

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

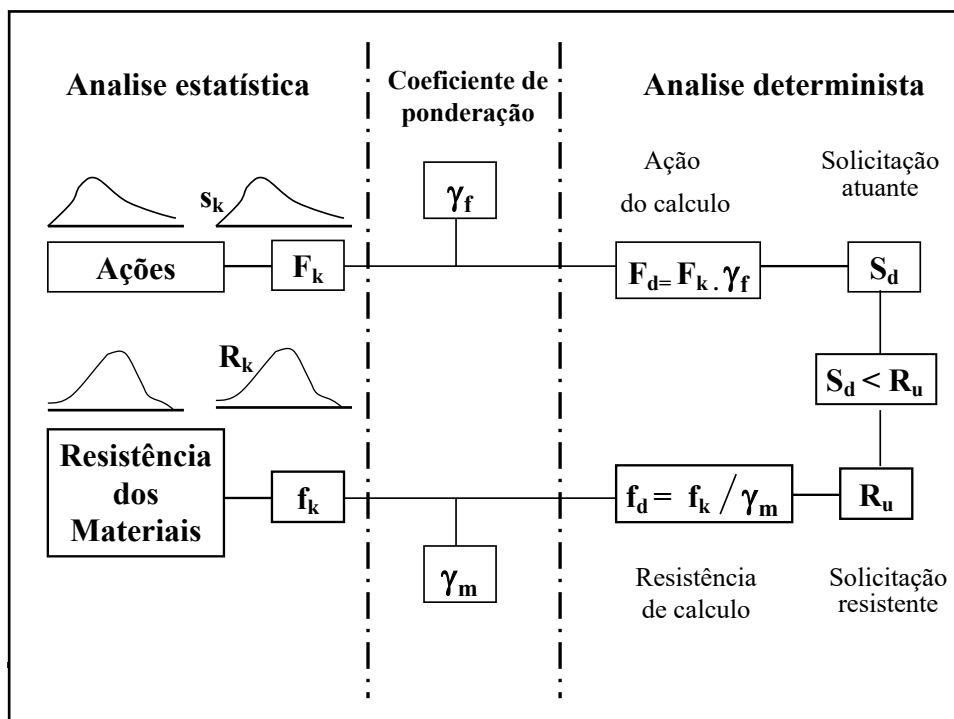
•2

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

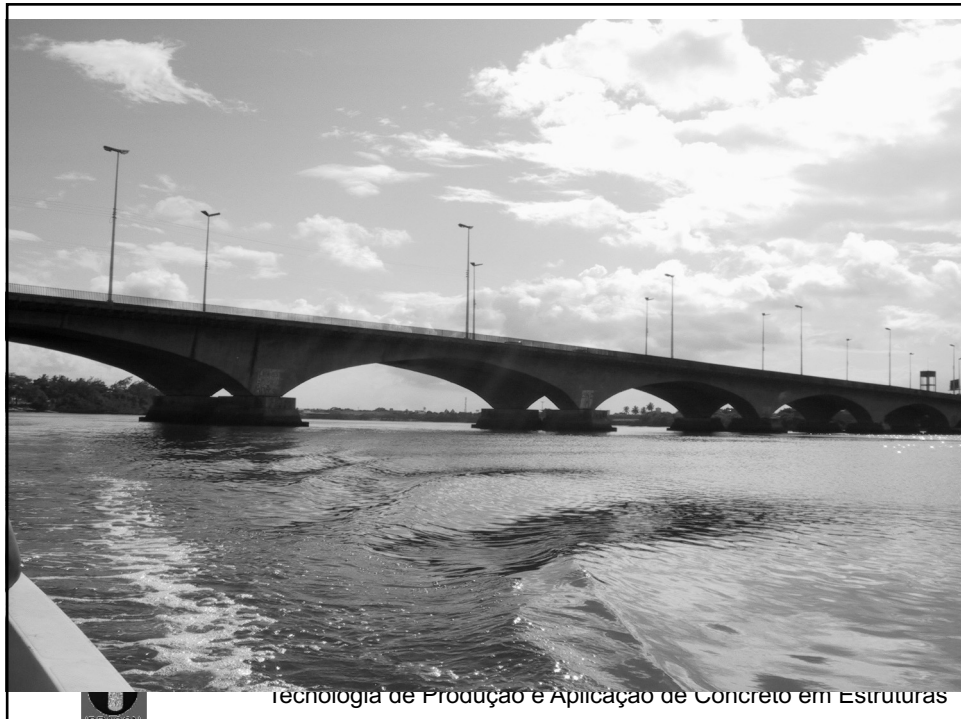
•9

 **ENVELHECIMENTO**

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

 Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•10



tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•11



•12



•13



•14

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

•15

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

•16

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

•17

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

•18

vida útil

classificação da
agressividade

CETESB L1.007.

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

•19

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

•20

•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

•21

•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

•22

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

•23

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

•24

	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

•25

durabilidade da estrutura de concreto
regra dos 4C

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

•26

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

•27

Critérios de Projeto



Experiência

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•28

Primeiras Normas sobre Estruturas de Concreto

1903	Suiça
1903	Alemanha
1906	França
1907	Inglaterra

•29

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).”

•30

**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**

•31

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

$c > 38\text{mm}$

•32

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	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS
 1 CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado
 2 CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

•33

vida útil • cobrimento

c _{nom} mm	Componente ou elemento	Classes 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 $\geq 15\text{mm}$.

⁽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 $\geq 45\text{mm}$.

•34

Critérios de Projeto

Experiência

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•35

ASTM E 632, USA 1988

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

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

•36

Critérios de Projeto

Experiência

- **Ensaaios acelerados**
- **Conceito determinista**
- **Conceito probabilista**



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•37

Carbonatação

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

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

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

•38

Carbonatação

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

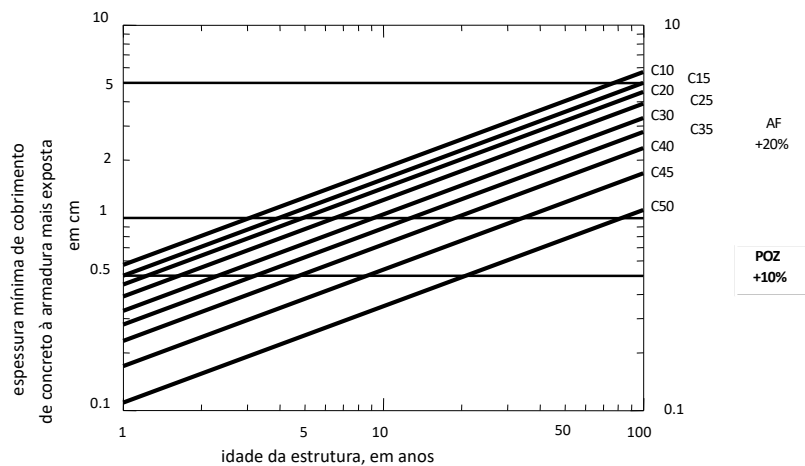
$$f_{ck} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 8 \text{ anos}$$

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

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

•39

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



•40

Cloretos - difusão

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

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

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

•41

Cloretos - difusão

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

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

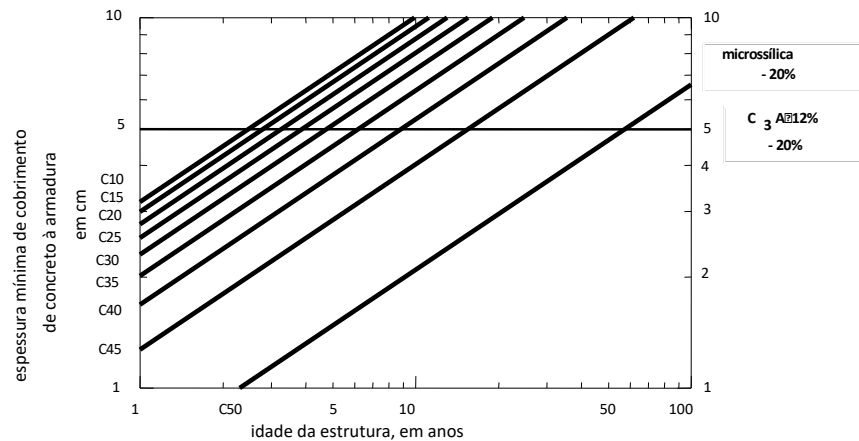
$$f_{ck} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 150 \text{ anos}$$

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

•42

referência

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



•43

Critérios de Projeto



Experiência

- Ensaaios acelerados
- Conceito determinista
- Conceito probabilista



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•44

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

•45

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

•46

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%?

$$\beta = 1,28$$

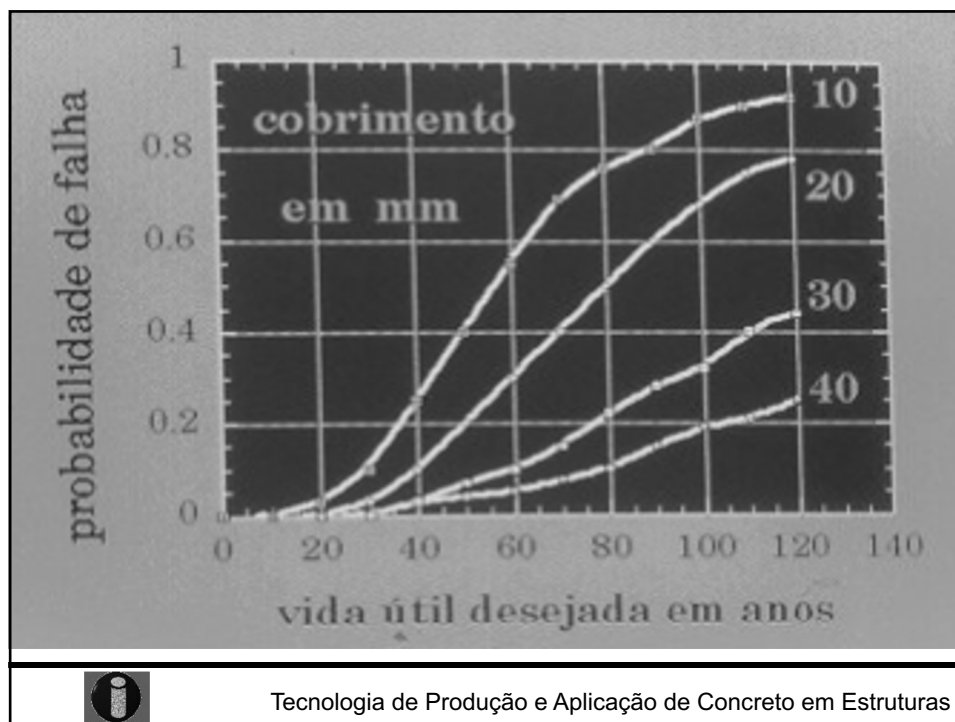
$$p/ 15 \text{ MPa} \rightarrow c = 55 \text{ mm}$$

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



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•47



Tecnologia de Produção e Aplicação de Concreto em Estruturas

•48

critérios • medidas especiais

- revestimentos
- galvanização
- aço inox
- inibidores.....

•49

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

•50