

Estructuras de Concreto y su Vida Útil

Paulo Helene

Diretor PhD Engenharia

Prof. Titular Universidade São Paulo USP

Consejero Permanente Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON

Member fib(CEB-FIP) Service Life of Concrete Structures

Presidente ALCONPAT

1



Estructuras de Concreto y su Vida Útil



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

IMCYC

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto

Centro Banamex

28 de mayo de 2013

Ciudad de México

2

Conceptos

Las estructuras deben ser idóneas para su uso durante su vida útil:

- ✓ Seguras y funcionales;
- ✓ Soportar fuego (incendio);
- ✓ Durables;
- ✓ Ser bonitas; y
- ✓ Ser sustentables

3

Recientes Avances

- ✓ **ISO 16204:2012. Durability: Service Life Design of Concrete Structures**
- ✓ **fib Model Code 2010. Concrete Structures**
- ✓ **fib Model Code for Service Life Design 2006.**

Helland, Steinar. Design for Service Life: Implementation of fib Model Code 2010 rules in the operational code ISO 16204. Structural Concrete 14 (2013), n.1. p. 10-18

4

Recientes Avances

ISO 16204. Hay 4 alternativas para verificar VU:

1. The full probabilistic method. *Método probabilista integral*
2. The partial factor method. *Método de los factores parciales (característicos)*
3. The deemed-to-satisfy method. *Método prescriptivo (a/c, recubrimientos, etc.)*
4. The avoidance-of-deterioration method. *Método basado na protección de la estructura*

5

Recientes Avances

Combinar Durabilidad con Sustentabilidad:

Pedro Castro-Borges & Paulo Helene.

El enfoque filosófico y conceptual de vida de servicio de estructuras de concreto reforzado que se requiere para confrontar el cambio climático.

Paper de conferencia magistral, 12 p, Memorias del I Congreso Internacional Científico/Técnico de Ingeniería (CICTI 2007), Maracaibo, Venezuela, 4-9 de Noviembre de 2007.

6

Conceptos

- ✓ **Conocer como envejece**
- ✓ **Definir VU**
- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Establecer Estados Limites**
- ✓ **Prever o Estimar VU**
- ✓ **Especificar Mantenimiento**

7

Estructuras de Concreto Reforzado Conceptos

- ✓ Envejecimiento natural *previsto; no incomoda*
- ✓ Envejecimiento precoce *no previsto; costoso*
- ✓ Durabilidad *vida útil*
- ✓ Proyecto de mantenimiento *saber y realizar*

8

Conceptos

- ✓ **Conocer como envejece**
- ✓ **Definir VU**
- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Establecer Estados Limites**
- ✓ **Prever o Estimar VU**
- ✓ **Definir Mantenimiento**

9

Mecanismos de Deterioración e Envejecimiento

Acero

- ✓ corrosión por carbonatación
- ✓ corrosión por cloruros

Concreto

- ✓ lixiviación → agua, lluvia ácida y ácidos
- ✓ expansión → sulfatos y AAR
- ✓ suciedad → hongos, hollín, polvo

Estructura

acciones mecánicas, movimientos térmicos, impactos, acciones cíclicas, retracción, fluencia y relajación, ... factor humano

10

Acero → *Corrosión por carbonatación*

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

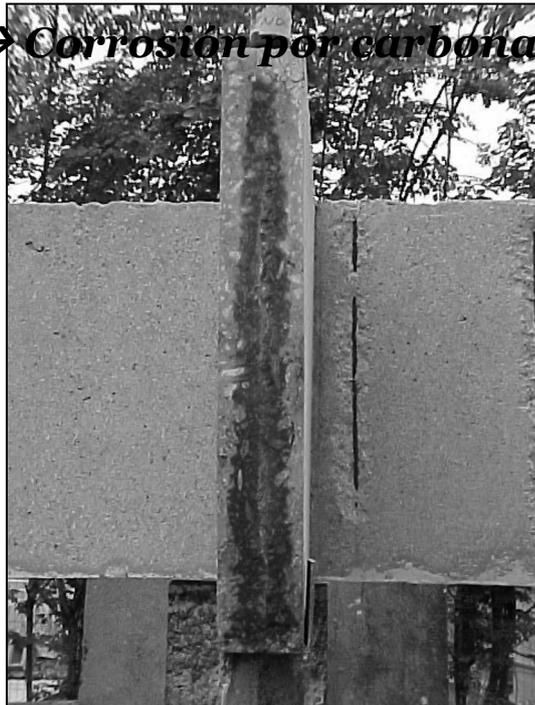
—————
Más
alcalino

—————
Menos
alcalino

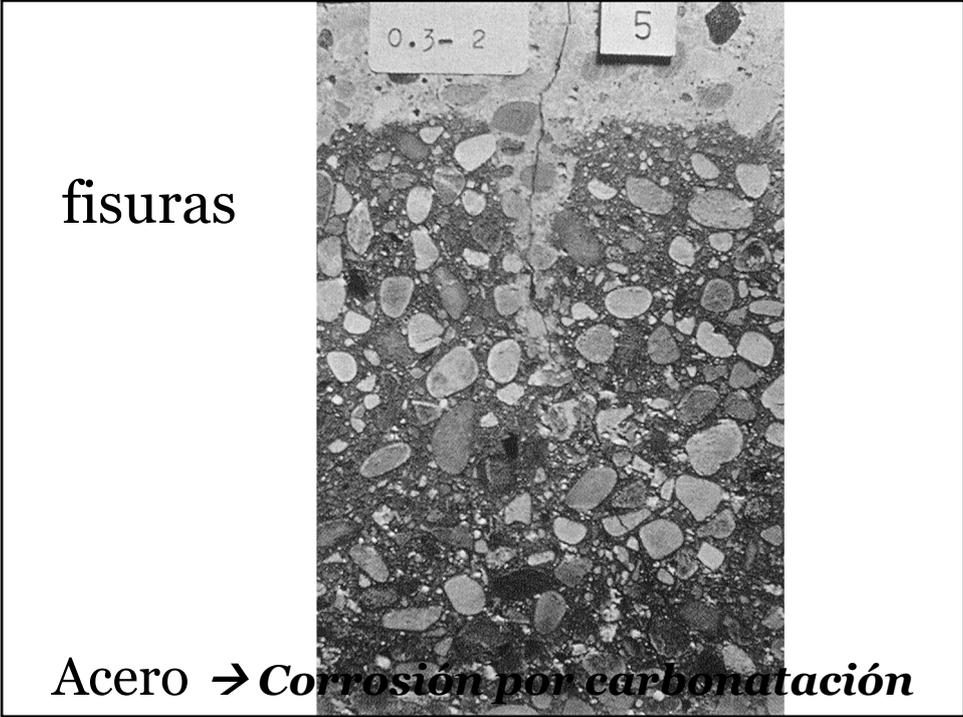


11

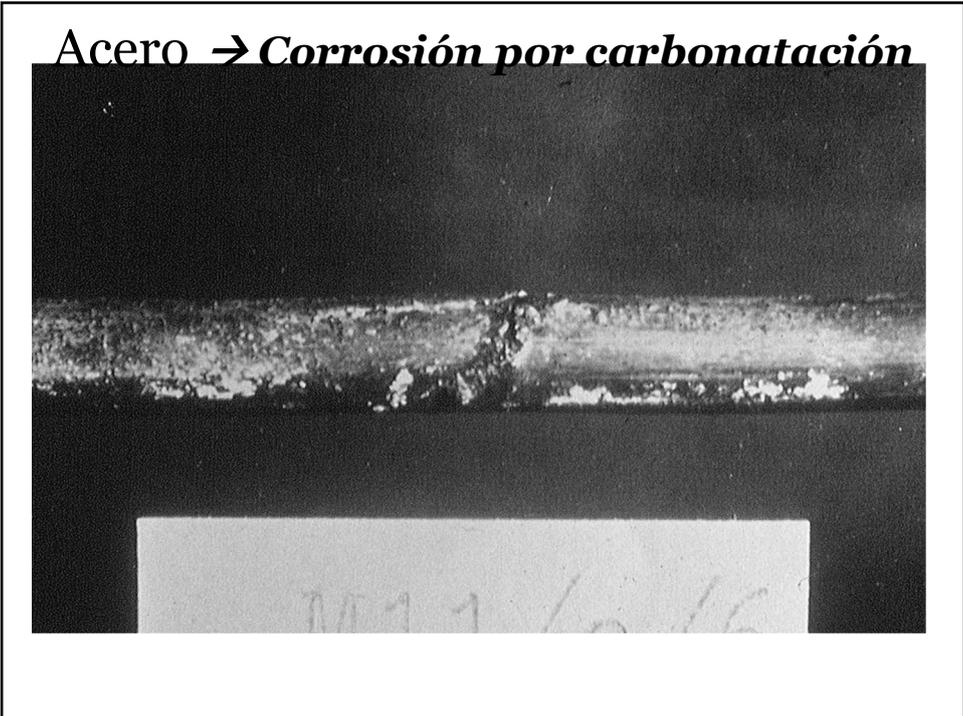
Acero → *Corrosión por carbonatación*



12



13



14

Acero → *Corrosión por cloruros*



17

Acero → *Corrosión por cloruros*

productos de la
corrosión son
muy solubles



18



19

Acero → Corrosión

- ◆ ***Hay varios modelos matemáticos basados en la Ley de Fick***
- ◆ ***Todavía no hay un criterio único para el estado límite de durabilidad***
- ◆ ***Hay prescripciones profilácticas muy claras (espesor y calidad de recubrimiento)***
- ◆ ***Todavía hay que usar el buen sentido***

20

Concreto → **Lixiviación** (água de lluvia)



Cobertura do
Prédio da FAU-USP



Edifício da
Engenharia Civil
POLI.USP

21



Concreto → **Lixiviación** (água)

22



23



24



25



26

Concreto → *Lixiviación*

- ◆ *Todavía no hay modelo matemático*
- ◆ *Todavía no hay criterio único para el estado límite de durabilidad*
- ◆ *Todavía no hay prescripciones profilácticas muy claras*
- ◆ *Todavía hay que usar el buen sentido*

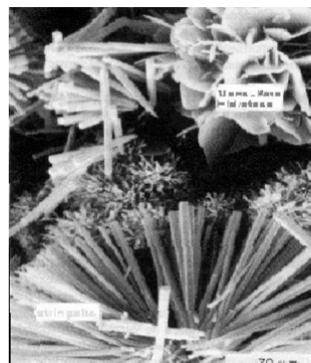
27

Concreto → **Expansión**

Sulfatos, SO_4^{-2}

Mecanismo:

Clínquer + yeso → Etringita Primária
Compuesto expansivo sin problemas



Compuestos hidratados + Na_2SO_4 ; MgSO_4 e otros → Compuestos expansivos secundários (*problemas*) DEF

└─ Presente en suelo agresivo, cloacas y agua del mar

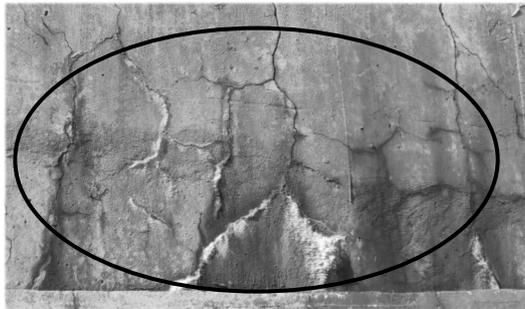
28

Concreto → *Expansión*

Reacción Álcali-Árido AAR

Manifestación:

- Fisuras al azar;
- Presencia de gel



29



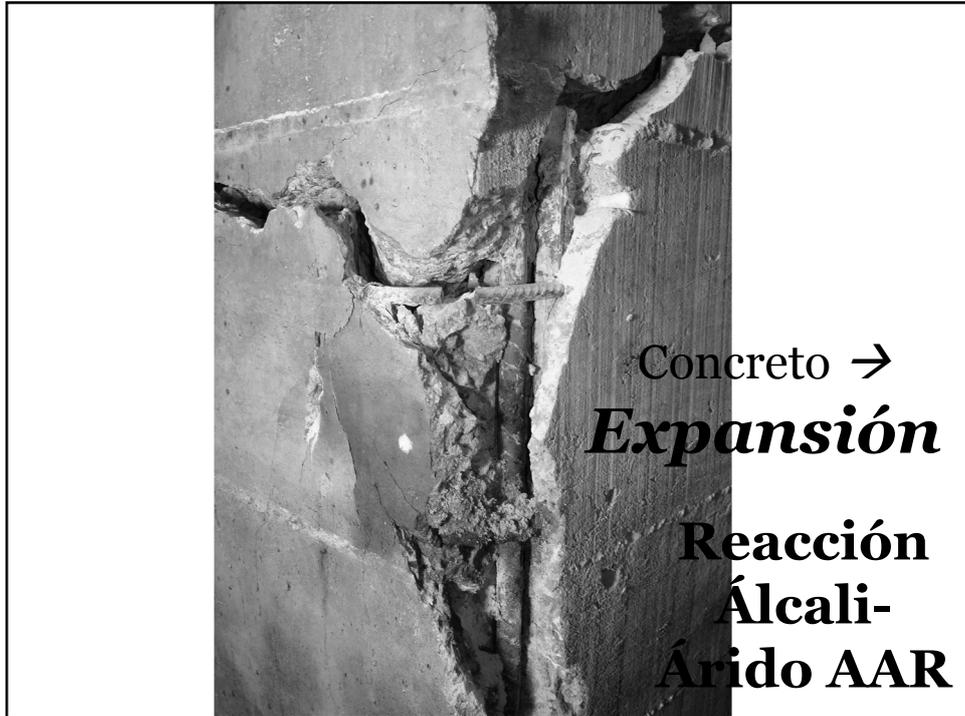
30



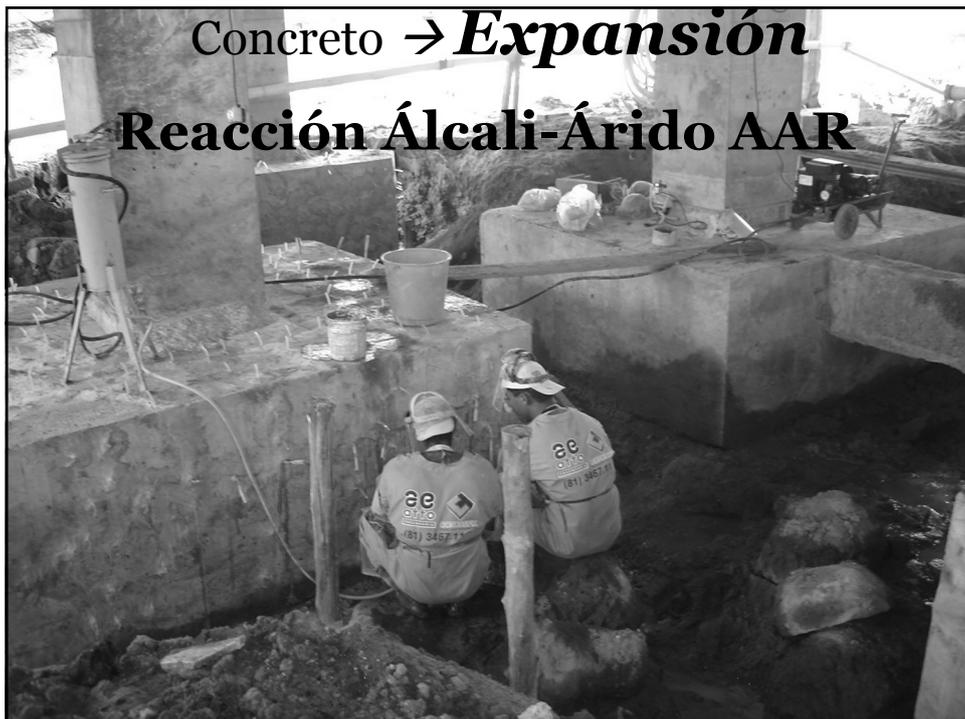
31



32



33



34

Concreto → *Expansión*

- ◆ *Todavía no hay modelo matemático*
- ◆ *Todavía no hay criterio único para el estado límite de durabilidad*
- ◆ *Hay prescripciones profilácticas muy claras*
- ◆ *Todavía hay que usar el buen sentido*

35

Concreto → *Suciedad*

hongos, hollín, polvo



36



37

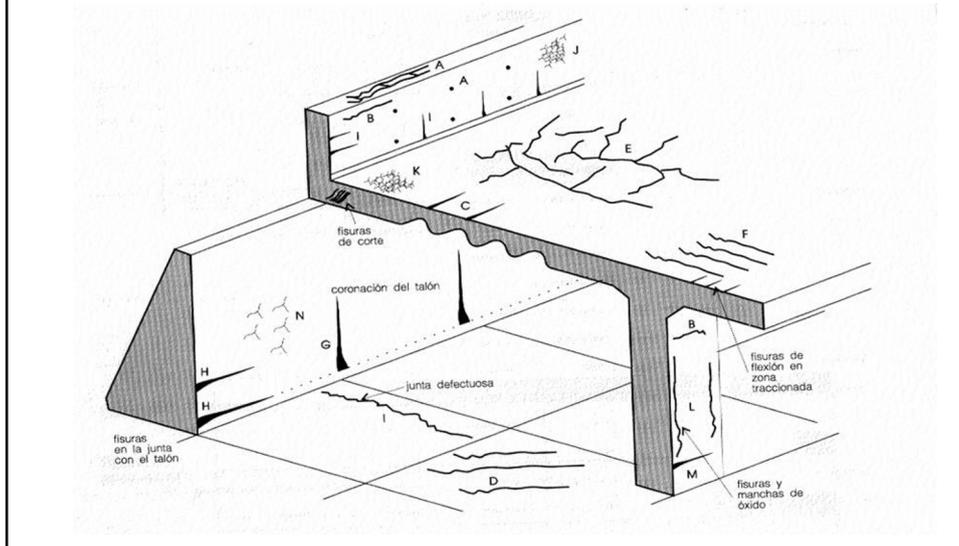
Concreto → *Suciedad*

- ◆ *Todavía no hay modelo matemático*
- ◆ *Todavía no hay criterio único para el estado límite de durabilidad*
- ◆ *Todavía no hay prescripciones profilácticas muy claras*
- ◆ *Todavía hay que usar el buen sentido*

38

Estructura

fisuras: térmicas, retracción, acciones, constructivas



39



40

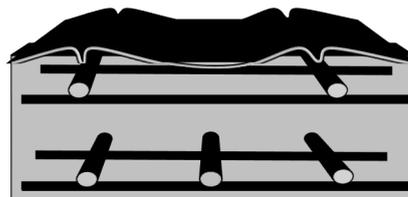
Estructura → Fisuración

- Asentamiento plástico
- Retracción por secado
- Origen térmica
- Desplazamientos excesivos
- Efectos de carga (diseño)
- Recalque diferencial

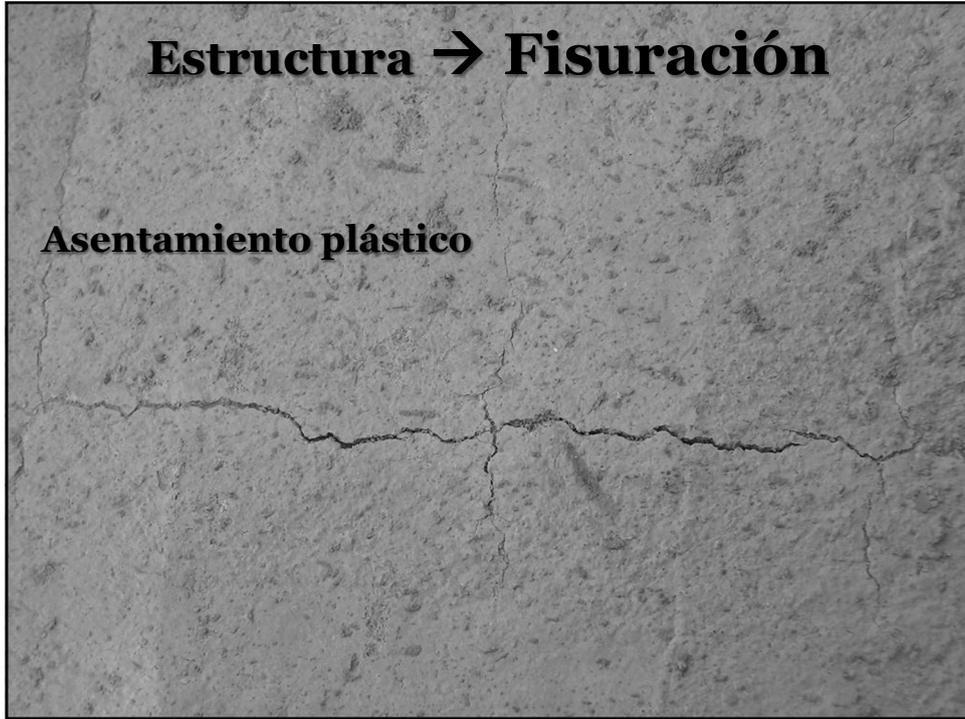
41

Estructura → Fisuración

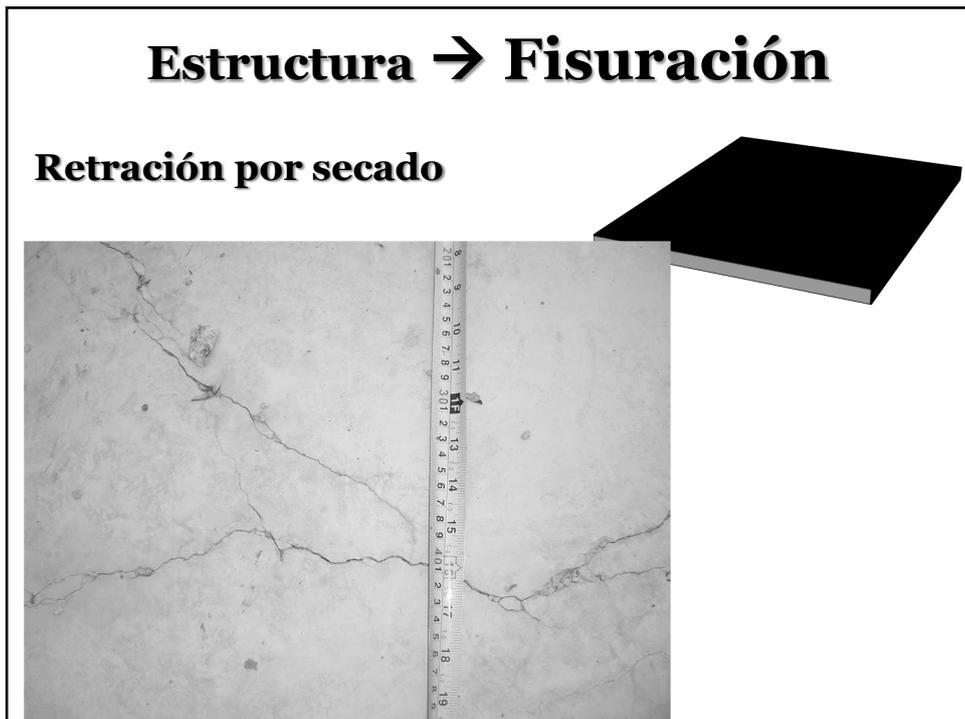
Asentamiento plástico



42



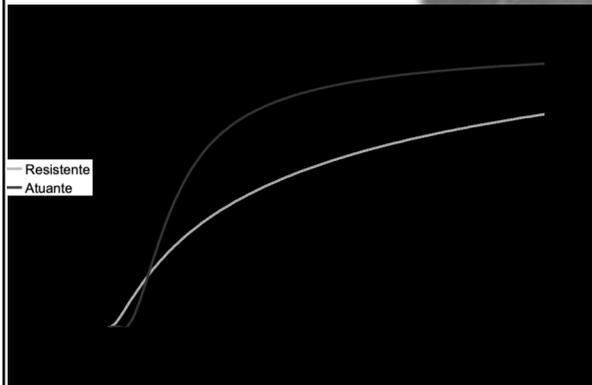
43



44

Estructura → Fisuración

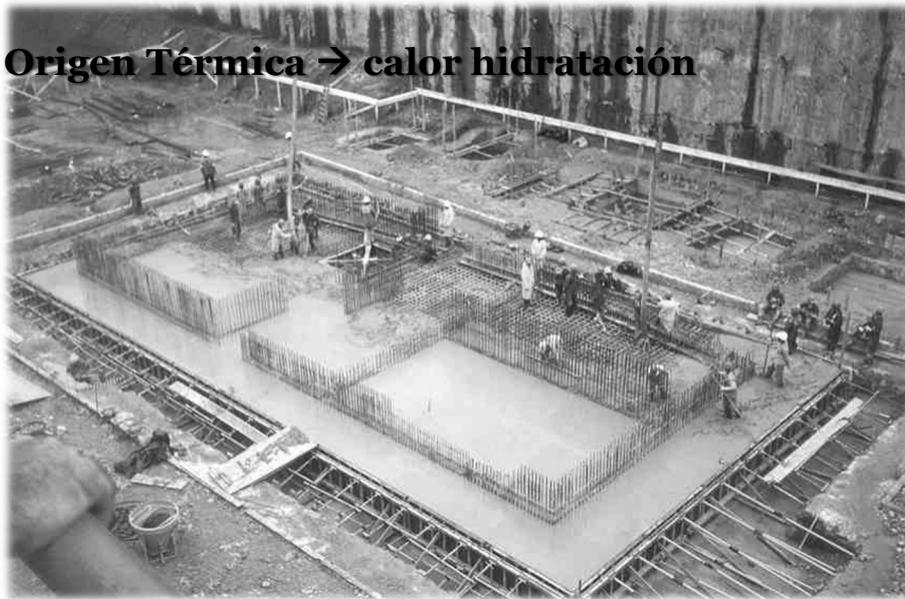
Origen Térmica → calor de hidratación



45

Estructura → Fisuración

Origen Térmica → calor hidratación



46

Estructura → Fisuración

Origen Térmica → acciones ambientales



47



48

Estructura → Fisuración

Origen Térmica → acciones ambientales



49

Estructura → Fisuración

Origen Térmica → acción del fuego



50

Estructura → Fisuración

Origen Térmica → acción del fuego



51

Estructura → Fisuración

Cargas excesivas en losas



52

Estructura → Fisuración

- | | |
|-----------------------------|------------------|
| ➤ Asentamiento plástico | → no hay modelos |
| ➤ Retracción por secado | → no hay modelos |
| ➤ Origen térmica | → no hay modelos |
| ➤ Desplazamientos excesivos | → no hay modelos |
| ➤ Efectos de carga (diseño) | → hay modelos |
| ➤ Recalque diferencial | → hay modelos |

53

Conceptos

- ✓ **Conocer como envejece**

✓ Definir VU

- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Establecer Estados Limites**
- ✓ **Prever o Estimar VU**
- ✓ **Definir Mantenimiento**

54

Vida Útil en Brasil

ABNT NBR 6118:2007 item 6.2.1:

Por vida útil de diseño, entendiase el período de tiempo durante o cual se mantiene las características de las estructuras de concreto, desde que atendidos los requisitos de uso y mantenimiento prescritos por el Proyectista y por el Constructor, así como ejecución de los reparos necesarios debidos a daños accidentales.

55

Vida Útil en Estados Unidos

ACI 365.1R-00 item 1.1:

Service life is the period of time after placement during which all the properties exceed the minimum acceptable values when routinely maintained.

56

Vida Útil en Europa

fib Model Code 2010:

For new structures the specified service life defines the period in which the structure has to satisfy the performance criteria agreed, when routinely maintained.

For existing structures the specified residual service life defines the period, in which the structures has to meet the performance criteria agreed, when routinely maintained.

57

Vida Útil en México DF

NTCC-2004 “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre 2004.

Período de tiempo en que las estructuras deben ser idóneas para su uso, y debe ser, como mínimo, de 50años.

La durabilidad será tomada en cuenta en el diseño, cumpliendo con los siguientes requisitos:

- a) Calidad y curado del concreto, de acuerdo con las secciones 4.3 a 4.6;
- b) Restricciones en los contenidos químicos, de acuerdo con la sección 4.8;
- c) Recubrimiento, de acuerdo con la sección 4.9; y
- d) Precauciones contra la reacción álcali – agregado, de acuerdo con la sección 4.10.

58

Conceptos

✓ **Conocer como envejece**

✓ **Definir VU**

✓ **Quantificar VU**

✓ **Establecer Estados Limites**

✓ **Prever o Estimar VU**

✓ **Definir Mantenimiento**

59

Vida Útil de Diseño

BS 7543, 1992

Vida Útil	Tipos	Exemplos
< 10 años	Temporárias	obras temporárias, divisórias, tapumes etc.
10 años	Pequena Vida útil	construções usadas para processos industriais de curta duração
30 años	Média Vida útil	a maiorias das construções industriais
60 años	Vida útil normal	obras públicas, escolas, hospitais, casas, edificios
120 años	Vida útil longa	obras de grande responsabilidade como barragens, pontes, metros, ...

Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components

60

Conceptos

- ✓ **Conocer como envejece**
- ✓ **Definir VU**
- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Establecer Estados Limites**
- ✓ **Prever o Estimar VU**
- ✓ **Definir Mantenimiento**

61



62

Doña de casa muere atingida por trozo de concreto (corrosión) que se cayó del edificio

Da Sucursal do Rio

A dona-de-casa Maria Borges Nascimento, 49, morreu ao ser atingida na cabeça por um pedaço de reboco do 12º andar de um prédio de apartamentos no centro da cidade, na av. Gomes Freire nº 740. A mulher morreu na hora, e teve a face desfigurada. O pedaço de reboco caiu, resvalou na marquise do prédio e acertou a dona-de-casa.

Maria estava voltando para casa com as compras feitas num supermercado da região. Ela morava sozinha com o filho, o estudante Nino André Borges Nascimento, 27. O síndico do prédio em que aconteceu o acidente, João Salvador, afirmou que a obra de recuperação da fachada já havia sido aprovada pelo condomínio, mas faltava orçar o serviço.

A Defesa Civil municipal interditou a área em torno do prédio, o que deve causar prejuízo aos estabelecimentos comerciais que funcionam no local. Segundo o diretor do Departamento de Engenharia do órgão municipal, Roberto Formiga Oberlaender, o local só será liberado após o condomínio contratar uma firma para retirar as partes da fachada que ofereçam risco de desabamento.

Na área térrea interditada funcionam uma padaria, uma distribuidora de bebidas. No prédio ao lado, em área também interditada, funcionam um pequeno hotel e um restaurante.



Corpo de Maria Borges coberto em frente ao prédio

Oberlaender afirmou que será dado ao condomínio um prazo para recuperação da fachada. Caso o prazo não seja cumprido, o condomínio terá que pagar multa. Muito abalado, o filho da dona-de-casa não quis comentar que providências legais tomará em relação ao caso.

Oberlaender disse que um dos

problemas do centro são os prédios antigos em mau estado de conservação. Além da má conservação do reboco, as marquises velhas são problemas apontados pelo diretor da Defesa Civil.

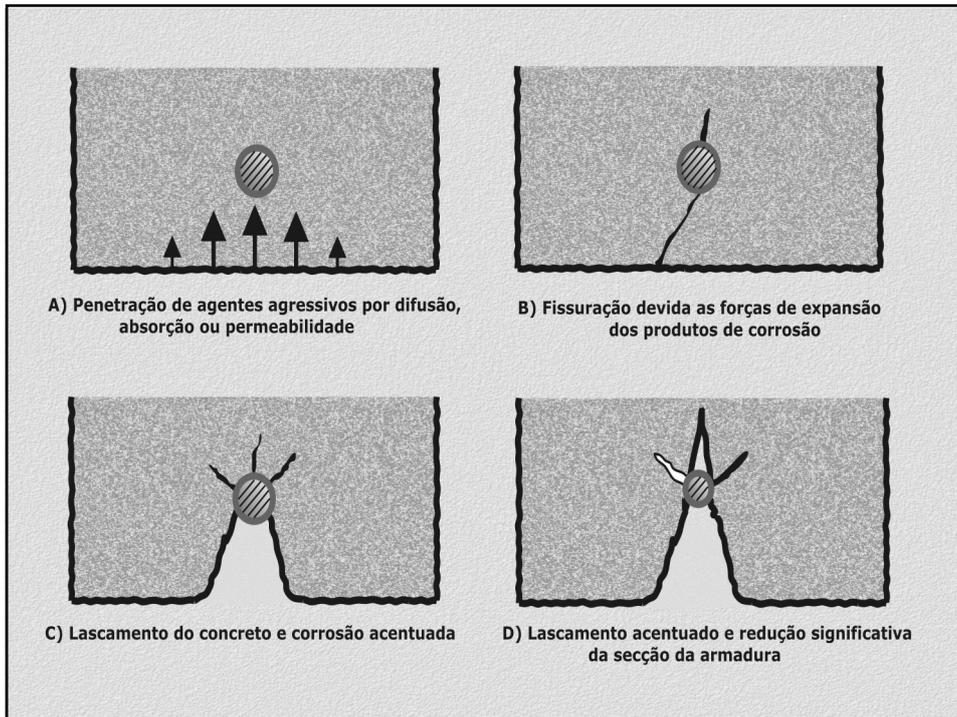
Segundo ele, os proprietários são obrigados a realizar obras de recuperação, mas a fiscalização não cabe à Defesa Civil.

63

Algunas definiciones de Vida Útil

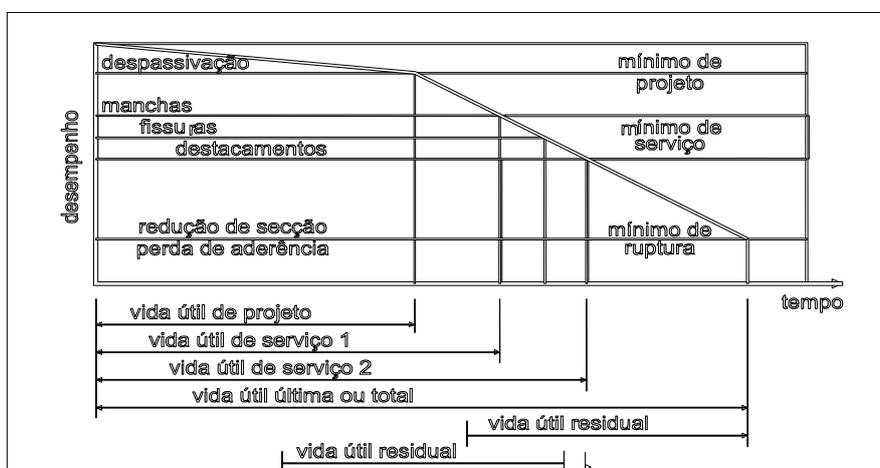
1. Vida Útil de servicio
2. Vida Útil de diseño
3. Vida Útil funcional
4. Vida Útil de ruptura
5. Vida Útil última o de colapso
6. Vida Útil nominal
7. Vida Útil residual
8. Vida Útil técnica
9. Vida Útil económica

64

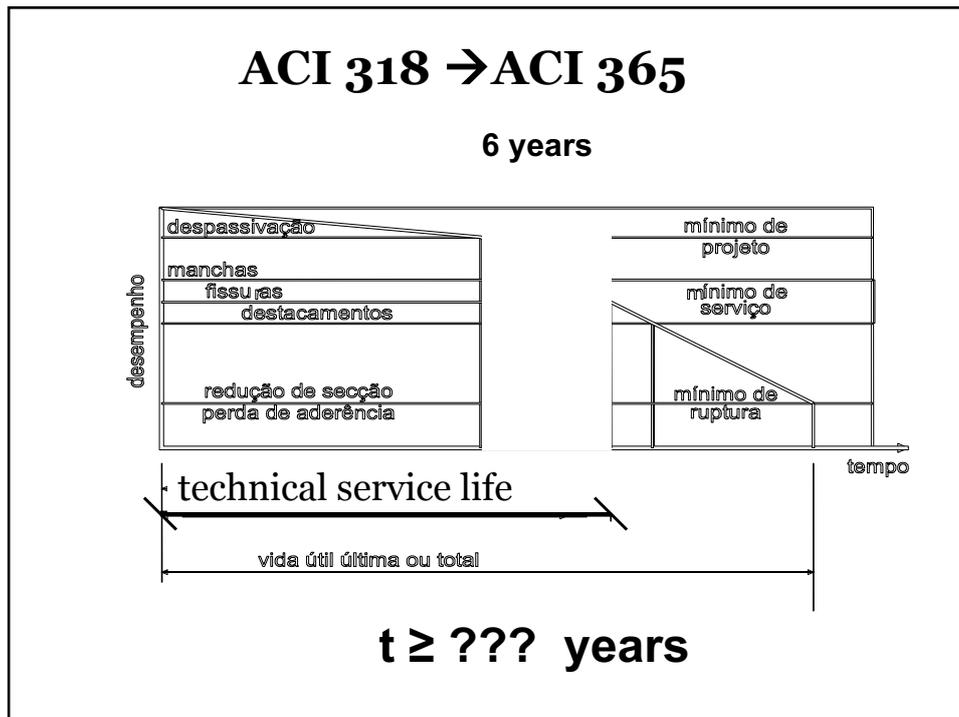


65

Vida Útil para modelo de Corrosión del Acero de Refuerzo



66



67

Estados Limites - Modelos

- ✓ **Corrosión → OK**
- ✓ **Fisuras cargas → OK**
- ✓ **Lixiviación ??? → nihil**
- ✓ **AAR ?? → nihil**
- ✓ **Sulfatos ??? → nihil**
- ✓ **Otras fisuras ??? → nihil**

68

Conceptos

- ✓ **Conocer como envejece**
- ✓ **Definir VU**
- ✓ **Quantificar VU**
- ✓ **Establecer Estados Limites**
- ✓ **Prever o Estimar VU**
- ✓ **Definir Mantenimiento**

69

MODELOS de PREVISIÓN de VIDA ÚTIL

- **Prescriptivo**
- **Mecanismos de transporte**
- **Estocásticos o probabilistas**
- **Ensayos (+exactos)**

70

Primeras Normas sobre Estructuras de Concreto

1903	Suiça
1903	Alemaña
1906	Francia
1907	Inglaterra

71

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 (> 5,0cm) 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).”

72

Vida Útil → Prescriptiva *no hay modelo matemático de previsión*

Hay de utilizar caminos indirectos:

- ✓ Elegir cemento, adiciones, áridos, agua por m³;
- ✓ Fijar relación a/c y contenido de cemento;
- ✓ Fijar resistencia y módulo;
- ✓ Fijar espesor de recubrimientos;
- ✓ Fijar abertura máxima de fisuras;
- ✓ Recomendar formas geométricas especiales;
- ✓ Adoptar medidas de protección especiales

73

Vida Útil → Prescriptiva *no hay modelo matemático de previsión*

Norma Mexicana → ejemplo

De acuerdo a la Tabla 4.1, letra b): →

Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores ligeramente agresivos (por ejemplo atmosfera del DF), deben ser clasificados como ambiente de agresividad B1.

74

Norma Mexicana → ejemplo

Miembros sujetos a clasificaciones de exposición B1 serán:

1. curados por 7 días, al mínimo;
2. f'_c no menor de 20 MPa (200 kg/cm²);
3. Recubrimiento libre del acero de refuerzo:
 - $f'_c = 20\text{MPa} \rightarrow 50\text{mm}$
 - $f'_c = 25\text{MPa} \rightarrow 40\text{mm}$
 - $f'_c = 30\text{MPa} \rightarrow 35\text{mm}$
 - $f'_c = 40\text{MPa} \rightarrow 30\text{mm}$
 - $f'_c = 50\text{MPa} \rightarrow 30\text{mm}$
 - $f'_c = 60\text{MPa} \rightarrow 25\text{mm}$
 - $f'_c = 70\text{MPa} \rightarrow 25\text{mm}$

Presupone que k_{CO_2} para la misma VU de 50 años sea:

$$k_{20} = 1,25k_{25} = 1,43k_{30} = 1,67k_{40} = 1,67k_{50} = 2,00k_{70} = 2,00k_{70}$$

75

Comparación de Requisitos de diferentes normas VU = 50 años, exposición B1 (carbonatación)

Miembros sujetos a clasificaciones de exposición B1 = XC4
CEM 1, serán:

Recubrimiento libre del acero de refuerzo:

Netherlands → $a/c < 0,5$ 25mm cover

Germany → $a/c < 0,60$ 25mm cover

México → $a/c < 0,40$? 25mm cover ($f'_c > 60\text{MPa}$)

Brasil → $a/c < 0,55$ 25mm cover ($f_{ck} > 30\text{MPa}$)

76

Vida Útil → Prescriptiva → Limitaciones

Estructura en DF, o sea, riesgo de los componentes estructurales externos presentaren corrosión del acero de refuerzo por carbonatación.

Que pasa si utilizar adiciones de sílice y de metacaulin?

Que pasa si utilizar cemento de alto horno, o resistente a sulfatos, o de alta resistencia inicial?

Que pasa si utilizar aditivos inhibidores de corrosión?

Que pasa si el concreto tiene 175 L/m³ o 210 L/m³ de agua de amasado?

77

Vida Útil

La situación ideal seria tener posibilidad de elegir una mezcla de concreto que parezca mas interesante y probarla através de ensayos standars sacando de esos ensayos los parametros “reales” o “efectivos”, o aúm mejor, parametros mas probables de comportamiento de ese concreto en la estructura durante su vida útil.

El futuro apunta para eso, o sea, normas de desempeño en substitución a normas prescriptivas como las de hoy.

78

Modelos de Previsión de la Vida Útil

- ✓ Prescriptiva
- ✓ Mecanismos de transporte (determinista)
- ✓ Estocásticos (probabilista)
- ✓ Ensayos (*ideales*)

79

Principales mecanismos de transporte que atuam en él concreto

- *Permeabilidad (gradiente de presión A&G);*
- *Succión capilar (fuerzasr capilares de A);*
- *Difusión (gradiente de concentración salina, temperatura o densidad AI&G);*
- *Migración ionica (diferencia de potencial AI&G).*

80

Modelos de Previsión de la Vida Útil

Mecanismos de Transporte (determinísticos)

Generalización

$$e = k \cdot \sqrt{t}$$

acero

e

O_2

CO_2

Cl^-

H_2O

81

Carbonatación

$$t = \frac{e^2}{k_{CO_2}^2} \text{ (años)}$$

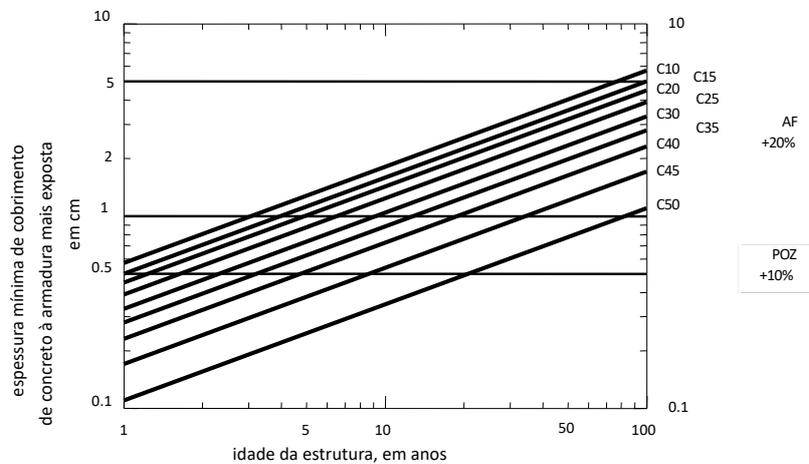
➤ $e \rightarrow 10 \text{ a } 50 \text{ mm}$

➤ $k_{CO_2} \rightarrow 0.1 \text{ a } 1.0 \text{ cm/año}^{1/2}$

82

Carbonatación

en faces de los componentes estructurales de concreto externos



83

Cloruros - difusión

$$t = \frac{e^2}{4 \cdot z^2 \cdot D_{ef,Cl}^{1/2}} \text{ (años)}$$

$e \rightarrow 10 \text{ a } 50\text{mm}$

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

84

Cloruros - difusión

$$e = 20\text{mm}$$

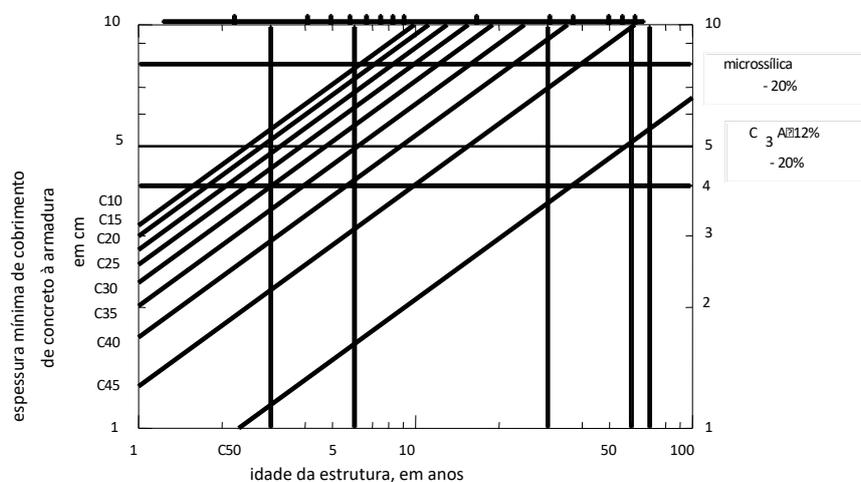
$$f'_c = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 4 \text{ años}$$

$$f'_c = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 150 \text{ años}$$

$$f'_c = 25 \text{ MPa} \rightarrow t = 23 \text{ años}$$

85

Difusión de cloruros en faces de los componentes estructurales externos, sujetos a brisa marina



86

Vida Útil
Mecanismo de Transporte
determinista
Limitaciones

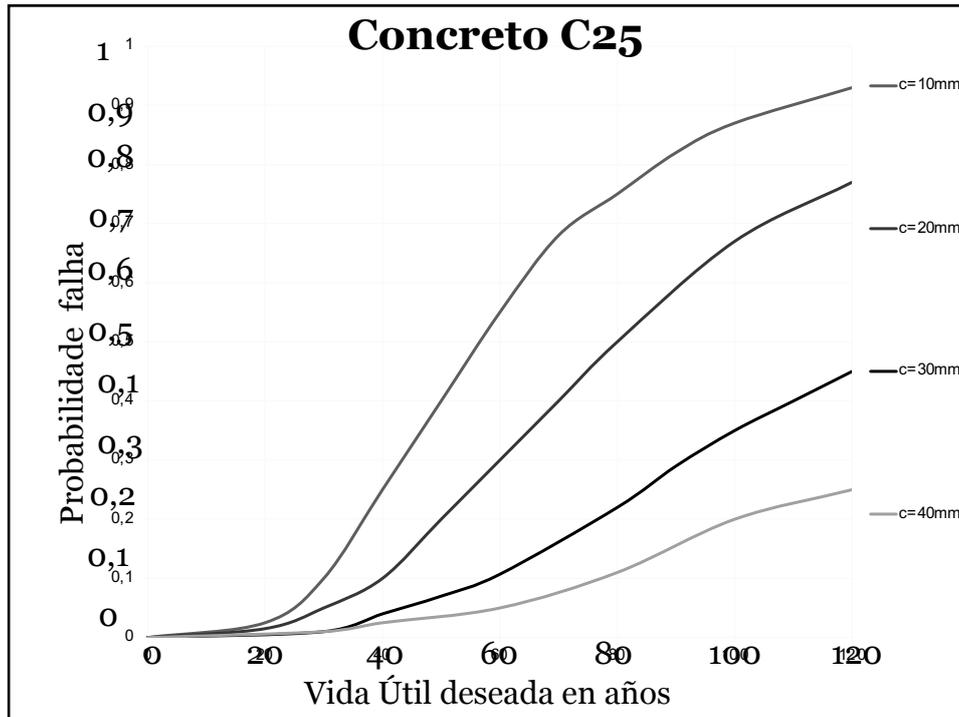
*El final de la vida útil no
ocurre de forma abrupta!*

87

**Modelos de Previsión de
la Vida Útil**

- ✓ Prescriptiva
- ✓ Mecanismos de transporte (determinista)
- ✓ Estocásticos (probabilista)
- ✓ Ensayos (*ideales*)

88



89

Modelos de Previsión de Vida Útil Apendice de la EH 2008

Carbonatación:

$$d = k_c * t^{1/2}$$

$$k_c = c_{env} * c_{air} * a * (f_{ck} + 8)^b$$

- | | |
|----------------------------|-----------------|
| ✓ amb. externo | $c_{env} = 0,5$ |
| ✓ contenido de aire < 4,5% | $c_{air} = 1,0$ |
| ✓ cemento ordinario | $a = 1800$ |
| ✓ cemento ordinario | $b = -1,7$ |

90

Modelos de Previsión de Vida Útil Apendice de la EH 2008

Carbonatación:

$$VU_d \text{ de calculo} = (VU_g \text{ de diseño}) * \gamma_t$$

VU_g = tempo hasta iniciación + tempo propagación
hasta destacamientos

$$\gamma_t = 1,1 - 1,3$$

$$VU_g = (d/k_c)^2 + (80*d)/(\phi * 3)$$

91

Modelos de Previsión de Vida Útil Apendice de la EH 2008

Carbonatación:

$f'_c = 20\text{MPa}$ con acero de $\phi = 16\text{mm}$
recubrimiento $d = 30\text{mm}$

$$k_{c20} = 3,12 \text{ mm/año}^{1/2}$$

$$VU_g = 92 + 50 = 142 \text{ años !}$$

92

Modelos de Previsión de Vida Útil Apendice de la EH 2008

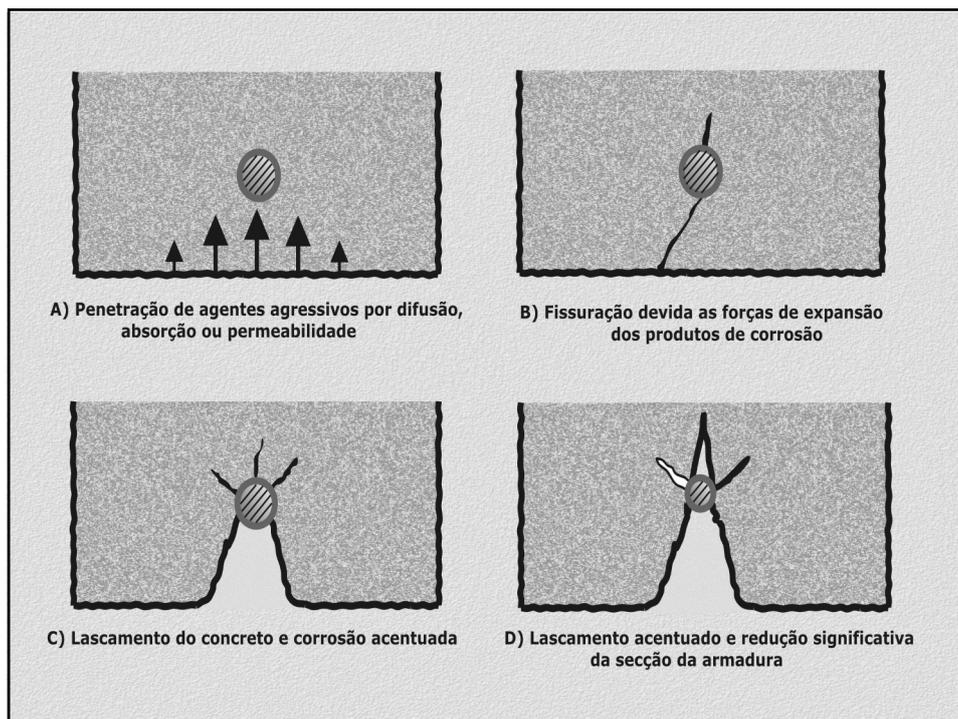
Carbonatación:

$f'_c = 50\text{MPa}$ con acero de $\phi = 16\text{mm}$
recubrimiento $d = 30\text{mm}$

$k_{c20} = 0,90 \text{ mm/año}^{1/2}$

$Vu_g = 1100 + 50 = 1.150 \text{ años !}$

93



94

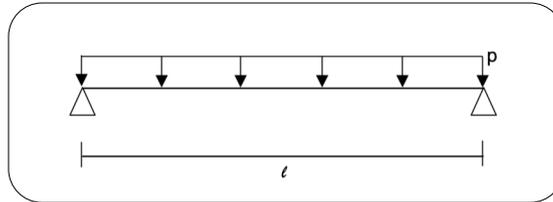
Comparación de dos vigas de concreto reforzado situadas en un ambiente marino, correspondiente a la Clase de Agresividad Ambiental 4 de la NBR-6118, y a la región con riesgo de corrosión segundo el ACI 318.

95

Parâmetros de Durabilidad para Resistir "Splash Zone"			
		NBR 6118	ACI 318
a/cm W/Cm	kg / kg	≤ 0,45	≤ 0,50
Consumo cemento Cement content	kg / m ³	no	no
f _{ck} f' _c	MPa	≥ 40	≥ 35
Cobrimiento Concrete cover	mm	laje 45 viga/pilar 50	laje 50 viga/pilar 60
Cloretos Chlorides	kg / kg _c	no	0,15%

96

Cenário



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

97

Parâmetros iniciais

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

Momento = 173 kN.m

$h = ???$

Armadura = ????

Acero CA-50 para NBR 6118

Acero CA-42 para ACI 318

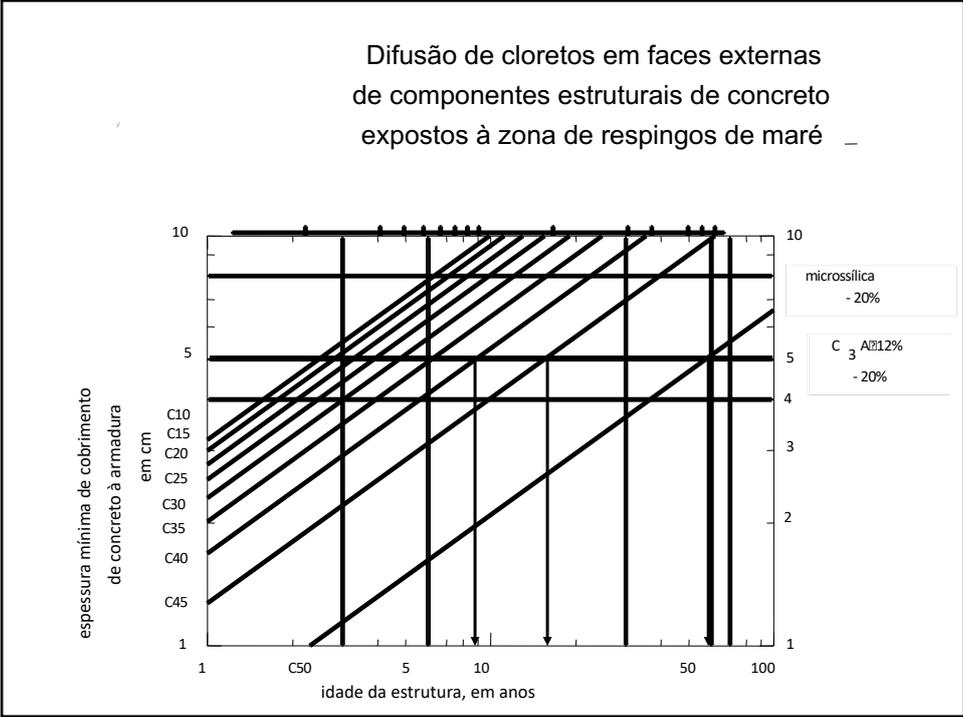
98

Exigência das Normas	
<p><u>ACI 318</u> <i>Para splash zone</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ recubrimiento*: ■ 60 mm ■ Clase de concreto: ■ $f'_c=35\text{MPa}$ 	<p><u>NBR 6118</u> <i>Para maré</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ recubrimiento: ■ 50 mm ■ Clase de concreto: ■ $f_{ck}=40\text{MPa}$

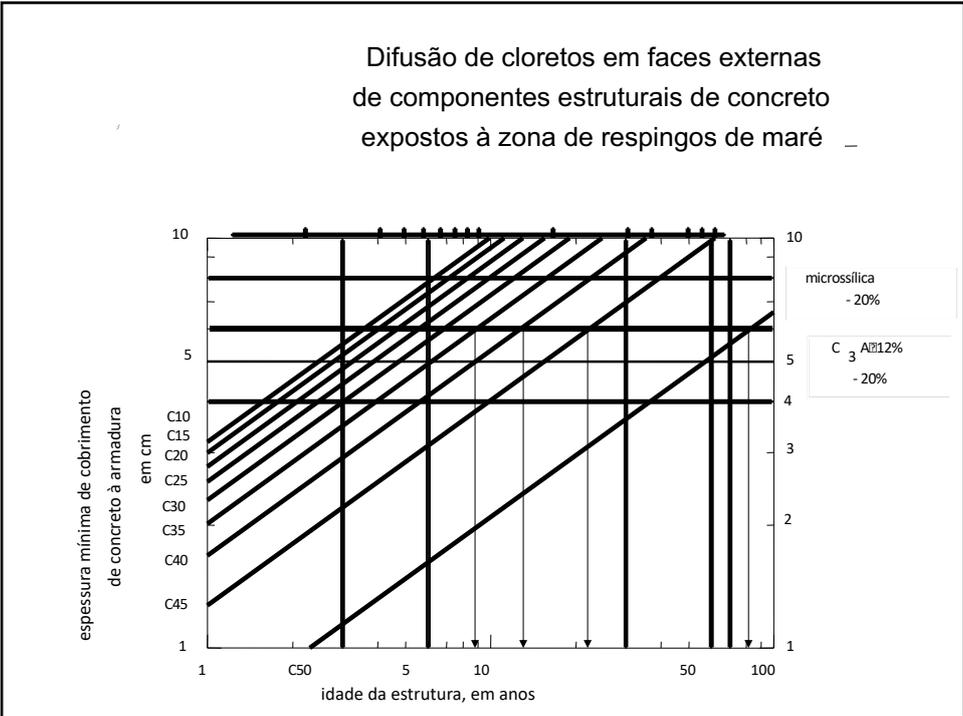
99

Dimensionamento Vida Útil	
<p>35 MPa</p> <p>○</p> <p>60mm</p>	<p>ACI 318</p>
<p>40 MPa</p> <p>○</p> <p>50mm</p>	<p>NBR 6118</p>

100



101



102

Previsión de VU con base a medidas efectivas

103

Inspecciones



Pacometría de columnas para posición de refuerzos

104

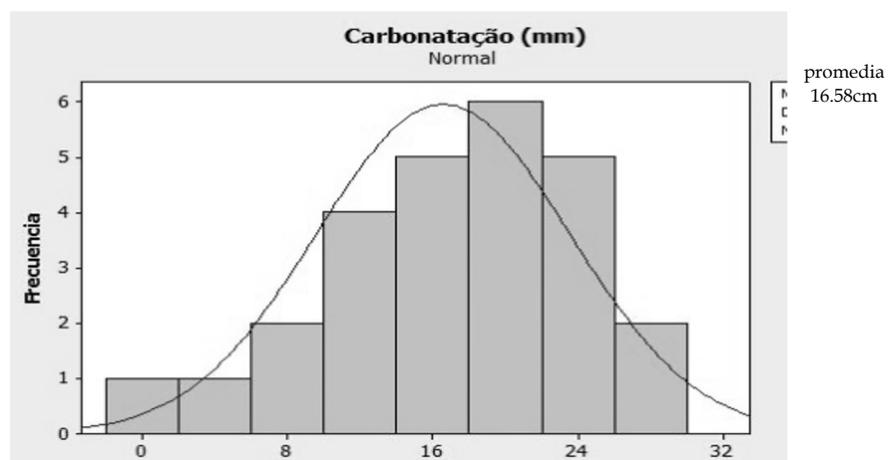
Inspecciones



medida de la profundidad de carbonatación

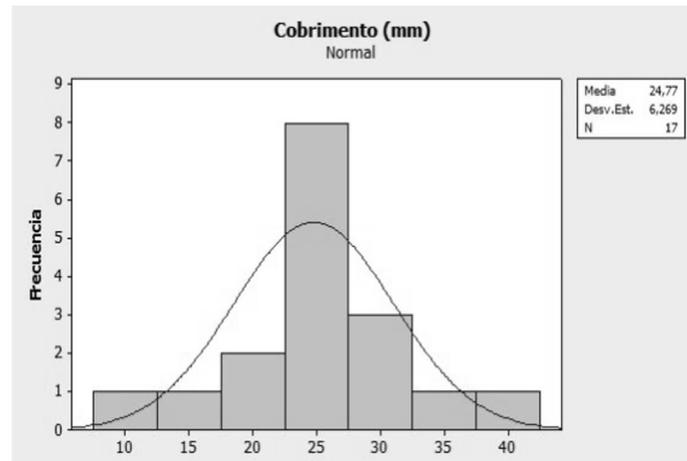
105

Carbonatación medida



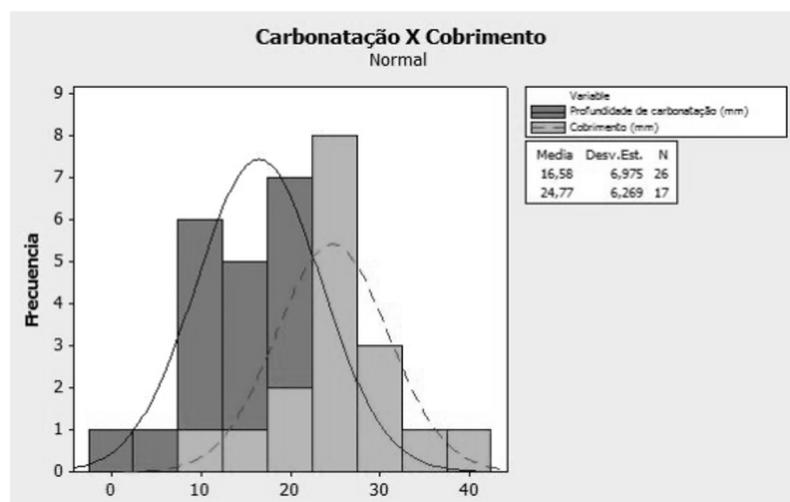
106

Recubrimiento medido



107

Carbonatación versus Recubrimiento



108

Recubrimiento promedio (c):	24.7cm
Carbonatación promedio (e_{CO_2}):	16.6cm
Edad de la estructura:	20años

$$e_{CO_2} = k_{CO_2} * \sqrt{t}$$

$$16.6 = k_{CO_2} * \sqrt{20}$$

$$k_{CO_2} = 3.7 \text{ cm}/\sqrt{\text{año}}$$

109

Quando va a despasivar?

$$e_{CO_2} = k_{CO_2} * \sqrt{t}$$

$$c_{CO_2} = 3.7 * \sqrt{t}$$

$$24.7 = 3.7 * \sqrt{t}$$

$$t = 44.5\text{años}$$

La estructura todavia tiene 24.5 años de vida residual

110



111