

COOPERACIÓN  
IBEROAMERICANA

**CYTED**  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

**IREHABILITAR**  
Red Temática XV.F

**CYTED**

**ONAT**

# **Garantizando Estructuras Seguras y Durables**

**Eng. Paulo Helene**  
*MSc, PhD, Prof. Titular da Universidade de São Paulo PCC.USP  
Deputy Chairman of fib (CEB-FIP) Commission 5 "Structural Service Life Aspects"  
Chairman of Red REHABILITAR CYTED  
Diretor Conselheiro do IBRACON*

Montevideo Uruguay      16 a 18 de Junio de 2003

**REHABILITAR**  
Red Temática XV.F

•1

## **“Seguras”**

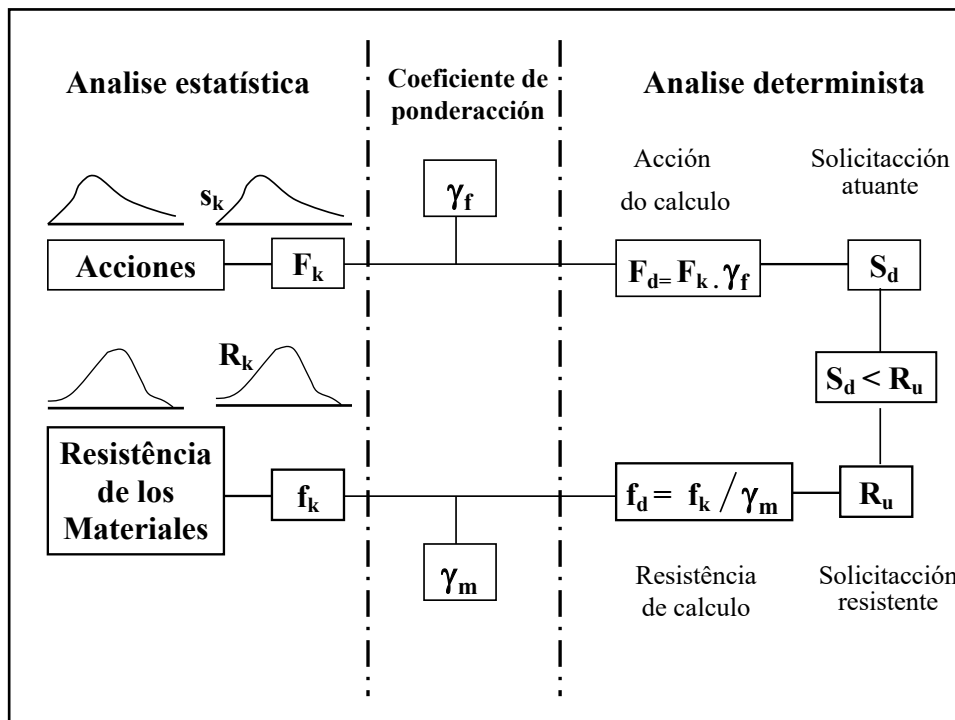
- **introducción de la seguridad en él diseño estructural**
- **Incendio**
- **Módulo de elasticidad**
- **Relaxación**

***fluencia, retracción, fisuración,  
fragilidad, curado, cimbramiento***

•2

# Introducción de la seguridad en el diseño estructural

•3



•4

## CEB - FIP Model Code 1990

bulletin d'information 213/214, May 93

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \quad \gamma_c = 1,5$$

$$\sigma_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

para  $f_{ck} = 25 \text{ MPa} \rightarrow$   
 $\sigma \approx f_{c,ef}(\text{estrutura}) \approx 14 \text{ MPa}$

•5

$$\gamma_c = \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3}$$

(1,20)  $\gamma_{c1} \rightarrow s_{c,ef} \text{ da estrutura} \geq s_c$

(1,05)  $\gamma_{c2} \rightarrow f_{c,ef}(\text{est.}) \neq f_c(\text{c.p.})$

(1,11)  $\gamma_{c3} \rightarrow \text{dúvidas sobre R}$

•6

**$f_{ck}$                     20 MPa**

**$f_{cd}$                     14 MPa**

**$\gamma_c = (1,4) = 6 \text{ MPa}$**

$$\gamma_c = \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3}$$

**$\gamma_{c1} = (1,20) = 3,0 \text{ MPa}$**  >  $s_{c,ef}$  da estrutura  $\geq s_c$

**$\gamma_{c2} = (1,05) = 1,0 \text{ MPa}$**  >  $f_{c,ef}(\text{est.}) \neq f_c(\text{c.p.})$

**$\gamma_{c3} = (1,11) = 2,0 \text{ MPa}$**  > dúvidas sobre R

•7

**$f_{ck}$                     20 MPa                    80MPa**

**$\gamma_c$                     14 MPa                    56 MPa**

**6 MPa                    24 MPa**

**?**

•8

# **Resistencia a Incendio**

•9

*NISTIR 6726. National Institute of Standards and Technology, 2001*

*HSC water-cement ratio 0.22 to 0.57, 51 to 93 MPa*

- 1. High-strength mixtures made with very low w/cm (0.22) showed less strength loss than with 0.33 w/cm.**
- 2. Explosive spalling was observed when the temperature of the specimen center was in the range of 200 and 325 °C.**

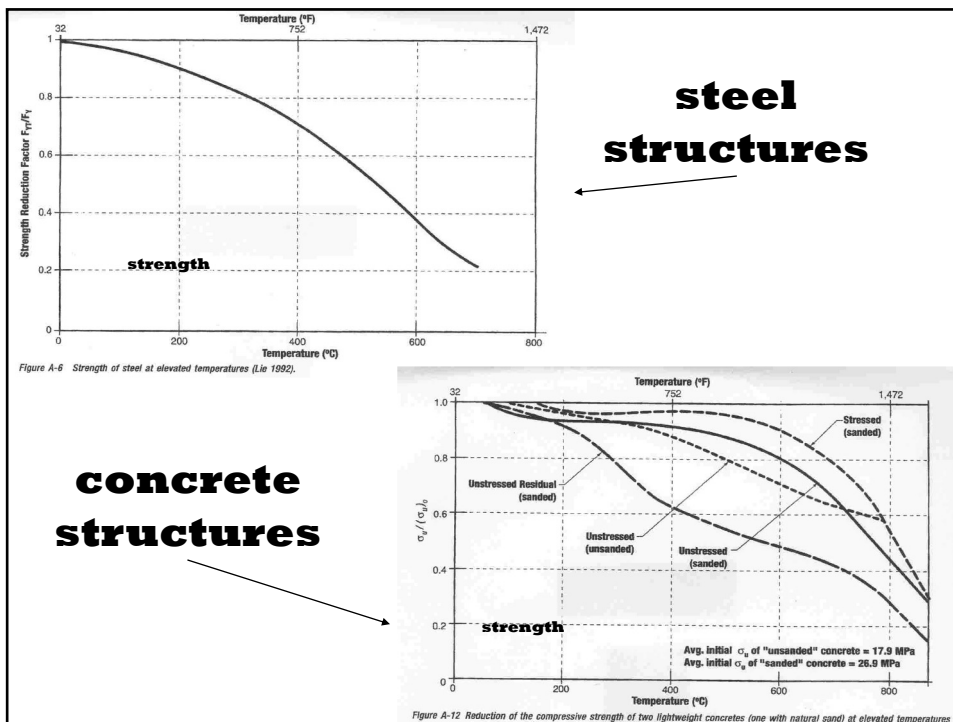
•10

NISTIR 6726. National Institute of Standards and Technology, 2001

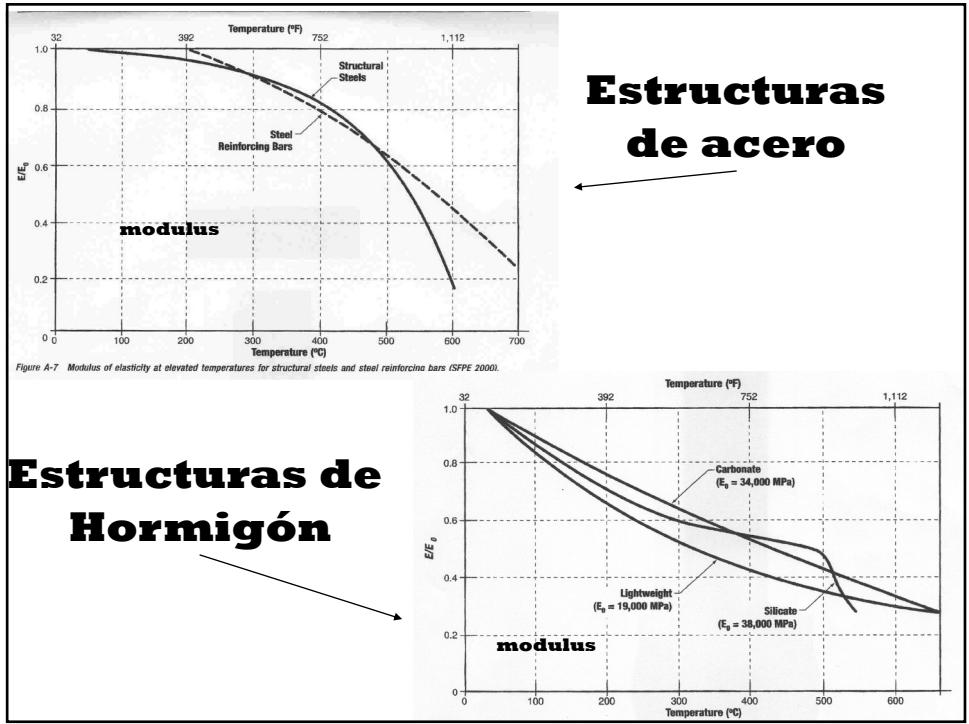
HSC water-cement ratio 0.22 to 0.57, 51 to 93 MPa.

3. **Preload seems to have a mitigating effect on the development of explosive spalling.**
4. **Concrete samples cast with 0.22 w/cm had a greater potential for spalling under unrestrained condition than samples cast with 0.33 w/cm. However, when the test was conducted under restrained conditions, explosive spalling only occurred with samples cast with 0.33 w/cm.**

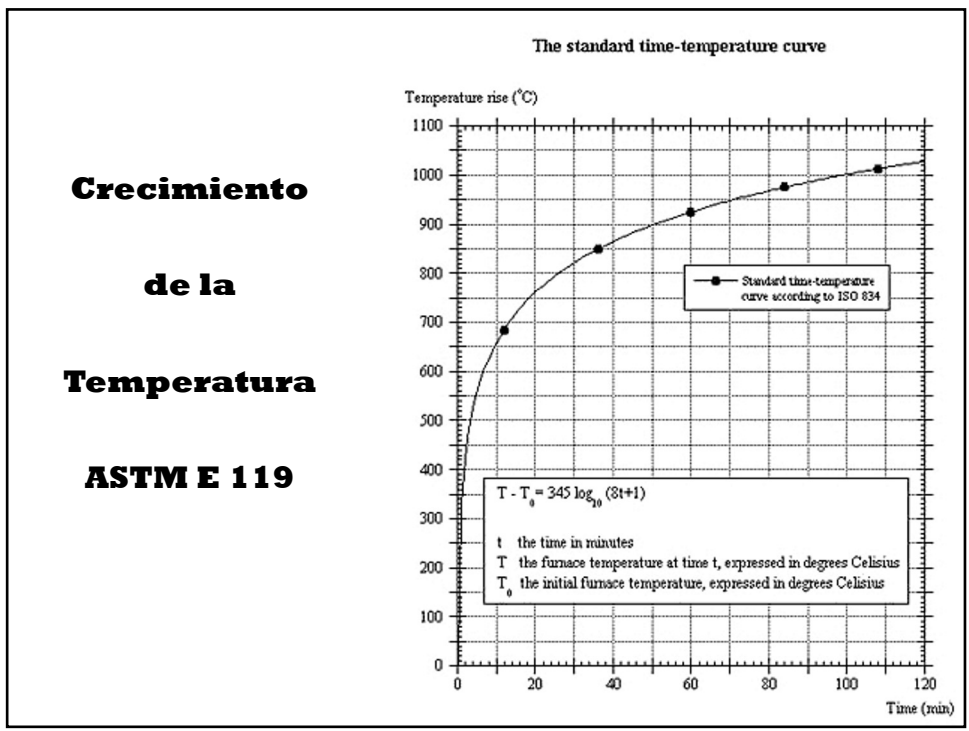
•11



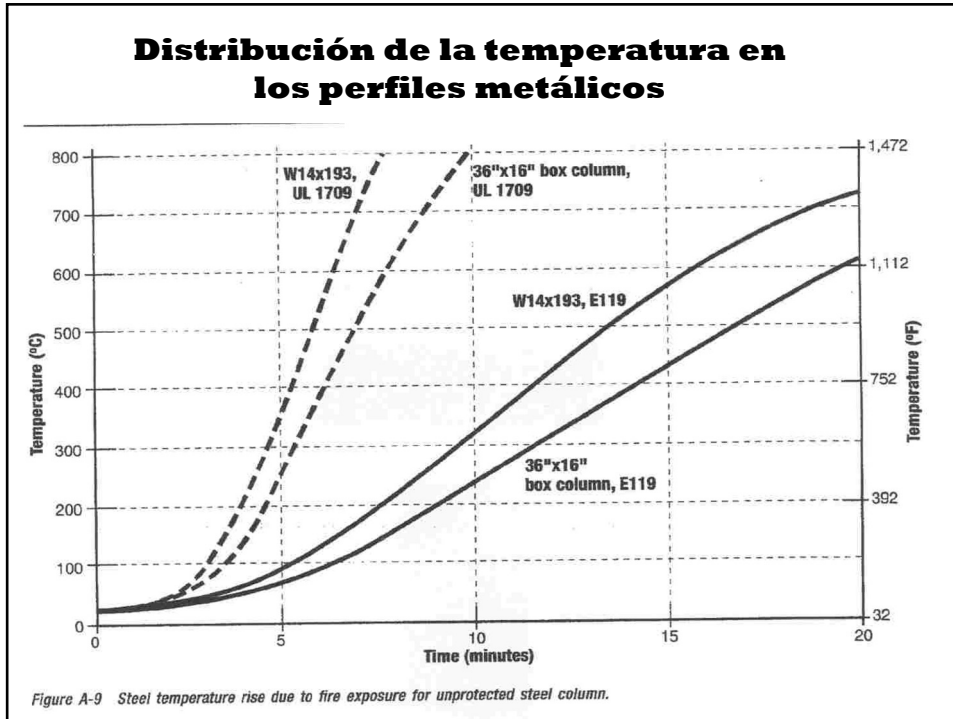
•12



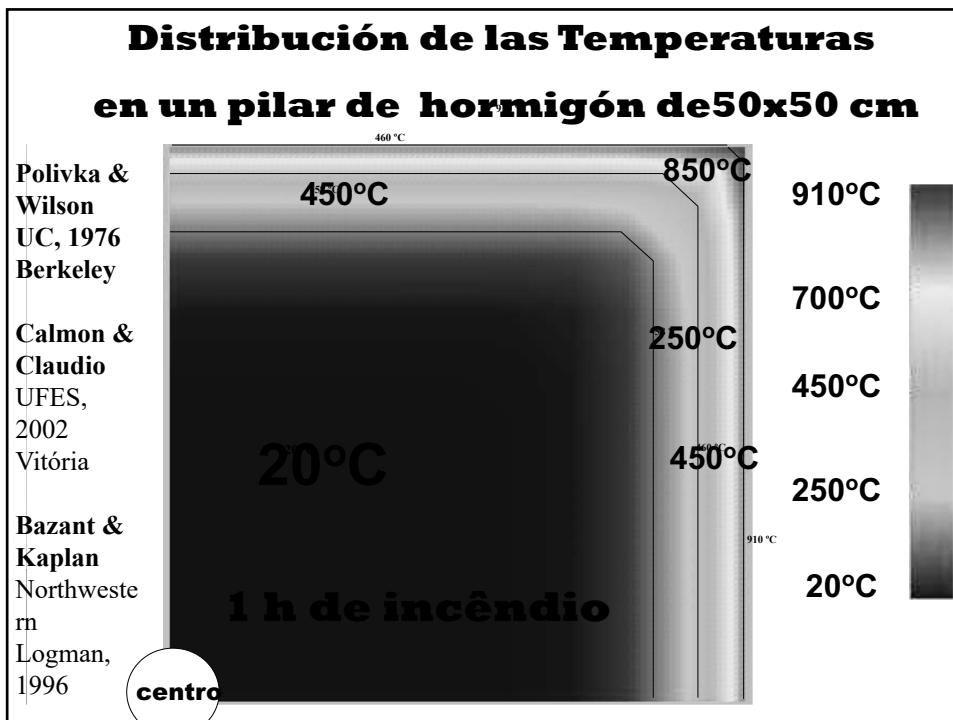
•13



•14

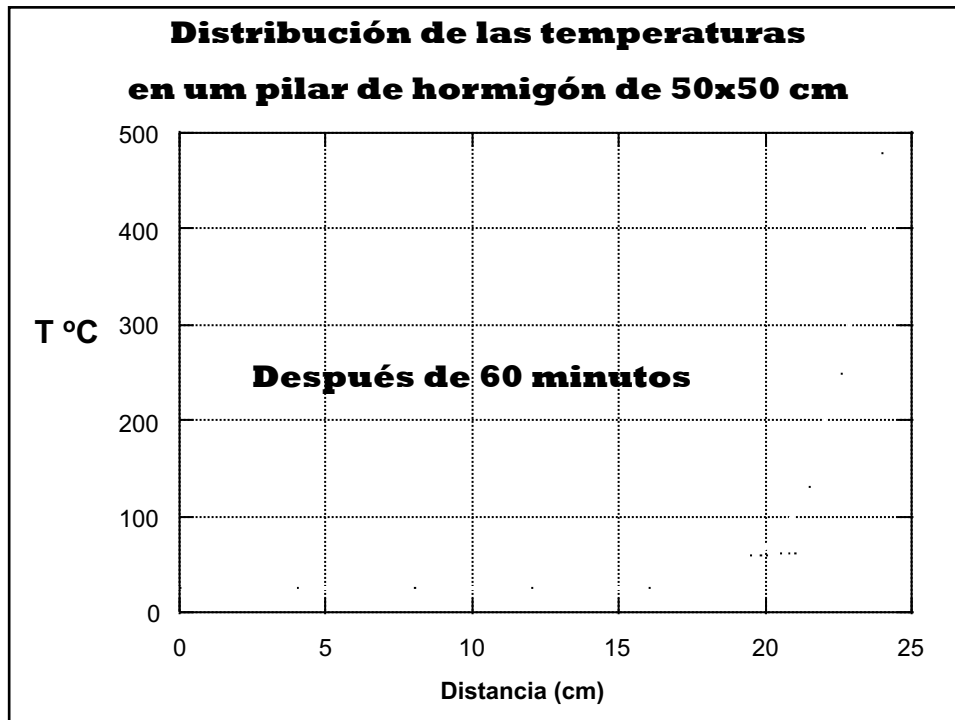


•15



•16





•17

# **Módulo de elasticidad**

•18

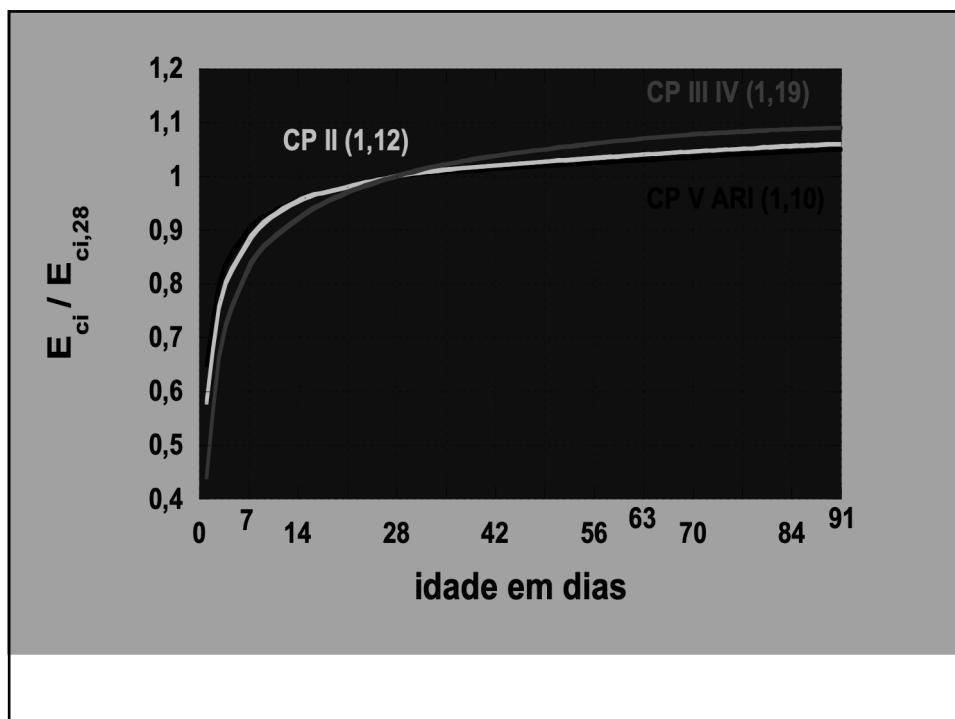
## Módulo de Elasticidad

Naturaleza del Agregado Grueso  
Basalto (1,2), granito (1,0), arenito (0,7)

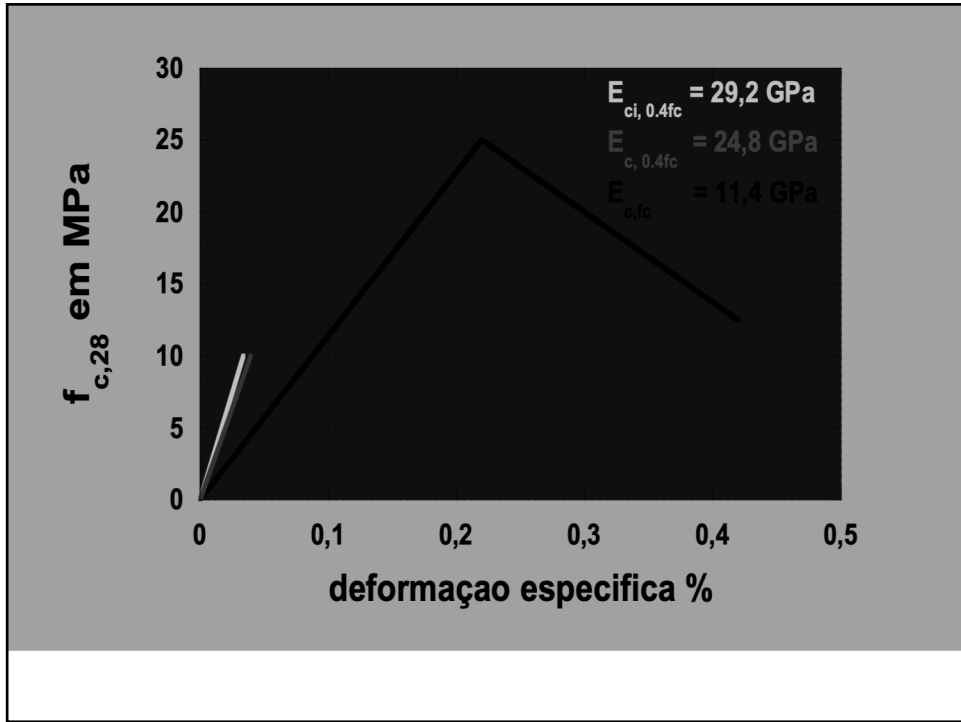
Consumo de Agregado Grueso  
Fluido (0,85)    Seca (1,15)

a/c, TZ, fc, ....

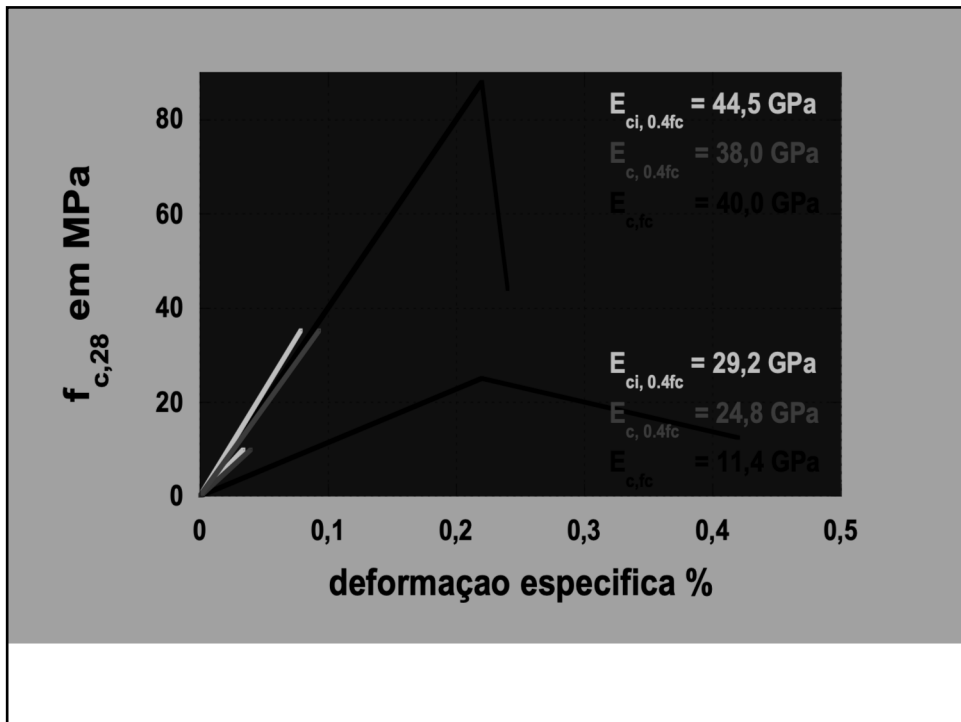
•19



•20



•21



•22

# Relaxación

•23

$$0,85? \approx k_{1,t} \cdot k_{2,t} \cdot f_{ck,t_0}$$

$k_{1,t}$  = crescimento  $f_{ck}$  após  $t_0$

$k_{2,t}$  = decréscimo de  $f_{ck}$  devido às cargas de longa duração, aplicadas na idade  $t_0$

(cargas permanentes + parte das acidentais)

•24

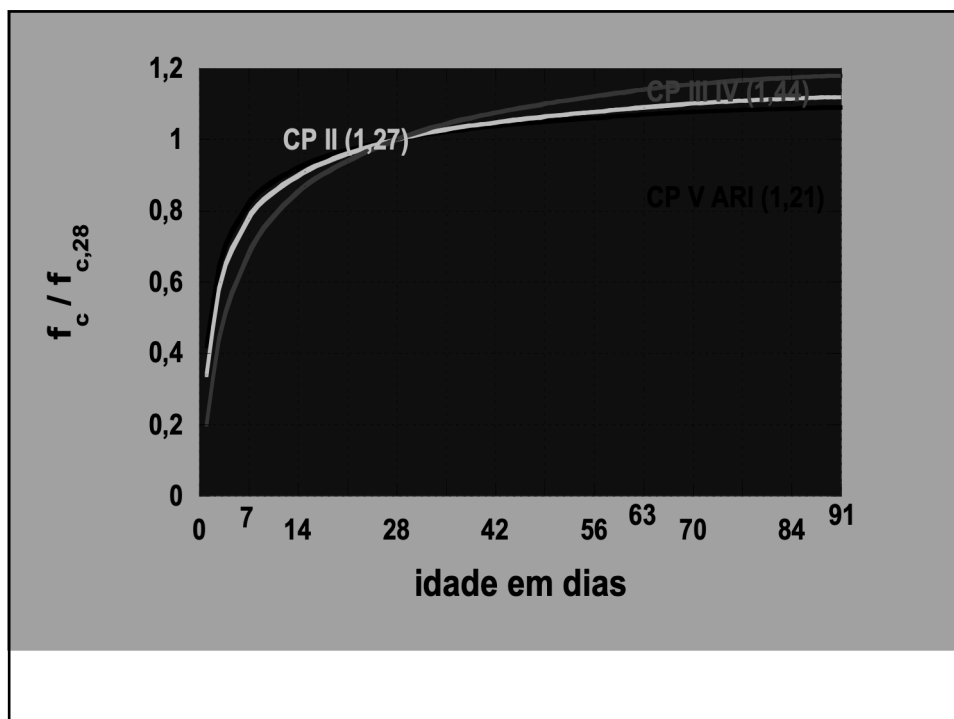
# Crescimento da Resistência

CEB-FIP Model Code 1990

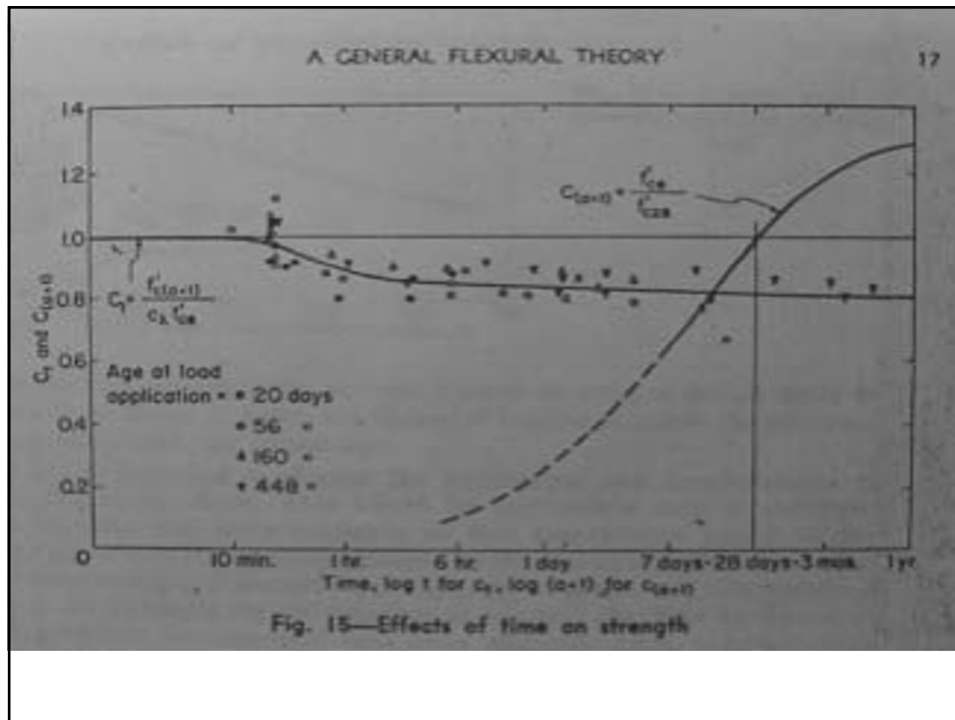
$$\frac{f_{cm,t}}{f_{cm,28}} = e^{s \cdot (1 - \sqrt{28/t})}$$

- CP V ARI  $\rightarrow s = 0,20 \rightarrow 1,22$
- CP I / II  $\rightarrow s = 0,25 \rightarrow 1,28$
- CP III/IV  $\rightarrow s = 0,38 \rightarrow 1,46$

•25



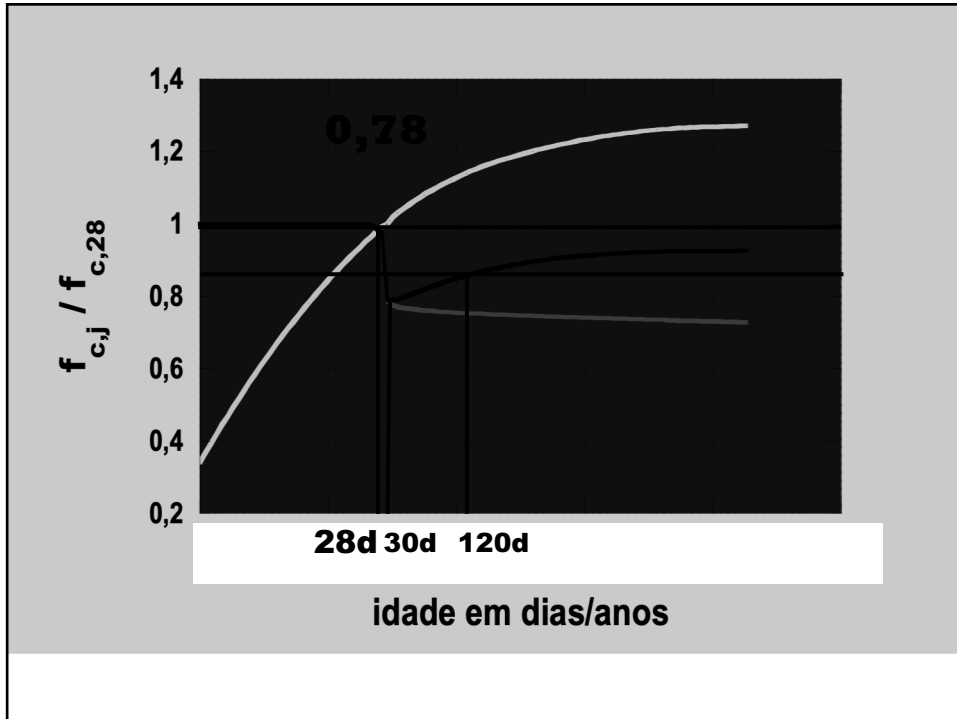
•26



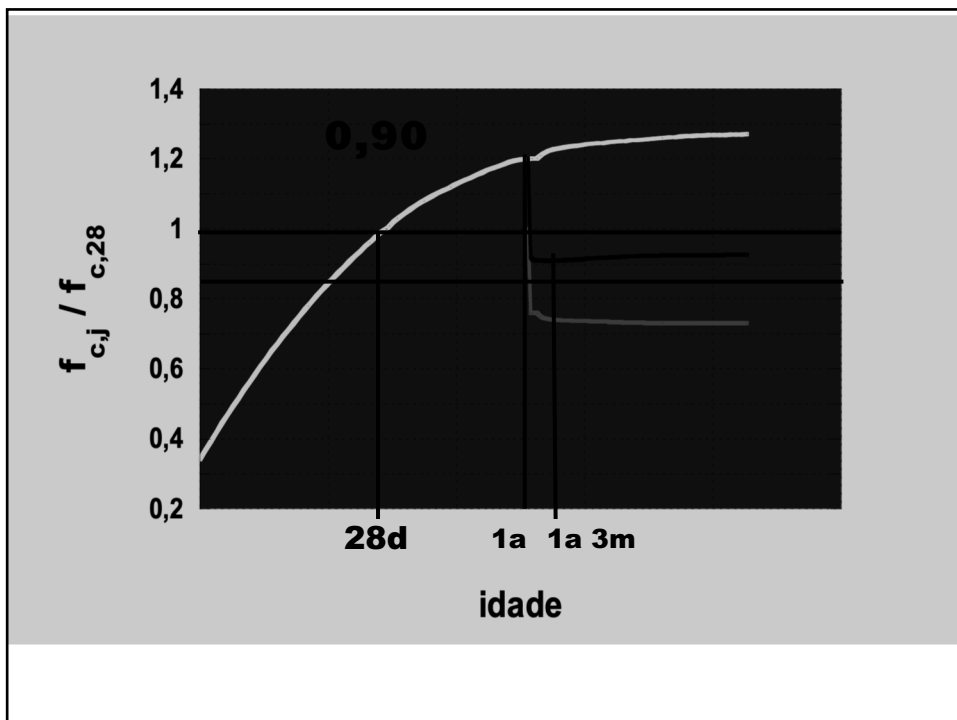
•27

<b><math>f_{ck}</math></b>	<b>20 MPa</b>
<b><math>f_{cd}</math></b>	<b>14 MPa</b>
<b><math>0,85 \cdot f_{cd}</math></b>	<b>12 MPa</b>
<b><math>k_1 = (1,21)</math></b>	<b>= 16,9 MPa</b>
<b><math>k_2 = (0,70)</math></b>	<b>= 9,8 MPa</b>
<b><math>k_{Rüsch} = (1,21 \cdot 0,70)</math></b>	<b>= 12 MPa</b>

•28



•29



•30

# **“Durables”**

## **introducción de la durabilidad en él diseño estructural**

- **complejidad**
- **experiência**
- **acelerado**
- **determinista**
- **estocástico**

•31

## **Introducción de la Durabilidad en el Diseño de las Estructuras de Concreto**

- 1. Envejecimiento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Clasificación del Medio Ambiente**
- 4. Classificación del Hormigón**
- 5. Criterios de Diseño**
- 6. Dosificación de los Materiales***
- 7. Procedimientos de Ejecución***
- 8. Mantenimiento Preventivo***

•32



## **ENVEJECIMIENTO**

- **Carbonatación**
- **Cloruros**
- **Humus**
- **Hongos**
- **Lixiviación**
- **Retracción**
- **Sulfatos**
- **<< pH**
- **Corrosión**
- **Fisuración**
- **Destacamento**

•33



**MASP, Av. Paulista. 1970  $f_{ck} = 45$  MPa**

•34



•35



•36



•37



•38



Puentes del Alamillo

•39



•40



•41

## **ENVEJECIMIENTO**

- **Eflorescencia**
- **Reacción álcali-agregado**
- **Fisuración**
- **Fatiga**
- **Acción física**
- **estéticas**
- **fisuración**
- **destacamento**

•42



•43



•44



•45



•46

# **VIDA ÚTIL**

**Período de tiempo durante el cual la estructura mantiene ciertas características mínimas de seguridad, estabilidad y funcionalidad, sin necesidad de intervención no prevista**

•47

## **BS 7543, 1992 Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components**

<b>Vida Útil</b>	<b>Tipo de estructura</b>
< 10 anos	temporárias
> 10 anos	substituíveis
>30 anos	ed.industriales y reformas
> 60 anos	ref. públicas y ed. nuevos
>120 anos	obras públicas y edificios

•48



## Introducción de la Durabilidad en el Diseño de Estructuras de Hormigón

1. Envejecimiento
2. Vida Útil
3. Clasificar Medio Ambiente
4. Clasificar los Hormigones
5. Criterios de Diseño

•49

## vida útil

### Clasificación de la agresividad

Tabela 12 - Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição

Macro-clima	Micro-clima			
	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seco <sup>1)</sup> UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos <sup>2)</sup> de molhagem e secagem	Seco <sup>3)</sup> UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos <sup>4)</sup> de molhagem e secagem
Rural	I	II	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	----	III
Industrial	II	III	II	III
Especial <sup>5)</sup>	II	III ou IV	III	III ou IV
respingos de maré	----	----	----	IV
submersa ≥ 3m	----	----	----	I
Soto	----	----	não agressivo I	úmido e agressivo II, III ou IV

•50

vida útil

## Clasificación de la agresividad

***CETESB L1.007.***

***Determinación del grado de agresividad del medio acuoso en los hormigones.***

•51

## **Introducción de la Durabilidad en el Diseño de Estructuras de Hormigón**

- 1. Envejecimiento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Clasificación Medio Ambiente**
- 4. Clasificación de los Hormigones**
- 5. Criterios de Diseño**

•52

## •Resistencia contra corrosión

		•A / C	•carbonatación	•cloruros
durável	≥ C50	≤ 0,38	≤ 10% de pozolana, sílica ativa ou escória	≥ 20% P e SA ≥ 65% de escória
resistente	C35 C40 C45	≤ 0,50	≤ 10% P e SA ≤ 15% de escória	≥ 10% P e SA ≥ 35 % de escória
normal	C25 C30	≤ 0,62	qualquer	qualquer
efêmero	C10 C15 C20	qualquer	qualquer	qualquer

•53

## •Resistencia contra medios agresivos

		•C <sub>3</sub> A	•expansión	•lixiviação
durável	≥ C50	≤ 5%	≥ 20% de pozolana ou sílica ativa ≥ 65% de escória	≥ 20% de pozolana ou sílica ativa ≥ 65% de escória
resistente	C35 C40 C45	≤ 5%	≥ 10% de pozolana ou sílica ativa ≥ 35 % de escória	≥ 10% de pozolana ou sílica ativa ≥ 35 % de escória
normal	C25 C30	≤ 8%	qualquer	qualquer
efêmero	C10 C15 C20	qualquer	qualquer	qualquer

•54

## **Correspondencia entre agresividad del ambiente y durabilidad del hormigón**

Clase de agresividad	Clase recomendable de hormigón
I débil	esfímero, normal resistente y durable
II média	normal, resistente y durable
III fuerte	resistente y durable
IV muy fuerte	durable

•55

## **Resistencia del Hormigón a los diferentes medios agresivos**

- tipo y consumo de cemento
- tipo y consumo de adiciones
- relación água / cemento
- naturaleza y  $D_{\max}$  del agregado

•56

	a/c	$f_c$	C	CO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>
CP IV	0,6	28	320	15	2200
CP V	0,6	35	320	8	2100

	$f_c$	a/c	C	CO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>
CP IV	35	0,5	390	10	1600
CP V	35	0,6	320	8	2100

•57

### **Durabilidad de las estructuras de hormigón → regla de los 4C**

- **Compactación**
- **Curado**
- **Composición del concreto**
- **ReCubrimiento**

•58





## **Introducción de la Durabilidad en el Diseño de Estructuras de Hormigón**

- 1. Envejecimiento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Clasificación Medio Ambiente**
- 4. Clasificación de los Hormigones**
- 5. Criterios de Diseño**

•59

### **Criterios de Diseño**



-  **Experiencia**
-  **Ensaïos acelerados**
-  **Concepto determinísta**
-  **Concepto probabilista**

•60

## **Primeras Normas sobre Estructuras de Hormigón**

<b>1903</b>	<b>Suiza</b>
<b>1903</b>	<b>Alemania</b>
<b>1906</b>	<b>Francia</b>
<b>1907</b>	<b>Inglaterra</b>

•61

### **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).”**

•62

## **ACI 318 / 2002**

**Em el Suelo**       $c > 76\text{mm}$

**À la intempérie**

$c > 51\text{mm}$  p/  $d > 19\text{mm}$

$c > 38\text{mm}$  p/  $d < 16\text{mm}$

**interiores**

**losas/paredes**

$c > 38\text{mm}$  p/  $d > 19\text{mm}$

$c > 19\text{mm}$  p/  $d < 16\text{mm}$

**vigas/pilares**

$c > 38\text{mm}$

•63

## **Critérios de Diseño**

 **Experiencia**

 **Ensayos acelerados**

 **Concepto determinísta**

 **Concepto probabilista**

•64



## **ASTM E 632, USA 1988**

*Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials*

- ✚ Ensayos exploratorios
- ✚ Ensayos acelerados y de envejecimiento natural
- ✚ Envejecimiento acelerado corresponde al natural
- ✚ Modelos matemáticos
- ✚ Criterios de desempeño
- ✚ Estimar la vida útil en condiciones de operación

•65

## **Criterios de Diseño**

- ✚ **Experiencia**
- ✚ **Ensaos acelerados**
- ✚ **Conceito determinísta**
- ✚ **Conceito probabilista**

•66

# Carbonatación

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

➤  $e_{\text{CO}_2} \rightarrow 1 \text{ a } 5 \text{ cm}$

➤  $k_{\text{CO}_2} \rightarrow 0.1 \text{ a } 1.0 \text{ cm/ano}^{1/2}$

•67

# Carbonatación

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

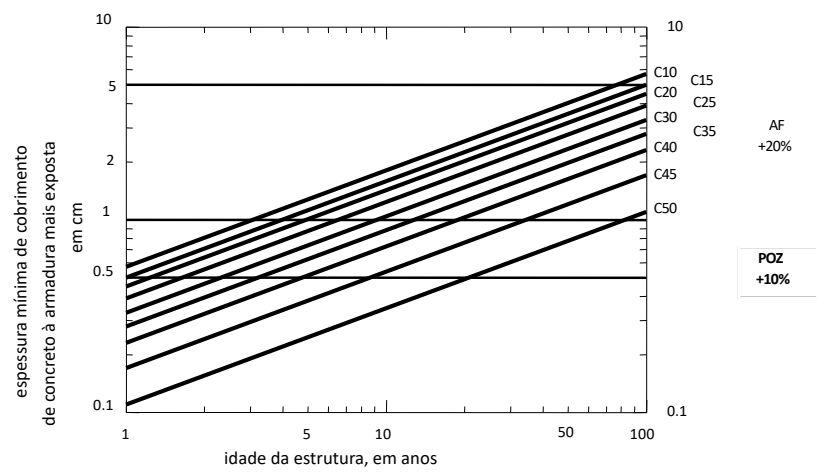
$f_{\text{ck}} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 8 \text{ años}$

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

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

•68

**referencia** **Carbonatación en faces externos de los componentes estructurales de hormigón expuestos a la intempérie**



•69

**Cloruros - difusão**

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

**c<sub>Cl</sub> → 1 a 5 cm**

**D<sub>ef,Cl</sub> → 0,15 a 2,7 cm<sup>2</sup>/año**

•70

# Cloruros - difusión

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

$$f_{ck} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 4 \text{ años}$$

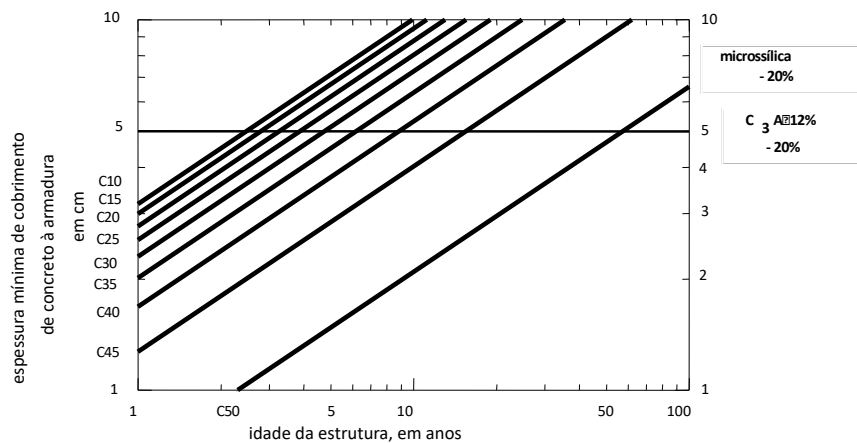
$$f_{ck} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 150 \text{ años}$$

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa} \rightarrow t = 23 \text{ años}$$

•71

referencia

Difusión de cloruros em faces externas  
De los componentes estructurales de hormigón  
expuestos à zona de splash



•72

## **Critérios de Diseño**

- **Experiencia**
- **Ensaio acelerados**
- **Concepto determinista**
- **Concepto probabilista**

•73

## **Métodos Estocásticos**

- **Estatístico comb. Determinístico**
- **teoria das falhas → distribuição de Weibull**
- **conceito de risco (probabilidade de falha x prejuízo causado)**

•74

## Métodos Estocásticos

probabilidade de falha:

$$\beta(t) = \frac{\mu(R,t) - \mu(S,t)}{\{\sigma^2(R,t) + \sigma^2(S,t)\}^{0,5}}$$

•75

## Carbonatação

$$S \rightarrow c_{CO_2} = k_{CO_2} \cdot t^{0,5} \rightarrow v = 0,6$$

$$R \rightarrow c \rightarrow v = 0,2$$

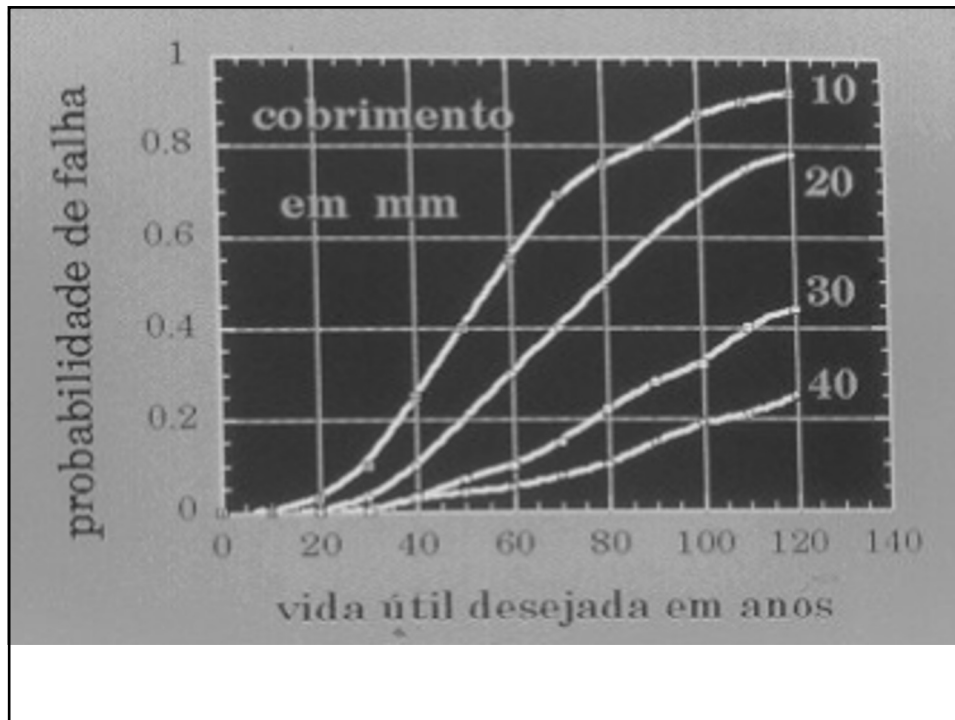
qual é o c p/ 50 anos c/ quantil de 10%?

$$\beta = 1,28$$

$$p/ 15 \text{ MPa} \rightarrow c = 55 \text{ mm}$$

$$p/ 40 \text{ MPa} \rightarrow c = 15 \text{ mm}$$

•76



•77

**critérios Medidas Especiales**

- revestimentos
- galvanización
- acero inox
- inhibidores.....

•78

## **Sustanaible Development**

“Increasing service life of concrete structures we can preserve the natural resources.

If we develop the design and construction ability we can get concrete structures with **500 years** service life. Doing this we can multiply by ten our productivity which means preserve the 90% of them”

***Kumar Mehta***

Reducing the Environmental Impact of Concrete  
*Concrete International*. ACI, v.23, n. 10, Oct. 2001. p.61-66

•79