

**Reunião Regional do IBRACON
Concreto: Avanços Tecnológicos**

Vida Útil, uma Visão Histórica

IBRACON

Paulo Helene

Universidade Católica de Salvador

Salvador, 17 Junho 2005

1

**Construir com
Materiais
Resistentes e
Duráveis**

2

**O CONCEITO
DE CONSTRUIR
COM
DURABILIDADE
EXISTE NAS
OBRAS DESDE
A
ANTIGUIDADE**

**Pártenon, 440 aC
“século de Péricles”**



Arquitetos Ictinos de Mileto

e Calícrates (*escultor Fídias*)



3

**QUANDO APARECE O
CONCRETO
POR PRIMEIRA VEZ ?**

4

Panteão
de
Roma



5

Domo do Panteão → Século II dC
Diâmetro de 47m



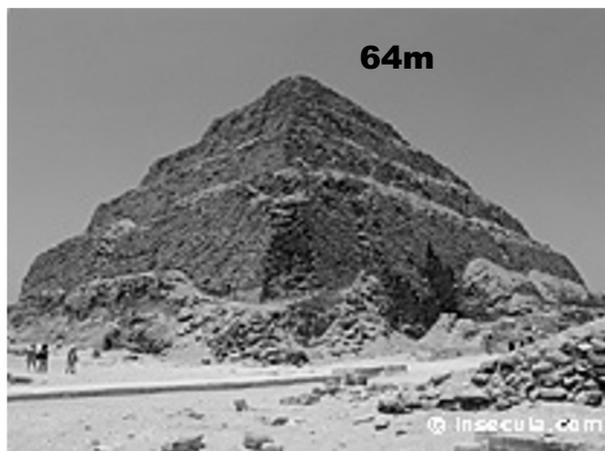
7

**QUANDO FOI
RECONHECIDA A
PROFISSÃO DE
ARQUITETO e
ENGENHEIRO CIVIL POR
PRIMEIRA VEZ ?**

8

Arquiteto y médico Imhotep

2790 A C



Pirâmide escalonada de Djeser

9

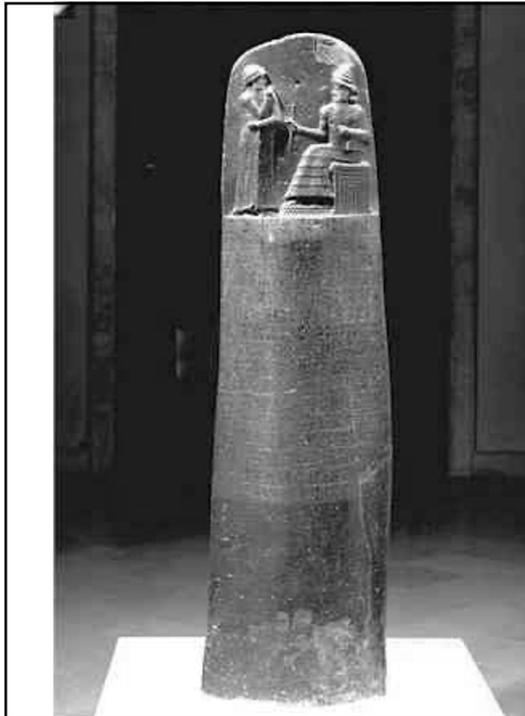


10

**A CONSTRUÇÃO
CIVIL CONSTA NO
PRIMEIRO CÓDIGO
CIVIL da
HUMANIDADE**

“Durabilidade!”

11



Código de Leis de Hammurabi (1780 a.C.)

Rei da Babilonia

Uma copia foi gravada num bloco de rocha diorito negro com 2,4m de altura contendo 282 artigos

12

Código de Leis de Hammurabi

Artigos 229 a 233 → obras

229. Quando uma casa ou parte dela colapsa e mata o proprietário, o construtor deve ser morto;

230. Quando uma casa ou parte dela colapsa e mata o filho do proprietário, o filho do construtor deve ser morto;

231....

232.....

233....

13

Century

IV → Byzantine style → Church Santa Sophia, Istanbul

IX → Romanic style → Abbey Cluny, France

XII-XIV → Gothic style → Cathedral Notre Dame, Cologne

XV → Renaissance style

XVII → Baroque style → San Pietro, Bernini

XVII → Neoclassic style → Triumph Arc , Paris

XIX → Steel constructions

14

Catedral de Notre Dame

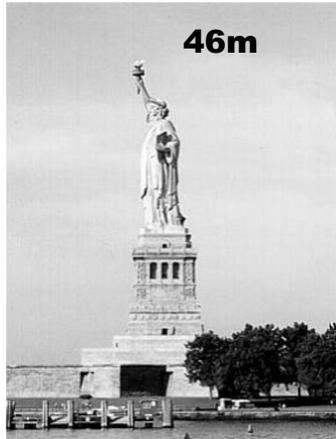


1163-1330

A abóbada da nave central → 35 m de altura

15

“Gustave Eiffel”
1884 → Estátua da Liberdade
1889 → Torre Eiffel



(5a+2a)
60t
pintura



2204 → 6.230.050 visitantes

16

SÉCULO XX
1900

APARECE UM
NOVO MATERIAL

Concreto Armado
Cimento Armado

17



Palacio Salvo
Montevideo

27 pisos

Uruguay 1928

Altura 103 m

$f_{ck} = ?$

record mundial

18



1929

**Edifício
Martinelli**

São Paulo

1929

30 andares

Altura 109m

**Rua Líbero
Badaró**

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



2005

19

Naquela época acreditava-se que...

**OS PROBLEMAS DE CORROSÃO E
DURABILIDADE TINHAM SIDO
RESOLVIDOS DEFINITIVAMENTE
POIS O AÇO ESTARIA PROTEGIDO
“ETERNAMENTE”
PELO CONCRETO**

20



Lina Bo Bardi

MASP Museu de Arte São Paulo 1968

21



22

**“Como podem
ser mais
duráveis?”**

23

Durabilidade das Estruturas de Concreto

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

24

ENVELHECIMENTO

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

25

diretrizes

**mecanismos de
envelhecimento**

Relativos ao concreto:

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

Relativos à armadura:

- **carbonatação**
- **cloretos**

26

Durabilidade das Estruturas de Concreto

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

27

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

28

BS 7543, 1992 Guide to

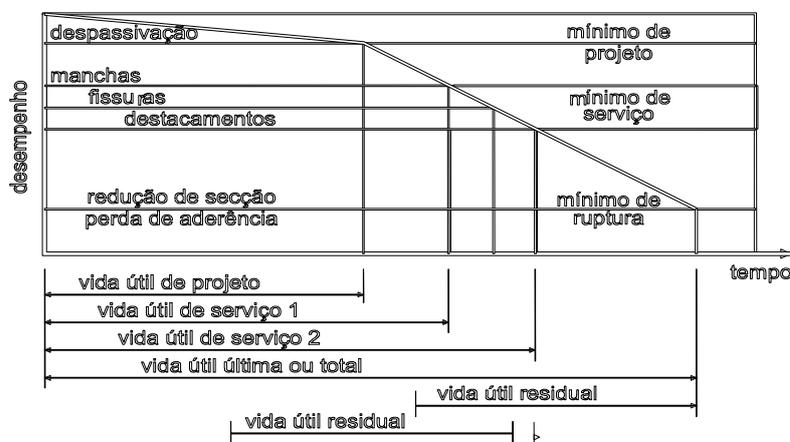
**Durability of Buildings and Building Elements,
Products and Components**

| 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 |

29

comentários

Vida Útil



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

30

Durabilidade das Estruturas de Concreto

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

31

DETERIORAÇÃO e ENVELHECIMENTO das ESTRUTURAS de CONCRETO

➤ **do CONCRETO**

➤ **da ARMADURA**

32

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 |

33

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 |

34

Durabilidade das Estruturas de Concreto

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

35

Classificação da Resistência dos Concretos ao Meio Ambiente

- efêmeros $0,65 > a/c > 0,60$
- normais $0,60 > a/c > 0,55$
- resistentes $0,55 > a/c > 0,50$
- duráveis $0,50 > a/c > 0,45$
- excepcionais $a/c < 0,40$

36

Correspondência 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 |

37

Durabilidade das Estruturas de Concreto

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

38

MODELOS de PREVISÃO de VIDA ÚTIL

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

39

durabilidade da estrutura de concreto regra dos 4C

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

40

critérios generalidades

- 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 cobrimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras;
- e) detalhar adequadamente as armaduras;
- f) controlar 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.

41

**Primeiras Normas sobre
Estruturas de Concreto**

| | |
|-------------|-------------------|
| 1903 | Suiça |
| 1903 | Alemanha |
| 1906 | França |
| 1907 | Inglaterra |

42

**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).”

43

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

$c > 38\text{mm}$

44

Associação 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

45

MODELOS de PREVISÃO de VIDA ÚTIL

- **Experiência**
- **Ensaaios Acelerados**
- **Mecanismos de Transporte**
- **Estocásticos**

46

ASTM E 632, USA 1988

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

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

47

MODELOS de PREVISÃO de VIDA ÚTIL

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

48

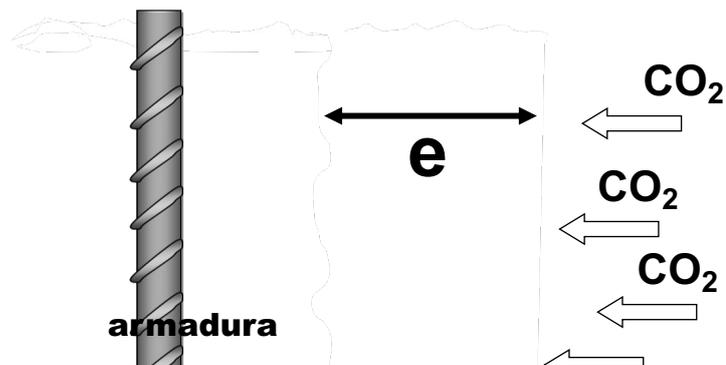
Ingresso de gases e fluidos

- **Permeabilidade**
- **Capilaridade**
- **Difusibilidade**
- **Migración**
- **Convección**

49

Carbonatação

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



50

Carbonatação

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

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

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

51

Carbonatação

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

-

$$e = 1,0 \text{ cm} \rightarrow t = 10 \text{ anos}$$

$$e = 2,5 \text{ cm} \rightarrow t = 60 \text{ anos}$$

$$e = 4,0 \text{ cm} \rightarrow t = 160 \text{ anos}$$

52

Carbonatação

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

-

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

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

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

53



**Torre
Nações
Unidas**

**São Paulo
1997**

179 m

f_{ck} = 50MPa

54

**250 anos
de garantia.**

Quem precisa de segurança, desempenho e controle de custos, quando for realizar o lançamento de concreto da Torre Nações Unidas em São Paulo, em altura de 179 m, com correspondente a 2.000 m³ de concreto, lançado em 25 horas consecutivas. Com a adição de 200 toneladas de grânulos para controlar a temperatura do concreto, volume equivalente a um Boeing 747 e 40 x 20m.

Quem precisa de controle de temperatura para o concreto de altura de lançamento, em altura de 179 metros, o mais alto de São Paulo, com 2.000 m³ de CAD, o controle de temperatura é fundamental para que haja uma boa concretagem por etapas e controle de temperatura em altura. É a única solução de CAD do Brasil, e não deverá apresentar qualquer tipo de problema pelo período de 250 anos, de construção, operação e manutenção por consultas e serviços especializados para o desenvolvimento e aplicação de projetos.

É a combinação do melhor concreto do mundo, o concreto brasileiro de desenvolvimento de concreto em altura, 179 metros.

O resultado é que, com o Concreto Engemix Nações Unidas é possível uma construção segura e econômica, com o melhor concreto para o mundo e com o melhor controle de temperatura e controle de temperatura em altura, graças à expertise e à competência de Engemix. Que garante o desempenho das propriedades dos agregados, a redução da fragilidade do concreto na construção, a redução da resistência e da durabilidade do concreto em altura.

Quem precisa de segurança em lançamento de concreto em altura, Chama a Engemix.

**CONCRETO
ENGEMIX**

55

Cloretos

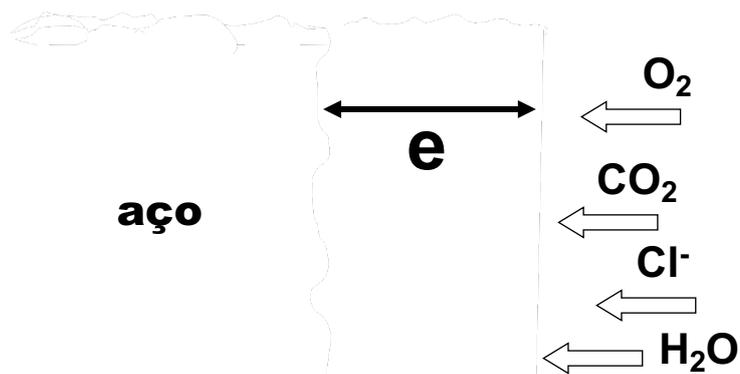
$$t = \frac{e_{Cl}^2 \cdot f_{ck}^2 \cdot A^{0,4}}{7,35^2 \cdot UR^{1,4} \cdot T^{0,2} \cdot Cl^{1,4}} = \frac{e_{Cl}^2}{k_{Cl}^2} \text{ (ano)}$$

$$k_{Cl} = \frac{7,35 \cdot UR^{0,7} \cdot T^{0,1} \cdot Cl^{0,7}}{f_{ck}^1 \cdot A^{0,2}} \text{ (cm/ano}^{1/2}\text{)}$$

56

Generalização

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



57

Cloretos - difusão

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

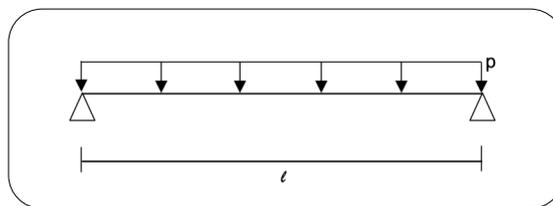
$$f_{ck} = 15 \text{ MPa} \rightarrow t = 4 \text{ anos}$$

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

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

58

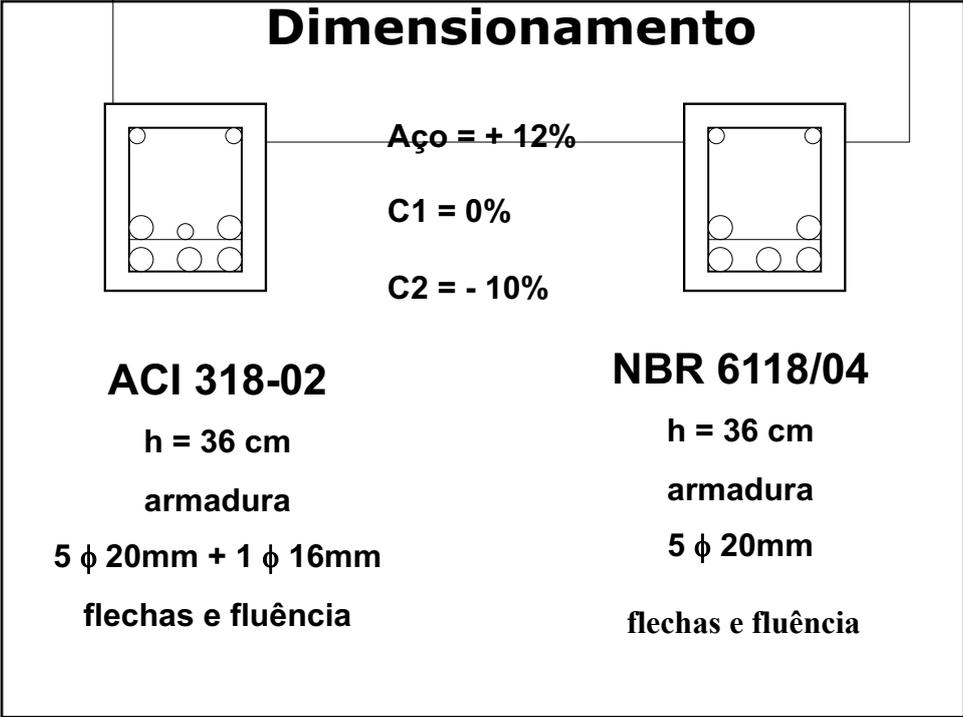
Exemplo



Zona de variação de maré

- Carga permanente: 5 kN/m (DL)
- Carga de projeto: 4,5 kN/m (LL)

59



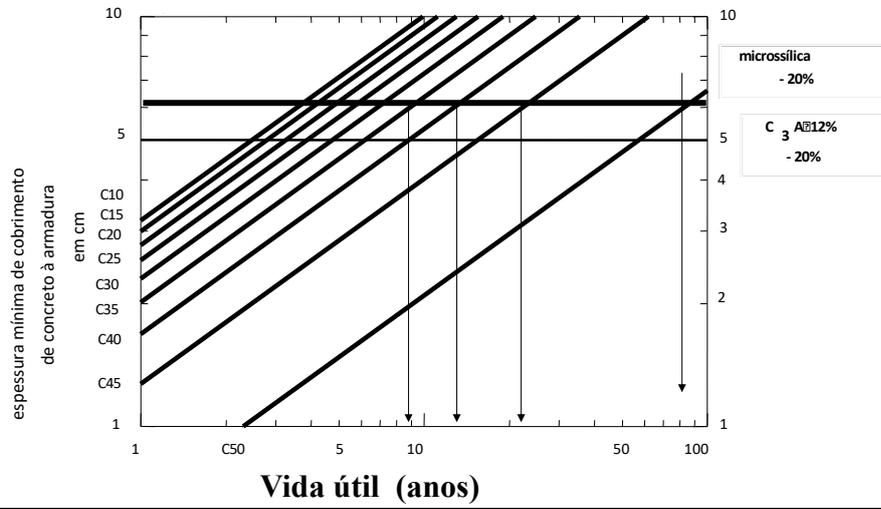
60



61

comentários

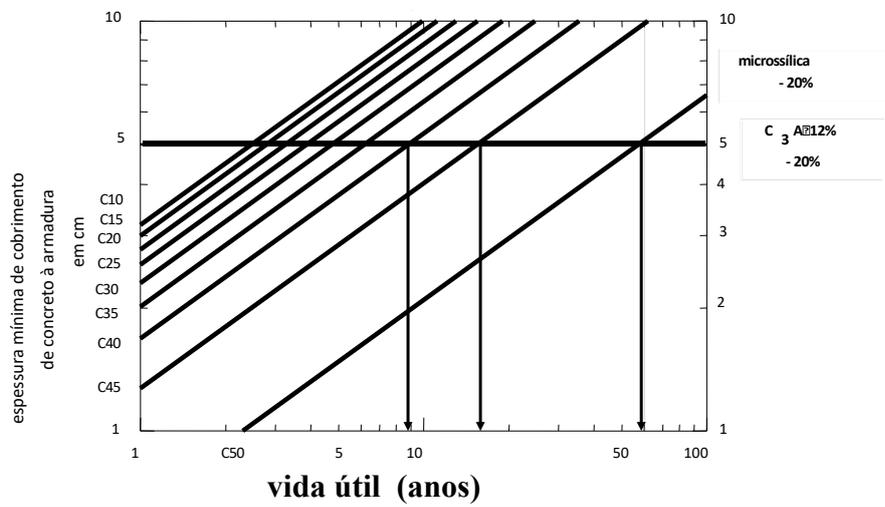
Difusão de cloretos



62

comentários

Zona de variação de maré



63

Previsão da Vida Útil

Modelos

- Empíricos ou indiretos
- Ensaio acelerados
- Deterministas
(*Transport Mechanism*)
- Estocásticos

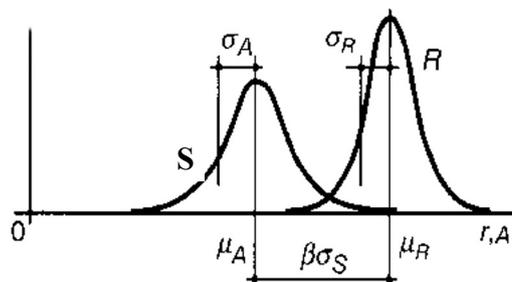
64

Vida Útil ~ Enfoque Estrutural

Confiabilidade:

$$P(S > R) < 10^{-6}$$

$$\beta = 3.8$$



65

R → Cobrimento

μ_{cc} ; σ_{cc}

S → Carbonatação

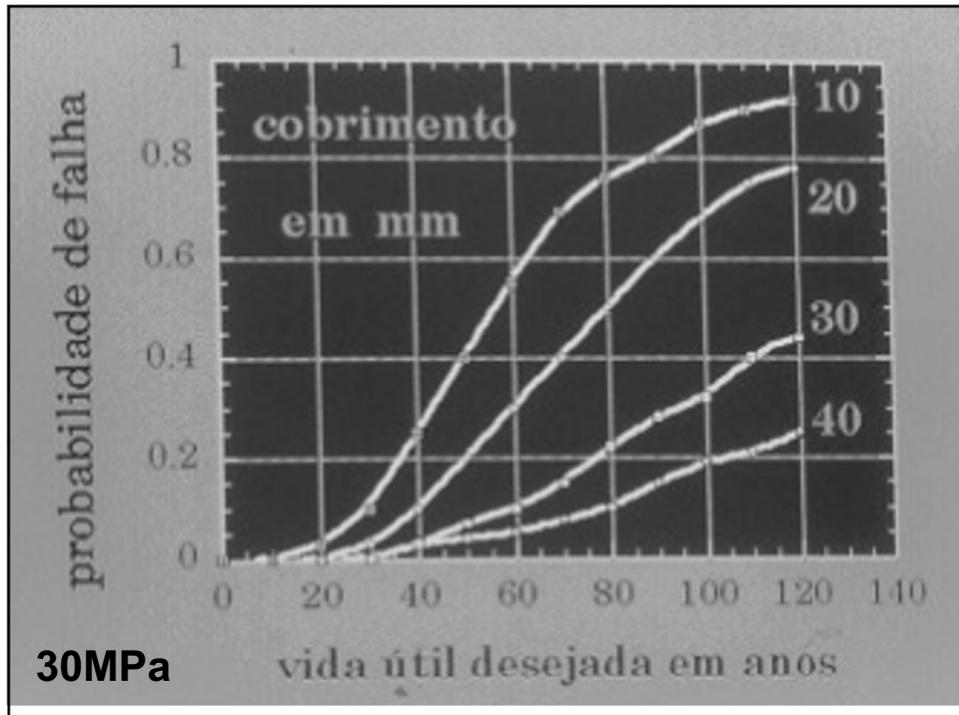
μ_{CO_2} ; σ_{CO_2}

66

Confiabilidade

$$\beta_t = \frac{\mu_{R,t} - \mu_{S,t}}{\sqrt{\sigma_{R,t}^2 + \sigma_{S,t}^2}}$$

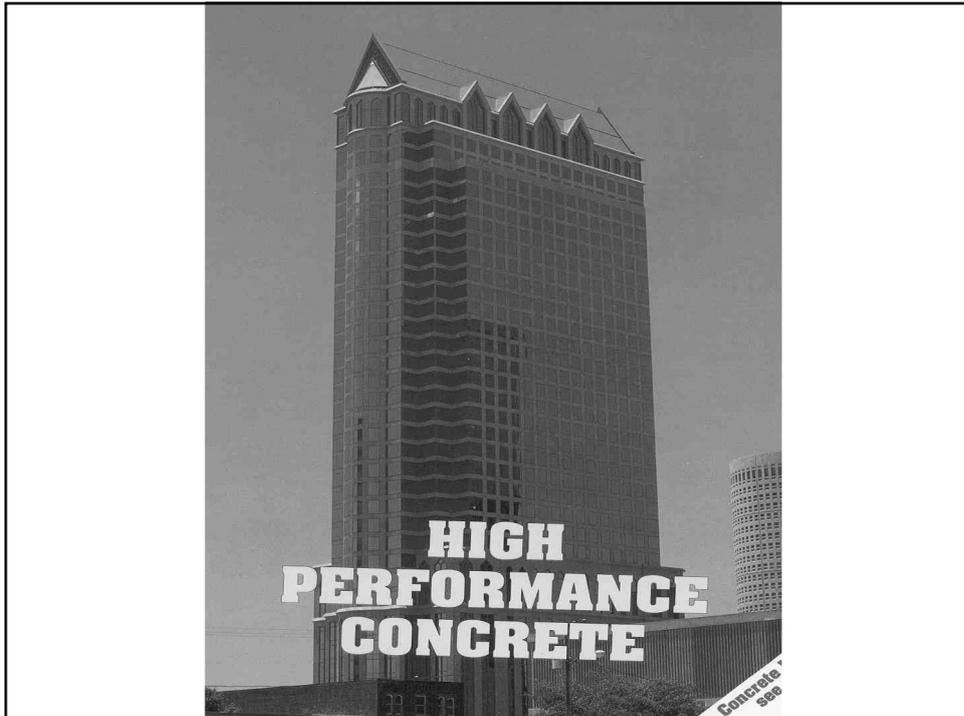
67



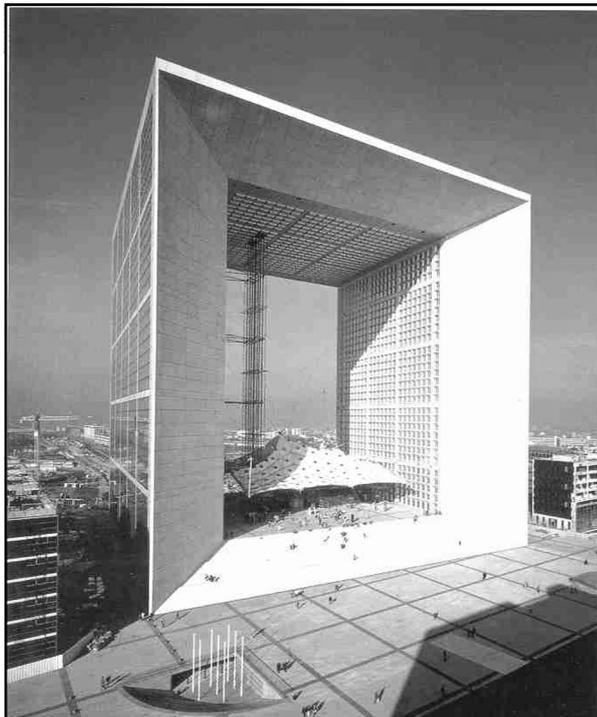
68

**“Como
aumentar a
durabilidade?”**

69



70



Grand Arch
La Defense
Paris

França 1990

$f_{ck} = 60 \text{ MPa}$

**“high-tech
style”**

71

Melhoria arquitetônica

Concreto aparente, grandes vãos

Bruno Contarini



Oscar Niemeyer

Superior Tribunal de Justiça

72



Petronas Towers

Kuala Lumpur

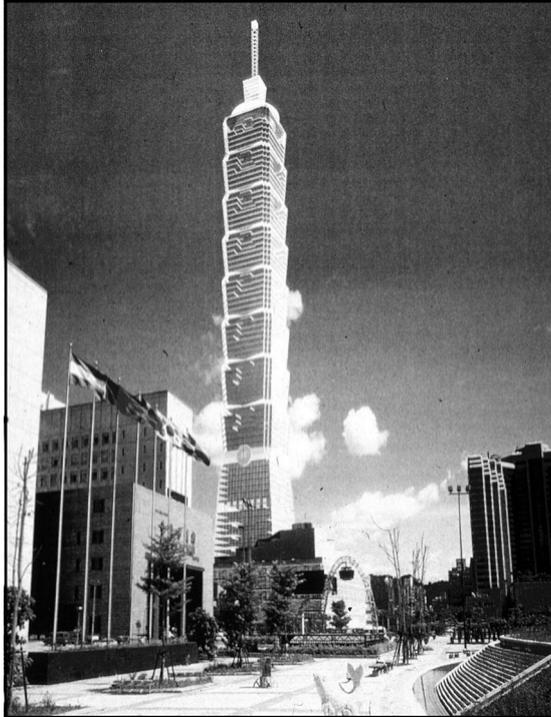
Malásia 1999

Altura 452 m

$f_{ck} = 80 \text{ MPa}$

record mundial

73



TAIPEI 101

Shanghai World Financial Center

Taiwan China

Altura 508m

$f_{ck} = 80 \text{ MPa}$

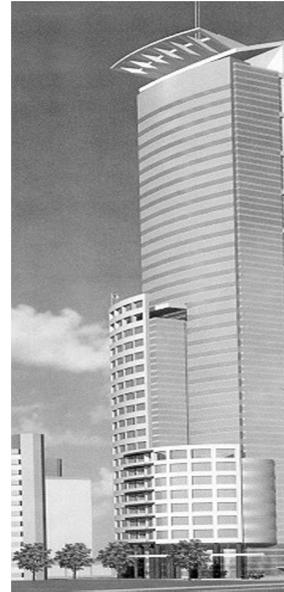
record mundial

74



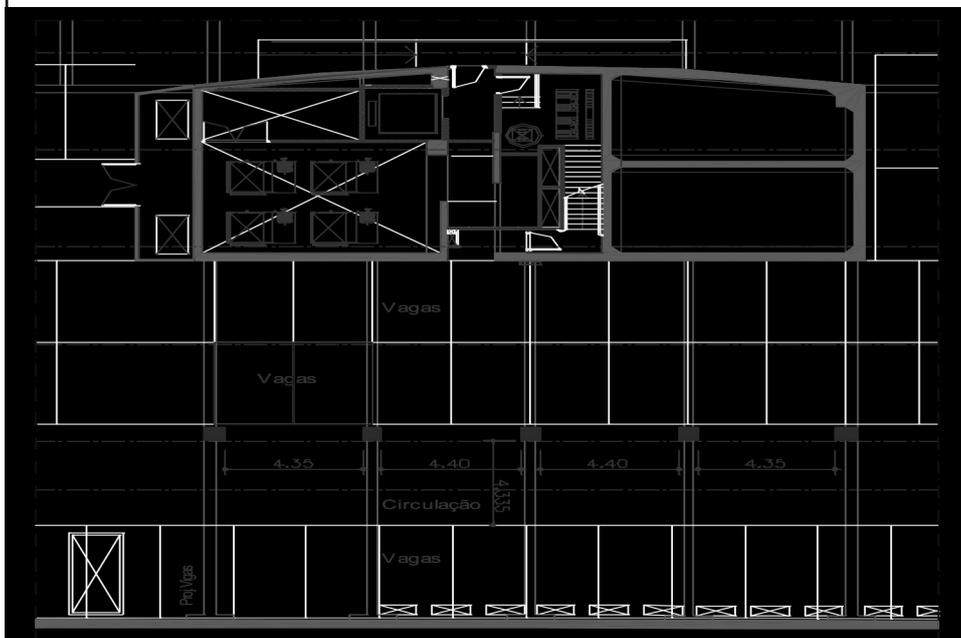
75

- ▼ Edifício e-Tower SP
- ▼ 42 pisos
- ▼ Heliporto
- ▼ Piscina semi-olímpica
- ▼ Academia de ginástica
- ▼ 2 restaurantes
- ▼ Concreto colorido
- ▼ f_{ck} pilares = 80 MPa

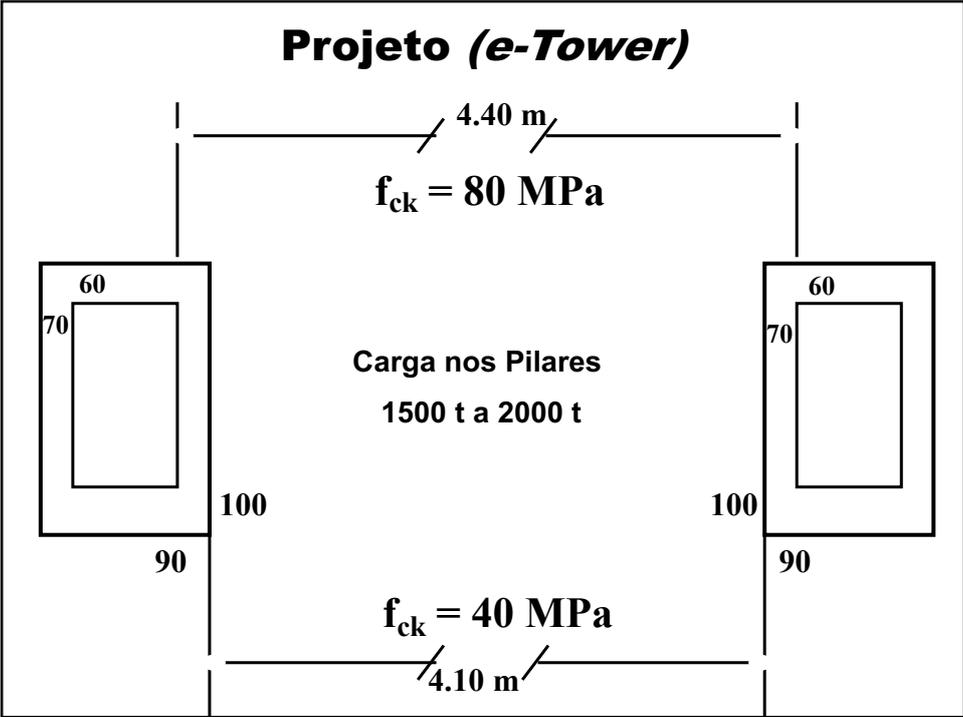


76

Projeto (e-Tower)



77



78



79



80

| Resistencia a Compresión | | | | | | | |
|---|---------------------|-----------------------------|-----------------|--------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Lote | Local | f_{ck} (MPa) | exemplar | Média | Desvio padrão | Coef. Variação | f_{ck} est |
| 1 | 4º SS | 80 | 4 | 142,6 | 7,0 | 5% | 133 |
| 2 | 3º SS | 80 | 4 | 127,0 | 5,0 | 4% | 122 |
| 3 | 2º SS | 80 | 4 | 124,6 | 7,5 | 6% | 119 |
| 4 | 1º SS | 80 | 4 | 126,6 | 5,5 | 5% | 120 |
| 5 | Térreo | 80 | 8 | 128,4 | 7,5 | 6% | 123 |
| 6 | 1º pavimento | 80 | 7 | 127,4 | 7,9 | 6% | 110 |
| 7 | 2º pavimento | 80 | 4 | 125,4 | 7,1 | 6% | 118 |
| Desvio padrão y coef. de variación media ponderado | | | | | 7,0 | 5,5 | 112 |

81

Claim ID: 22678
Membership Number: 22322

Thursday, May 16, 2002

Thank you for sending us the details of your recent record proposal for 'Best concrete resistance in a building'. After having examined the information you sent, and given full consideration to your proposal, I am afraid we do think that this item is a little too specialised for a body of reference as general as ours.

We receive many thousands of record claims every year and we think you will appreciate that we are bound to favour those which reflect the greatest interest.

Yours sincerely,

Scott Christie
Records Research Services
Guinness World Records

82

Dear Paulo,

I have appreciated to read your letter and description of your very high concrete strength achieved in the very beautiful high rise.

At this stage fib is not really focused on selecting and documenting "World Records" in concrete, concrete structures, height of buildings or free spans of bridges.

However, we have full confidence and trust in the documentation prepared and presented by you.

Therefore, I really would recommend you to write a well documented technical paper for the fib Magazine "Structural Concrete" that could be one very relevant place to publish this fascinating story.

Steen Rostam
fib (CEB-FIP)

83

Paulo:

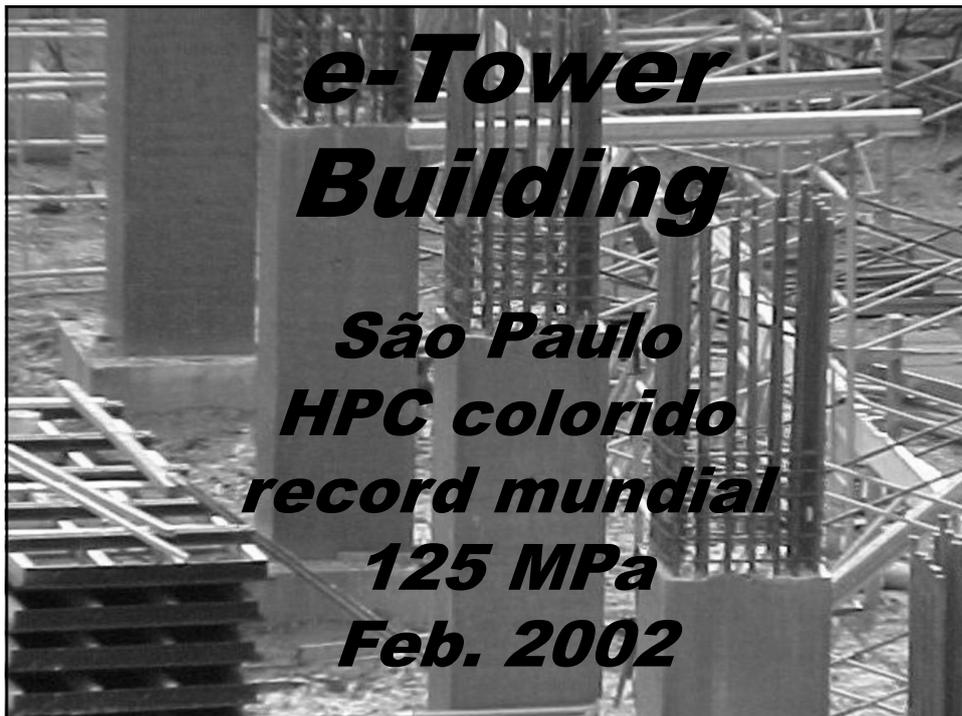
I have received your letter regarding the high-strength concrete record.

You have certainly gotten into HSC in a very big way!

We can discuss later which can be the best way....

**Terry
ACI President**

84



85

Propriedades mecânicas

□ f_{ck} = 115 MPa □ f_{ck} = 25 MPa

□ f'_c = 17,000 psi □ f'_c = 3,600 psi

| | | | |
|---------------|---------|------|------|
| f_c | 7 days | 111 | 18 |
| f_c | 28 days | 125 | 32 |
| f_c | 63 days | 139 | 37 |
| f_c | 91 days | 155 | 39 |
| E_{ci} | 28 days | 50 | 30 |
| f_{ct} | 28 days | 10 | 3,1 |
| Ultrassom m/s | | 4950 | 3250 |
| esclerometria | | 52 | 23 |

86

Durabilidade

□ f_{ck} = 115 MPa □ f_{ck} = 25 MPa

□ f'_c = 17,000 psi □ f'_c = 3,600 psi

| | | |
|--|------------------------|------------------------|
| Carbonatação 28+63d 25°C 65% 5% | zero | 29mm |
| Absorção H₂O | 0,40% | 7,5% |
| Volume de vazios | 1% | 17,5% |
| Densidade | 2530 kg/m ³ | 2310 kg/m ³ |
| absorção capilar | 0,1 g/cm ² | 2,7 g/cm ² |
| Ascensão capilar | 0 cm | 30 cm |
| Cloretos | 43 C | 8.400 C |
| Abrasão cm³/cm² | 0,019 | 0,051 |

87

*Vida Útil
de 980 años!*

88

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

89

