classificar Meio Ambiente**
- 4. Classificar o Concreto**
- 5. Modelos de Previsão**
- 6. Critérios de Projeto**
- 7. Proporcionamento dos Materiais**
- 8. Procedimentos de Execução**
- 9. Manutenção Preventiva**

102

CONCLUINDO

projetar e construir obras de saneamento duráveis depende:

- ✓ especificação;
- ✓ projeto;
- ✓ preço unitário;
- ✓ dosagem / controle;
- ✓ conscientização da direção da construtora;
- ✓ treinamento dos operários;
- ✓ fiscalização

103

250 anos de garantia.

Quem precisa de segurança, tecnologia e performance, precisa do Engenmix. Concreto Engemix é produzido, armazenado e entregue sob controle de qualidade. Concreto Engemix é produzido em São Paulo, com 40% de componentes locais, com a garantia de 250 anos de garantia. Concreto Engemix é produzido em São Paulo, com 40% de componentes locais, com a garantia de 250 anos de garantia.

O resultado é que, hoje, no Centro Empresarial Naciona, há a maior obra de saneamento em São Paulo, com 100 mil metros quadrados de obra, com 100 mil metros quadrados de obra, com 100 mil metros quadrados de obra.

Quem precisa de solução segura em concreto não corre risco. Chama o Engemix.

CONCRETO ENGEMIX

104