

Garantindo Estruturas Seguras e Duráveis

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
Director of GLARilem
Diretor Conselheiro do IBRACON*



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•1

“Seguras”

- **introdução da segurança no projeto estrutural**
- **incêndio**
- **Módulo de elasticidade**
- **Relaxação**

***fluência, retração, fissuração,
fragilidade, cura, escoramento***



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

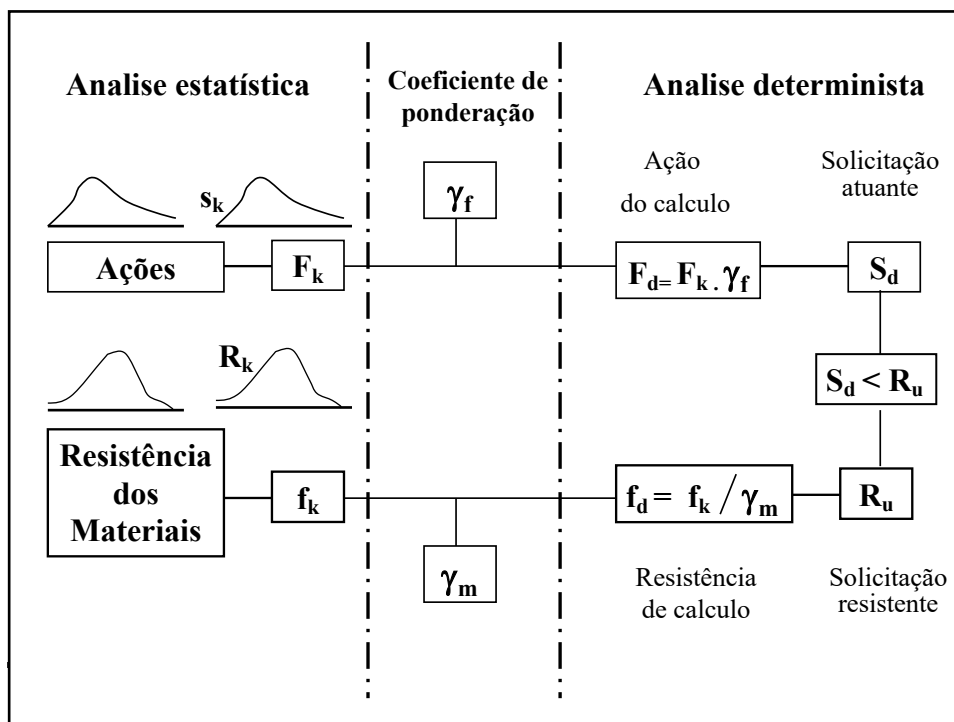
•2

Introdução da segurança no projeto estrutural



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•3



•4

NBR 8681 Ações e segurança

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \quad \gamma_c = 1,4$$

$$0,85 f_{cd} \rightarrow 0,85 f_{ck} / \gamma_c$$

$$\text{para } f_{ck} = 25 \text{ MPa} \rightarrow \\ f_{c,ef}(\text{estrutura}) = 15,2 \text{ MPa}$$



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•5

CEB - FIP Model Code 1990

bulletin d'information 213/214, May 93

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

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

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•6

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

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•7

f_{ck}	20 MPa
f_{cd}	14 MPa
$\gamma_c = (1,4)$	= 6 MPa
$\gamma_{c1} = (1,20)$	= 3,0 MPa
$\gamma_{c2} = (1,05)$	= 1,0 MPa
$\gamma_{c3} = (1,11)$	= 2,0 MPa

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

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

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

$\gamma_{c3} \rightarrow \text{dúvidas sobre R}$

•8

f_{ck}	20 MPa	80MPa
γ_c	14 MPa	56 MPa
	6 MPa	24 MPa
?		

 Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•9

Resistência a Incêndio

 Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•10

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.**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•11

NISTIR 6726. National Institute of Standards and Technology, 2001

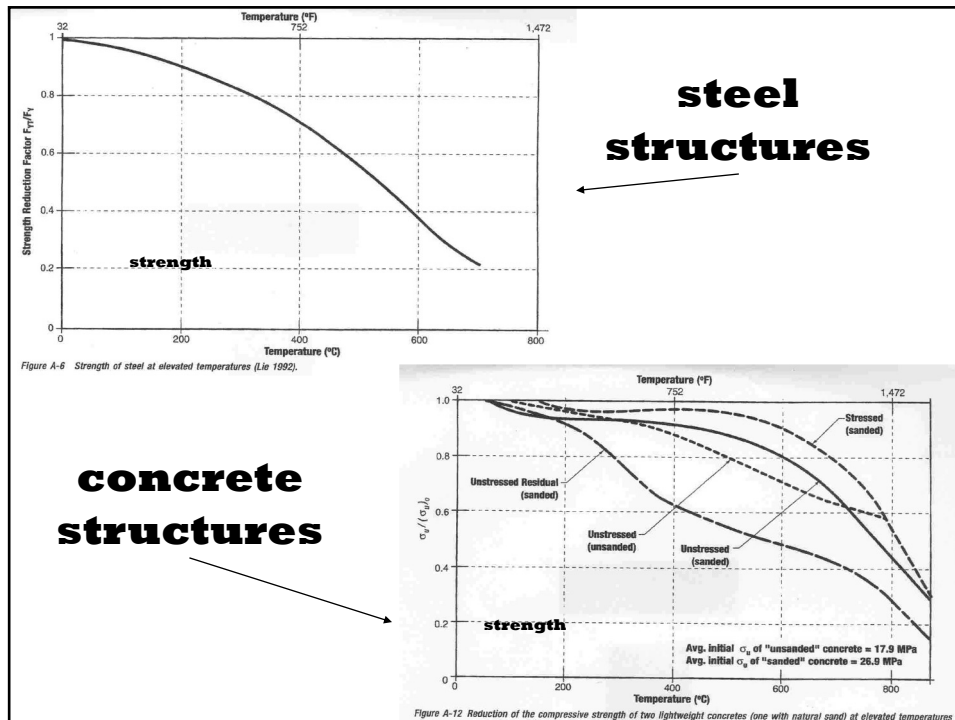
HSC water-cement ratio 0.22 to 0.57, 51 to 93 MPa.

- 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.**

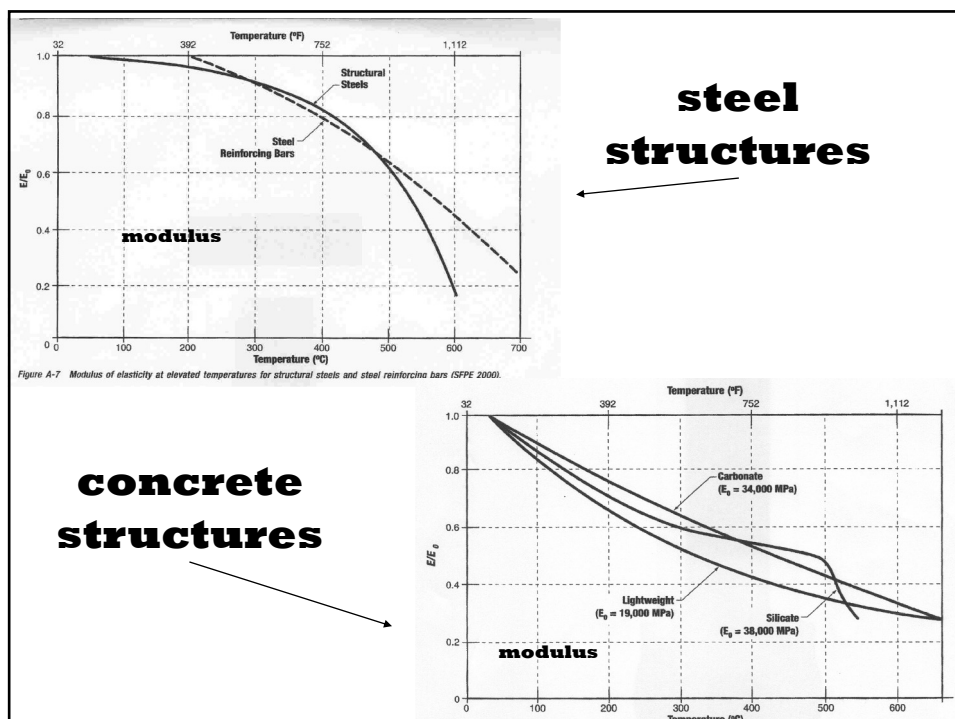


Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•12

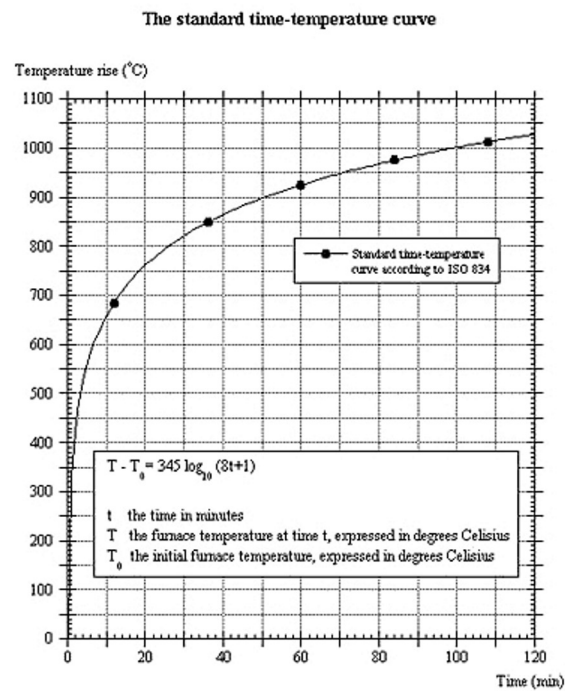


•13



•14

Crescimento da Temperatura ASTM E 119



•15

Distribuição da temperatura nos perfis metálicos

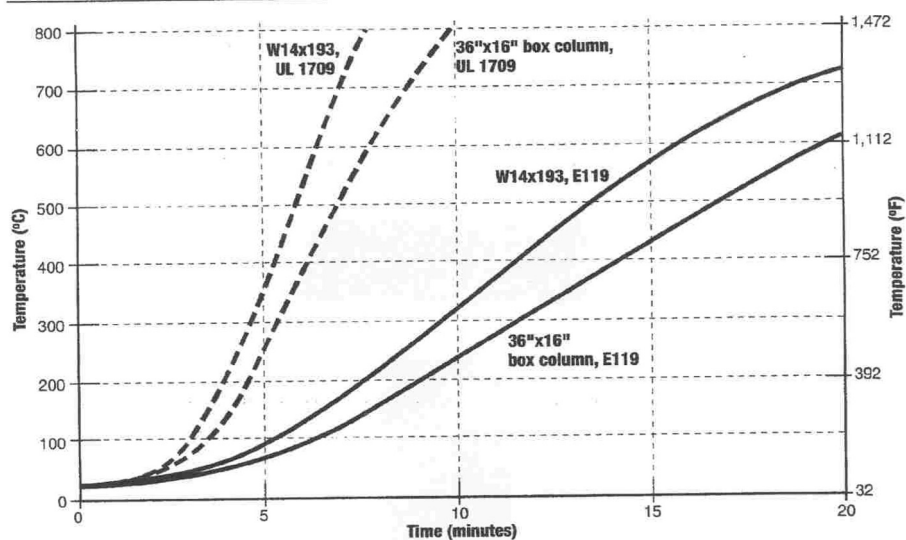
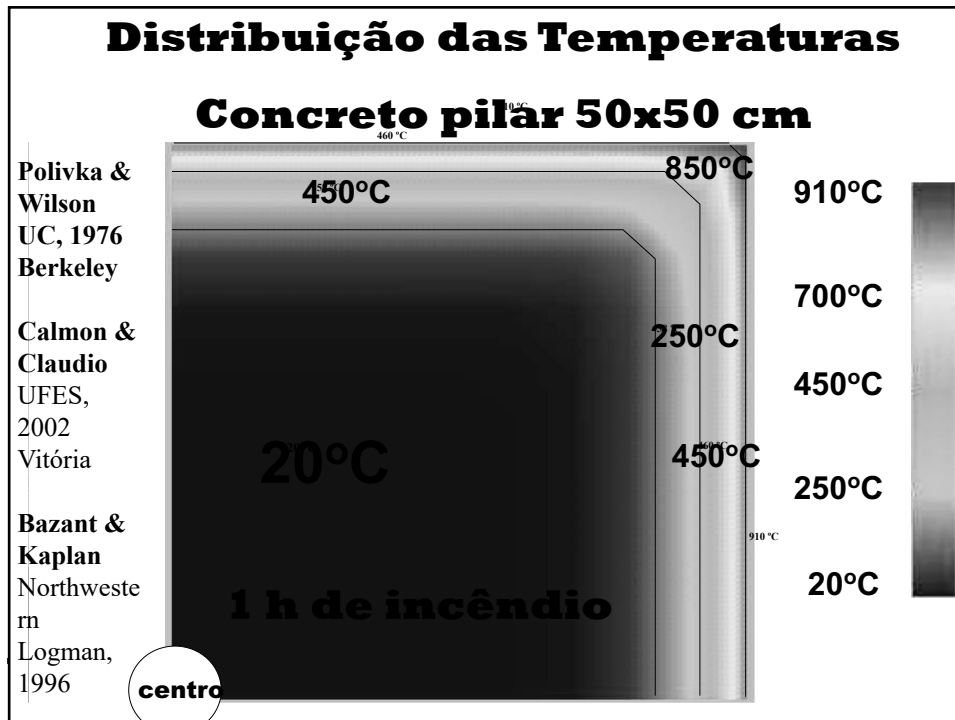
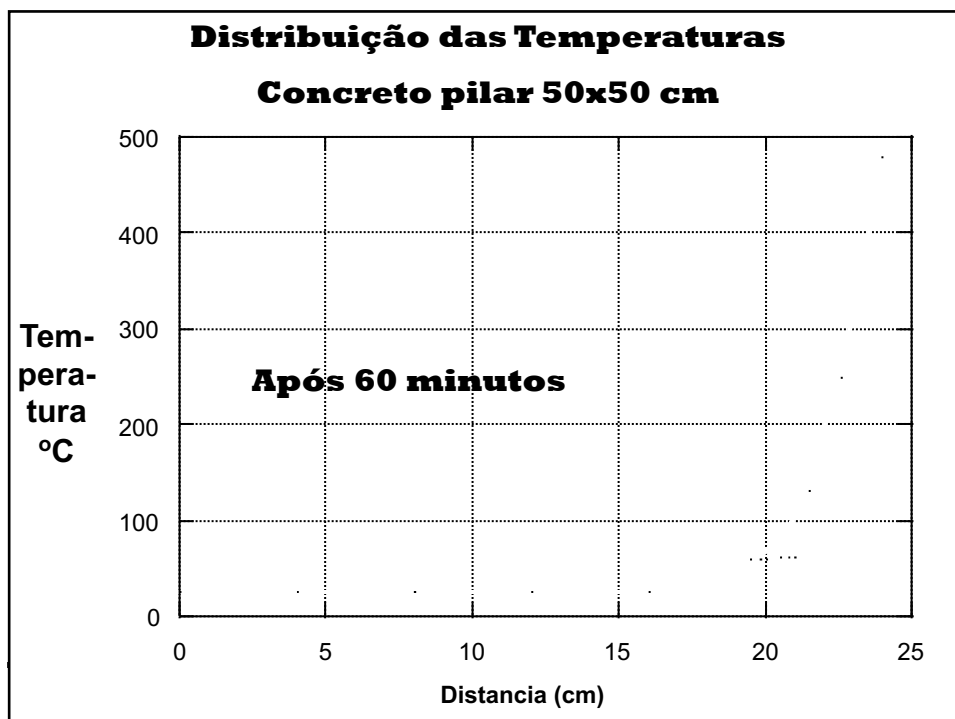


Figure A-9 Steel temperature rise due to fire exposure for unprotected steel column.

•16



•17



•18

Módulo de elasticidade



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•19

Módulo de Elasticidade

Natureza do Agregado Graúdo
Basalto (1,2), granito (1,0), arenito (0,7)

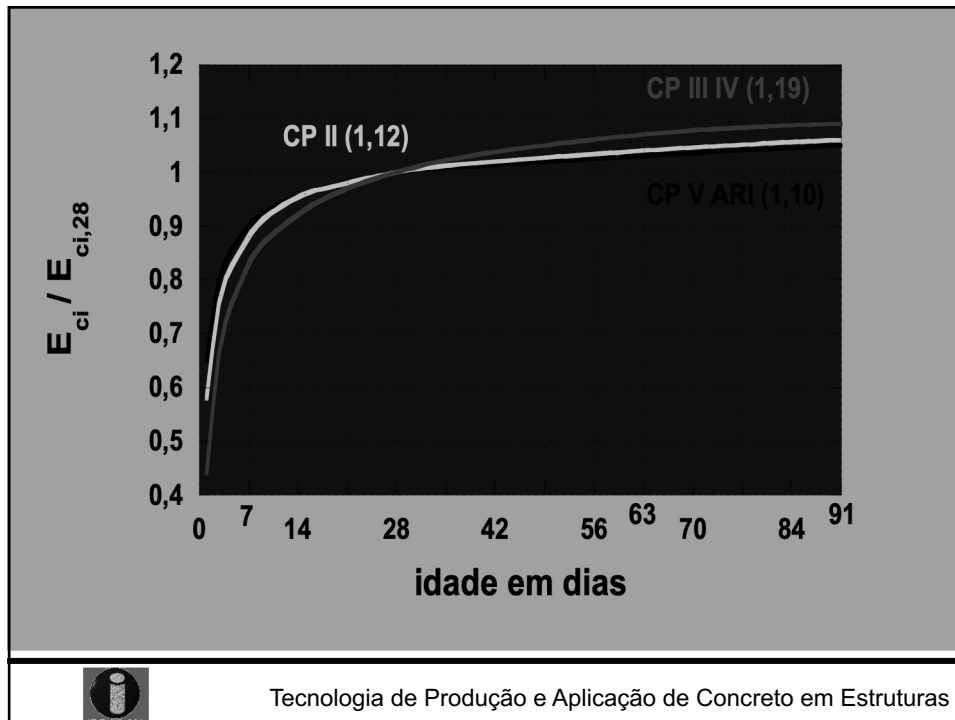
Consumo de Agregado Graúdo
Fluído (0,85) a Terra Seca (1,15)

a/c, TZ, fc,

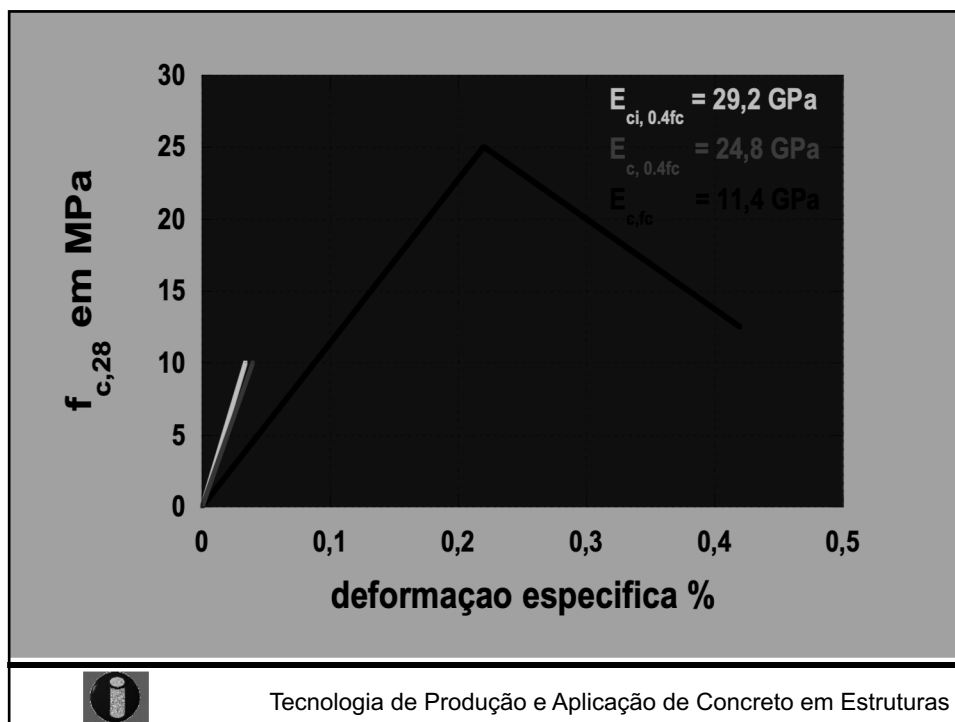


Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

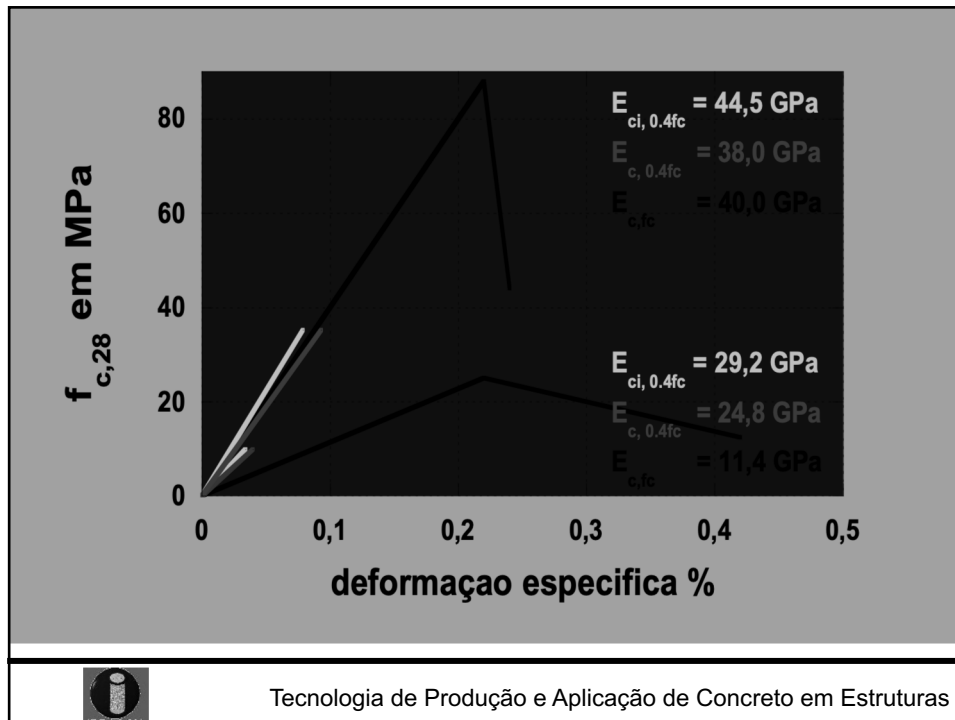
•20



•21



•22



•23

Relaxação

Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•24

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

$k_{1,t}$ = 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)



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•25

Crescimento da Resistência

CEB-FIP Model Code 1990

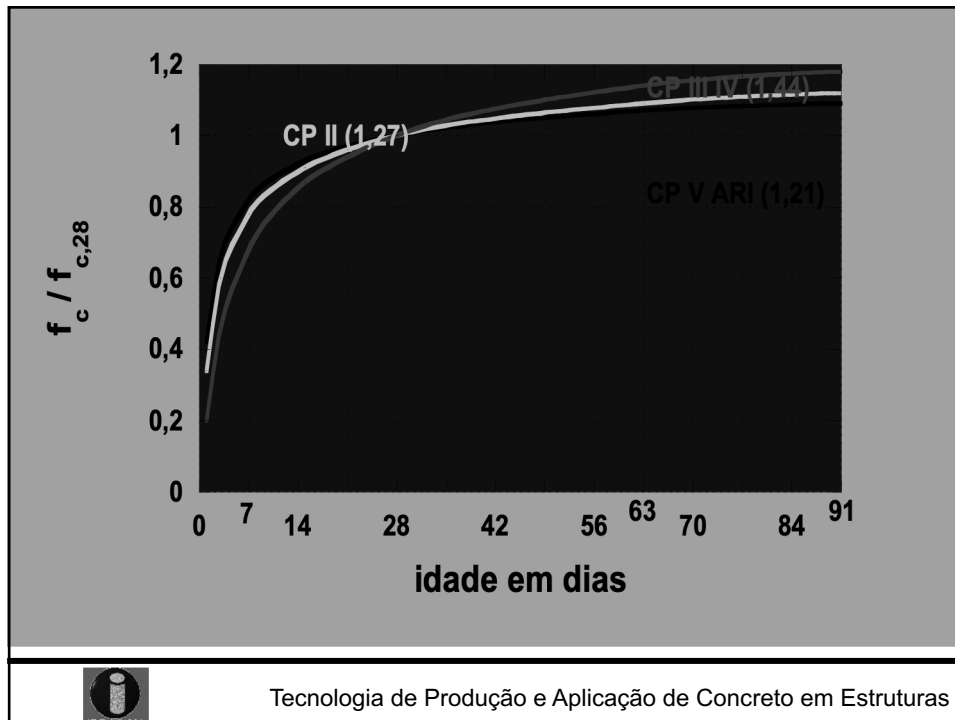
$$\frac{f_{cm,t}}{f_{cm,28}} = e^{s \cdot (1 - \sqrt{28/t})}$$

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

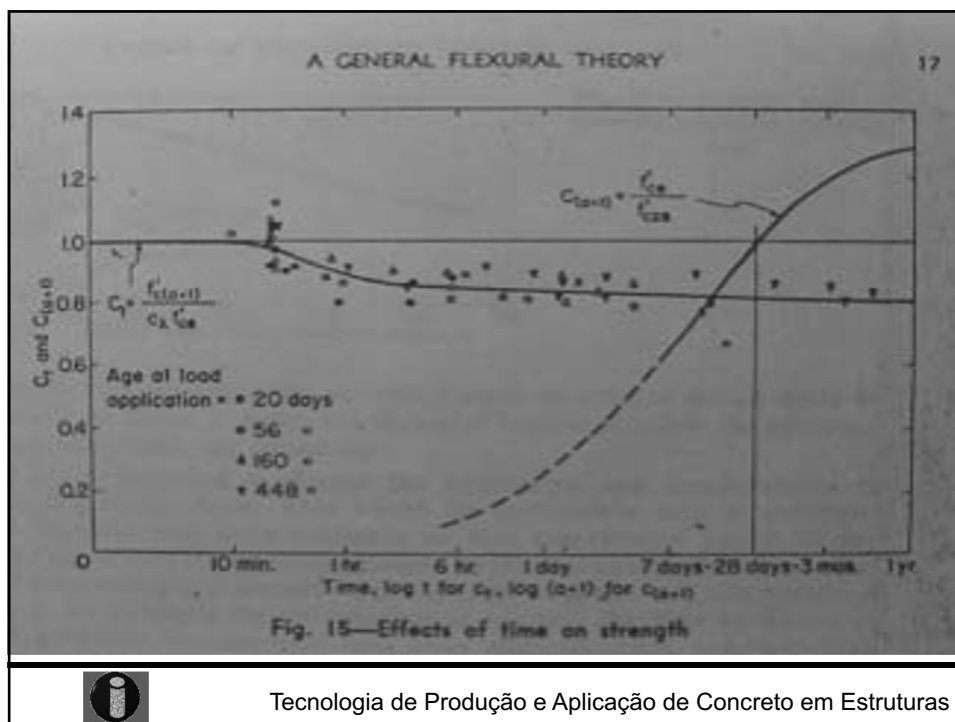


Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•26



•27



•28

f_{ck} 20 MPa

f_{cd} 14 MPa

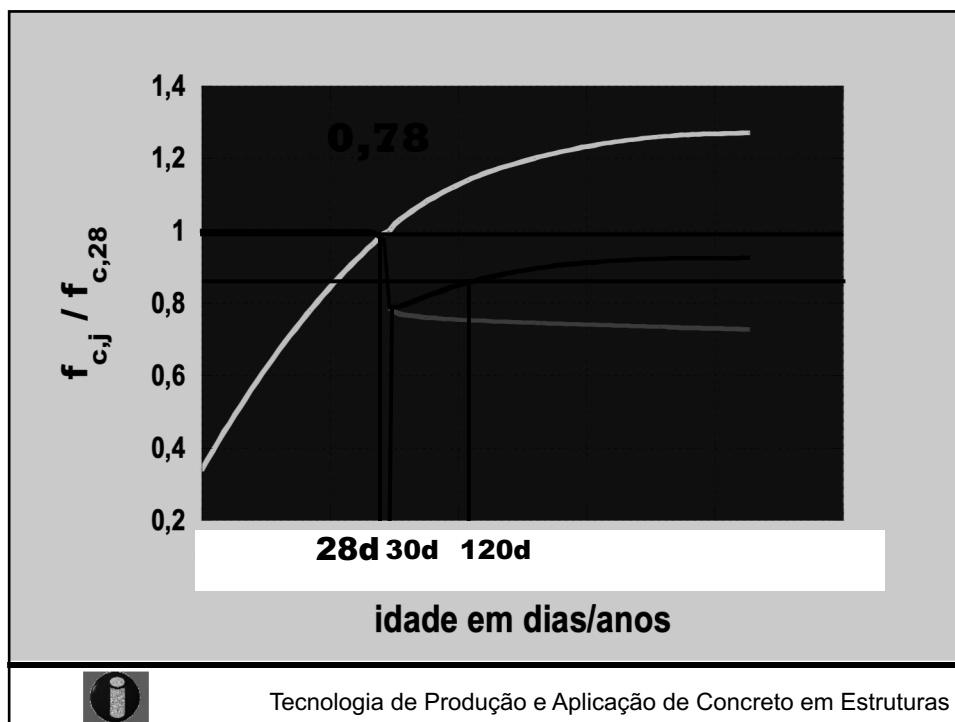
$0,85 \cdot f_{cd}$ 12 MPa

$k_1 = (1,21) = 16,9$ MPa

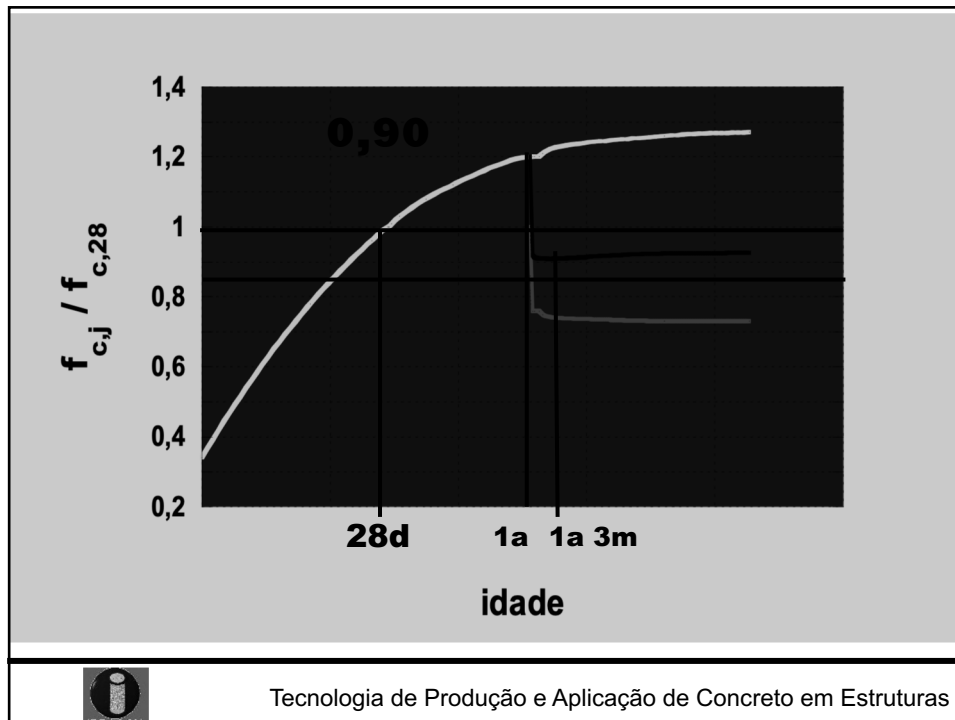
$k_2 = (0,70) = 9,8$ MPa

$k_{Rüsch} = (1,21 \cdot 0,70) = 12$ MPa

•29



•30



•31

“Duráveis”

- **introdução da durabilidade no projeto estrutural**
- **complexidade**
- **experiência**
- **acelerado**
- **determinista**
- **estocástico**

•32

Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto

- 1. Envelhecimento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Classificar Meio Ambiente**
- 4. Classificar os Concretos**
- 5. Critérios de Projeto**
- 6. *Proporcionamento dos Materiais***
- 7. *Procedimentos de Execução***
- 8. *Manutenção Preventiva***



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•33



ENVELHECIMENTO

- **Carbonatação**
- **Cloretos**
- **Fuligem**
- **Fungos**
- **Lixiviação**
- **Retração**
- **Sulfatos**
- **<< pH**
- **Corrosão**
- **Fissuração**
- **Destacamento**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•34



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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•35



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•36



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•37



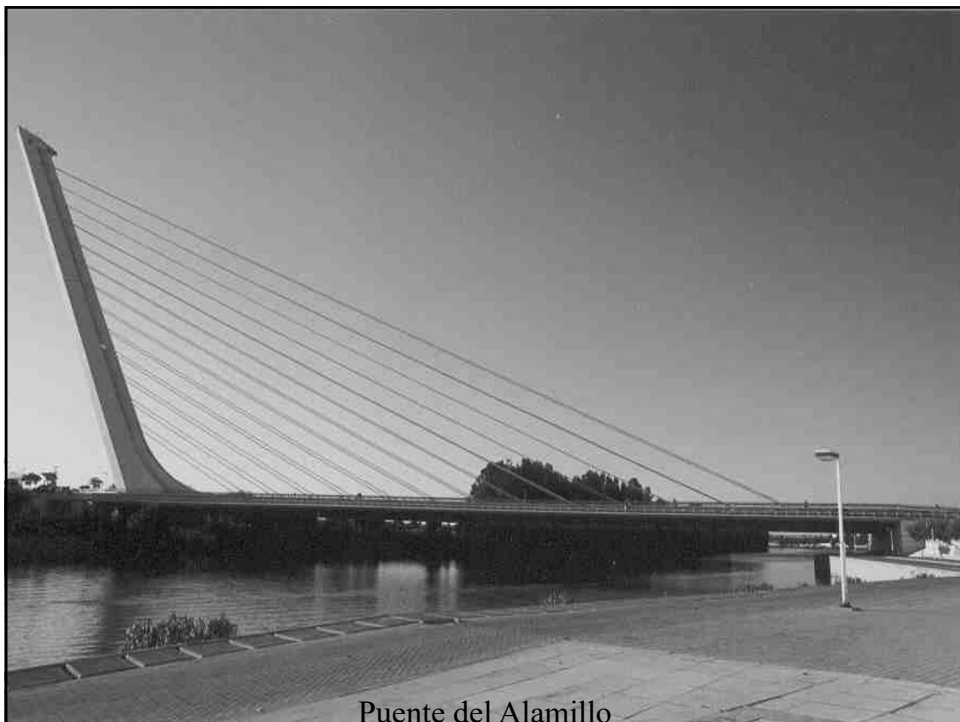
Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•38



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•39



Puentes del Alamillo

•40



•41



•42



ENVELHECIMENTO

- **Eflorescência**
- **Reação álcali-agregado**
- **Fissuração**
- **Cíclicos**
- **Ações físicas**
- **estéticas**
- **fissuração**
- **destacamento**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•43



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•44



•45



•46



•47

VIDA ÚTIL

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•48

**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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•49

**Introdução da Durabilidade no Projeto
das Estruturas de Concreto**

- 1. Envelhecimento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Classificar Meio Ambiente**
- 4. Classificar os Concretos**
- 5. Critérios de Projeto**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•50

vida útil

**classificação da
agressividade**

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 ¹⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ²⁾ de molhagem e secagem	Seco ³⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ⁴⁾ de molhagem e secagem
Rural	I	II	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	II	III
Industrial	II	III	II	III
Especial ⁵⁾	II	III ou IV	III	III ou IV
respingos de maré	II	III	II	IV
submersa ≥ 3m	II	III	II	I
Solo	II	III	não agressivo I	úmido e agressivo II, III ou IV

•51

vida útil

**classificação da
agressividade**

CETESB L1.007.

***Determinação do grau de agressividade
de meio aquoso aos concretos.***

•52

Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto

1. Envelhecimento

2. Vida Útil

3. Classificar Meio Ambiente

4. Classificar os Concretos

5. Critérios de Projeto



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•53

•Resistência contra corrosão

		•A / C	•carbonatação	•cloretos
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

•54

•Resistência contra meios agressivos

		•C ₃ A	•expansão	•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

•55

Correspondencia entre agressividade do ambiente e durabilidade do concreto

Classe de agressividade	Classe recomendável de concreto
I fraca	efêmero, normal resistente e durável
II média	normal, resistente e durável
III forte	resistente e durável
IV muito forte	durável



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•56

Resistência do concreto aos diferentes meios agressivos

- tipo e consumo de cimento
- tipo e consumo de adições
- relação água / cimento
- natureza e $D_{\max}$ do agregado

•57

	a/c	f_c	C	CO ₂	Cl ⁻
CP IV	0,6	28	320	15	2200
CP V	0,6	35	320	8	2100

	f_c	a/c	C	CO ₂	Cl ⁻
CP IV	35	0,5	390	10	1600
CP V	35	0,6	320	8	2100

•58

durabilidade da estrutura de concreto
regra dos 4C

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

•59

Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto

- 1. Envelhecimento**
- 2. Vida Útil**
- 3. Classificar Meio Ambiente**
- 4. Classificar os Concretos**
- 5. Critérios de Projeto**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•60

Critérios de Projeto

Experiência

- **Ensaaios acelerados**
- **Conceito determinísta**
- **Conceito probabilista**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•61

Primeiras Normas sobre Estruturas de Concreto

1903	Suiça
1903	Alemanha
1906	França
1907	Inglaterra

•62

**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).”

•63

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

**REGULAMENTO para
as CONSTRUÇÕES em CONCRETO ARMADO**

- ✓ **Água não conter cloreto, sulfatos e matéria orgânica**
- ✓ **Cobrimento $\geq 1\text{cm}$ p/lajes interiores e $\geq 1.5\text{cm}$ p/exterior**
- ✓ **Cobrimento $\geq 1.5\text{cm}$ p/pilares e vigas $\geq 2\text{ cm}$ p/exterior**

•64

ACI 318 / 2002

No solo $c > 76\text{mm}$

À intempérie

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

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

interiores

lajes/paredes

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

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

vigas/pilares

$c > 38\text{mm}$

•65

vida útil • qualidade do concreto

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

NOTAS

1 CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado

2 CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

•66

vida útil

• **cobrimento**

c_{nom} mm	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 11)			
		I	II	III	IV ⁽¹⁾
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 cordoelhas, 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 acabamento 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 ≥ 15 mm.

⁽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 ≥ 45 mm.

•67

Critérios de Projeto



Experiência

- **Ensaaios acelerados**
- **Conceito determinísta**
- **Conceito probabilista**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•68

ASTM E 632, USA 1988

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

-  Ensaios exploratorios
-  Ensaios acelerados e de envelhecimento natural
-  Envelhecimento acelerado corresponde ao natural
-  Modelos matemáticos
-  Critérios de desempenho
-  Estimar a vida útil em condições de operação

•69

Critérios de Projeto



Experiência

- **Ensaios acelerados**
- **Conceito determinísta**
- **Conceito probabilista**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•70

Carbonatação

$$t = \frac{e_{\text{co2}}^2}{k_{\text{co2}}^2} \quad (\text{ano})$$

➤ $e_{\text{co2}} \rightarrow 1 \text{ a } 5 \text{ cm}$

➤ $k_{\text{co2}} \rightarrow 0.1 \text{ a } 1.0 \text{ cm/ano}^{1/2}$

•71

Carbonatação

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

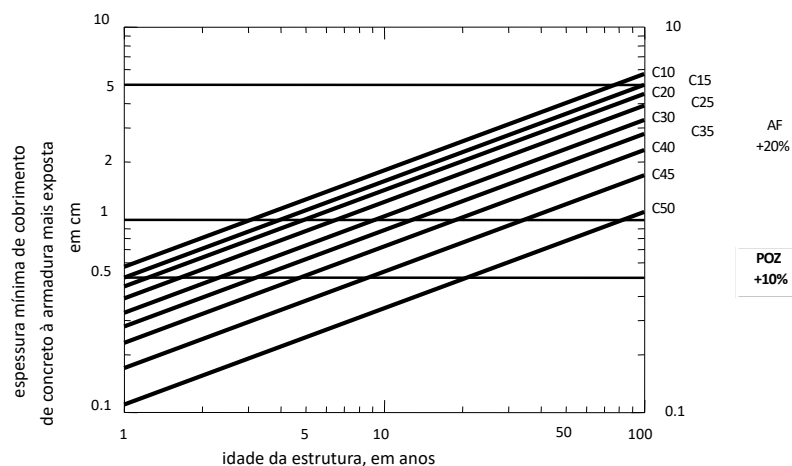
$f_{\text{ck}} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 8 \text{ anos}$

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

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

•72

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



•73

Cloretos - difusão

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

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

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

•74

Cloretos - difusão

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

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

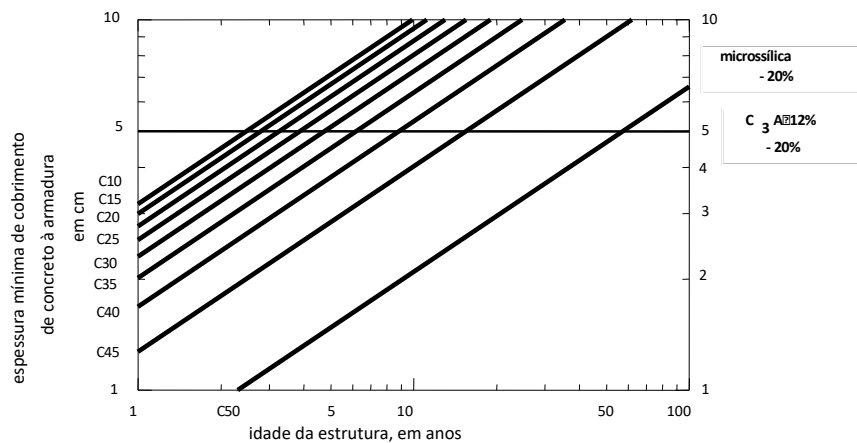
$$f_{ck} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 150 \text{ anos}$$

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

•75

referência

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



•76

Critérios de Projeto

Experiência

- **Ensaaios acelerados**
- **Conceito determinísta**
- **Conceito probabilista**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•77

Métodos Estocásticos

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•78

Métodos Estocásticos

probabilidade de falha:

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•79

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%?

$$\beta = 1,28$$

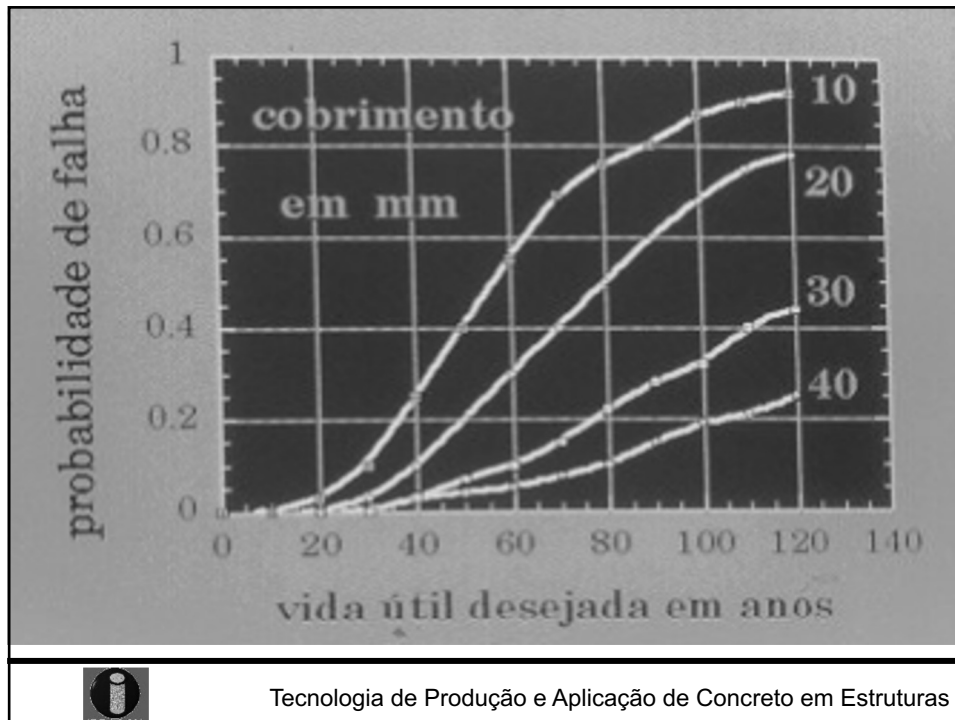
$$p/ 15 \text{ MPa} \rightarrow c = 55 \text{ mm}$$

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•80



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•81

- critérios**
- medidas especiais
 - revestimentos
 - galvanização
 - aço inox
 - inibidores.....

•82

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

Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•83