

Rascacielos en Concreto de Altas Prestaciones

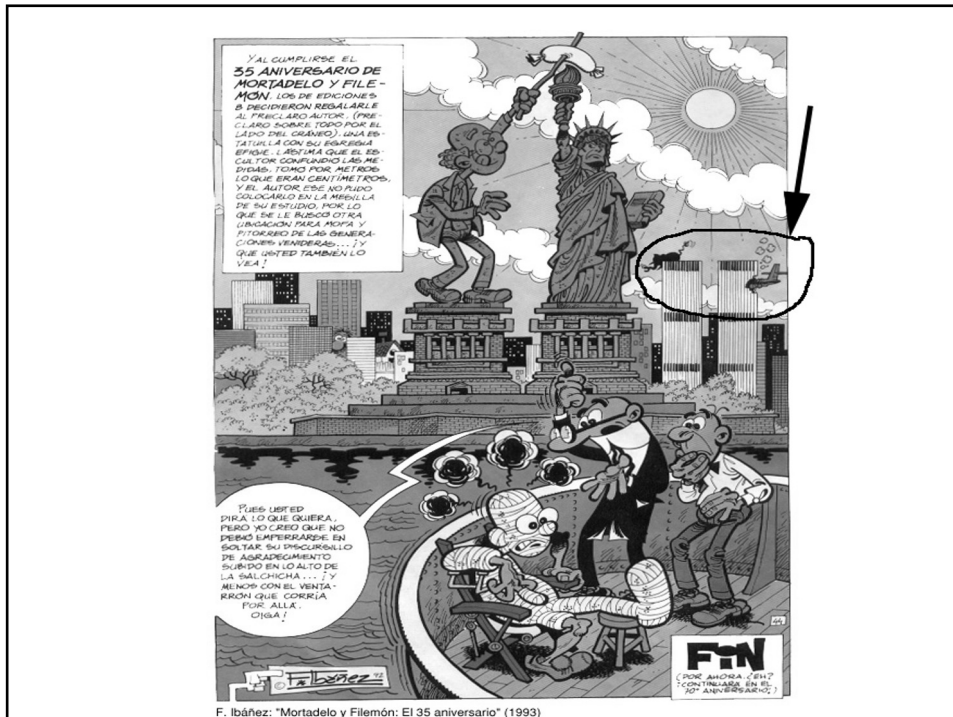
Ing. Paulo Helene

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

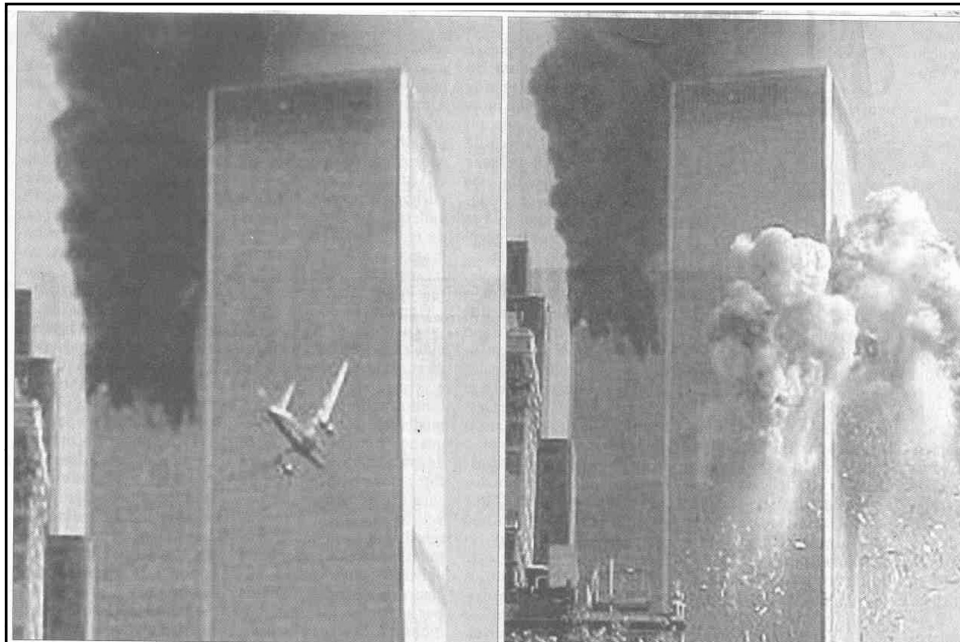
27 Setiembre 2002

Centro de Convenciones Cartagenas de Indias COLOMBIA

1

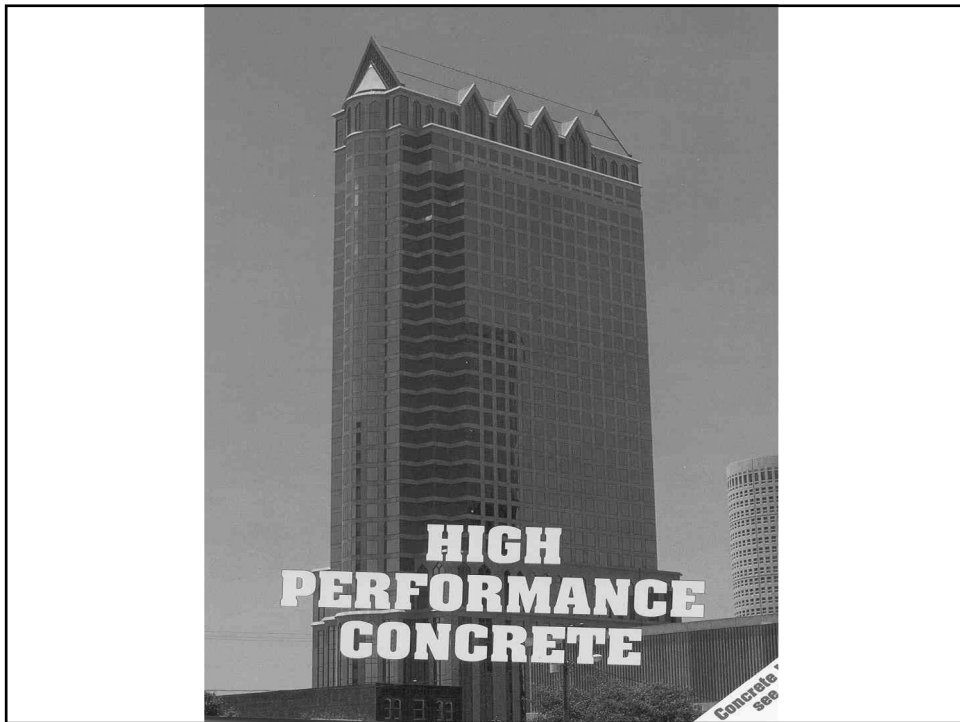


2

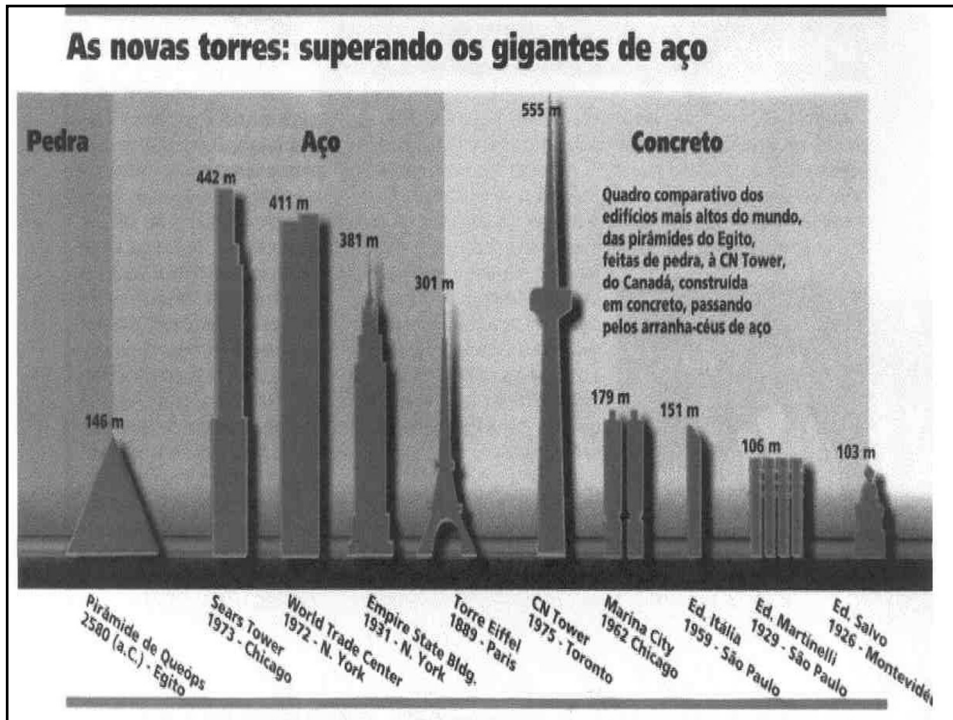


Discovery Channel , 11/09, 22h

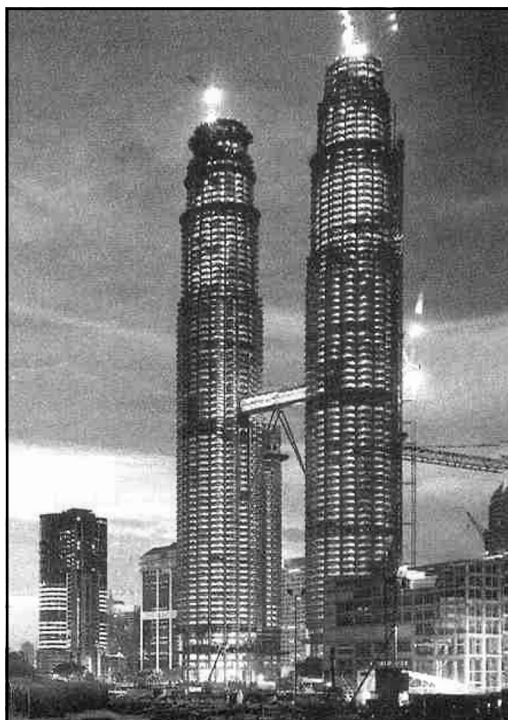
3



4



5



Petronas Towers

Kuala Lumpur

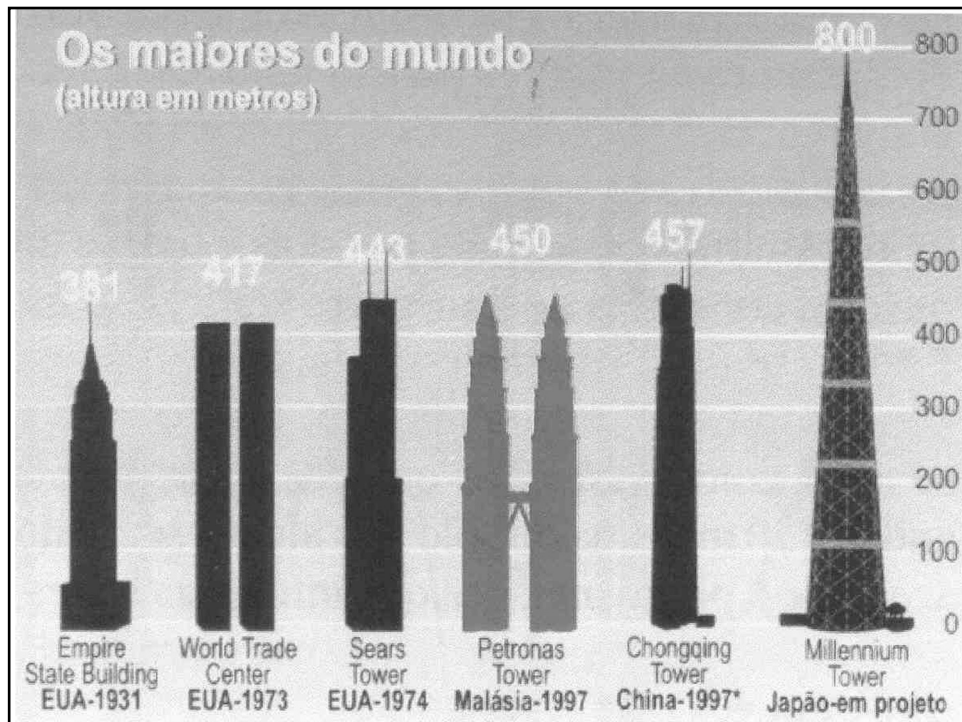
Malásia 1998

Altura 452 m

$f_{ck} = 80 (65) \text{MPa}$

$f'_c = 9,500 \text{ psi}$

6



7

Petronas Towers

Kuala Lumpur

Malásia

1998

Altura 452 m

$f_{ck} = 65 \text{ MPa}$

$f'_c = 9,500 \text{ psi}$

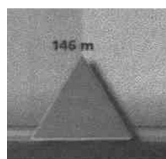
8

Genesis, 11.4

El pueblo de Dios dice:

“ Vamos construir una ciudad e una torre cuyo punto mas alto pueda tocar al cielo y llegar al Paraíso, grabando nuestro nombre para siempre e evitando que seamos dispersados sobre toda la tierra.”

9



**Pirâmide de
Queóps
Egito**

**2580 a.C.
Altura 146 m**

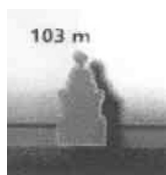
Existente



**Farol de
Alexandria
Egito**

**280 a.C.
Altura 134 m**

**Destruído por
Terremoto
Século XIV d.C.**



**Edifício
Salvio
Montevideo**

**1926
Altura 103 m**

Existente

10

Edifício Martinelli SP



1925

Torre Norte SP



1998

11



Edifício Martinelli

São Paulo

1925

25 pisos

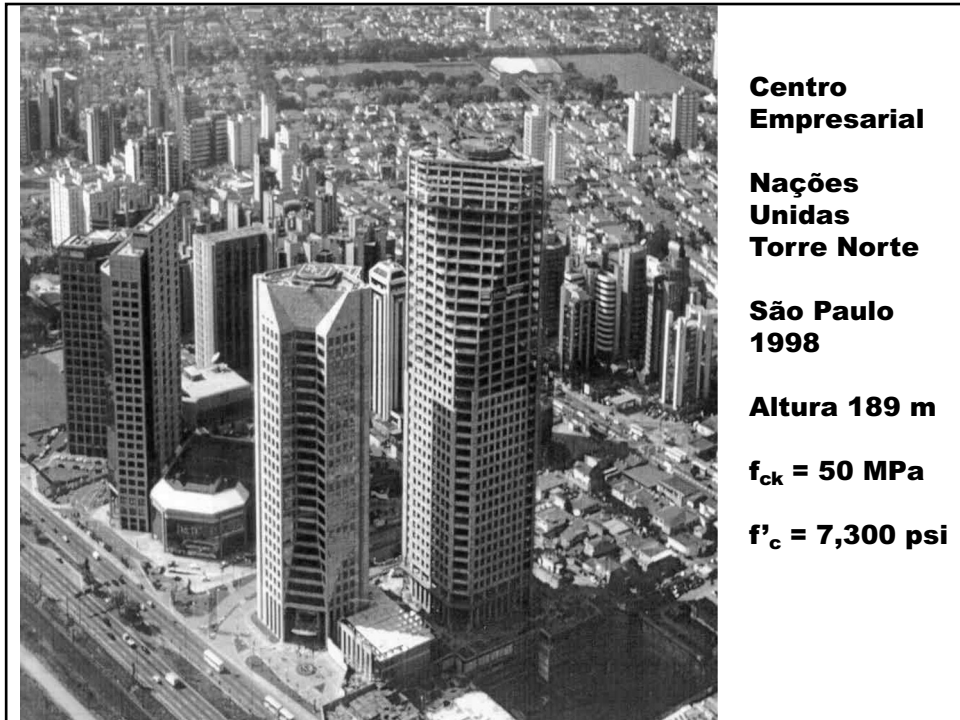
Altura 106 m

Rua Líbero Badaró

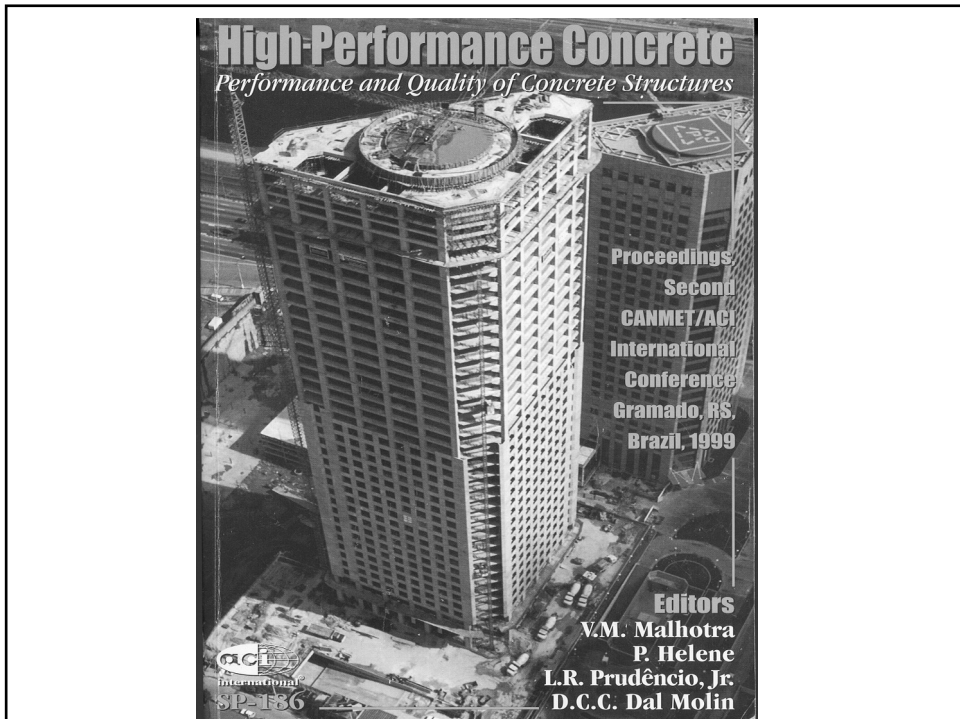
$f_{ck} = 13.5 \text{ MPa}$

$f'_c = 2,000 \text{ psi}$

12



13



14



Buenos Aires, Argentina

15

***satisfacer el espíritu y a las
necesidades actuales***

- **Seguridad Estructural**
- **Garantía da Vida Útil**
- **Constructibilidad**
- **Economía**
- **Desarrollo Sostenido**

16



Vida Útil

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

17

Cloruros - difusión

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

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

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

18

Cloruros - difusión

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

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

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

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

19

Carbonatación

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

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

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

20

Carbonatación

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

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

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

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

21

Constructibilidad

columnas

50 MPa

22

Constructibilidad

vigas y losas

50 MPa

columnas

23

Constructibilidad

vigas y losas

50 MPa

50 MPa

columnas

24

Constructibilidad

vigas y losas **50 MPa**

35 MPa

columnas


50 MPa

25

Constructibilidad

vigas y losas **50 MPa**

35 MPa



columnas

50 MPa

26

Constructibilidad

50 MPa

vigas y losas

35 MPa

columnas

50 MPa

27

Constructibilidad

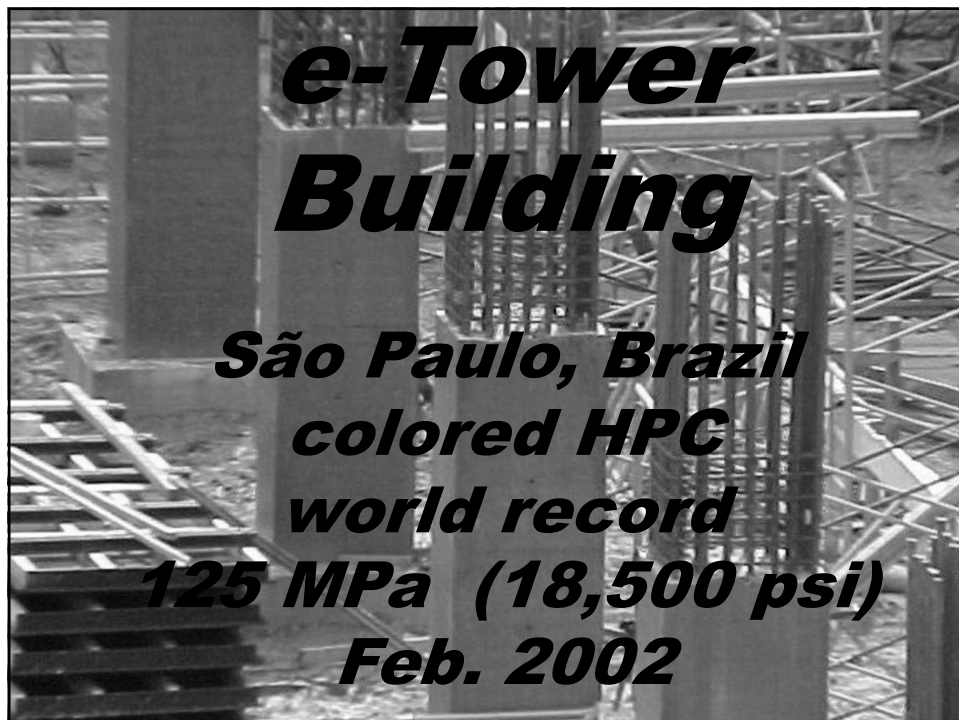
- **concreto confinado**
- **concreto zunchado**
- **barras extras de acero**

28

***satisfacer el espíritu y a las
necesidades actuales***

- **Seguridad Estructural**
- **Garantía da Vida Útil**
- **Constructibilidad**
- **Economía**
- **Desarrollo Sostenido**

29



30

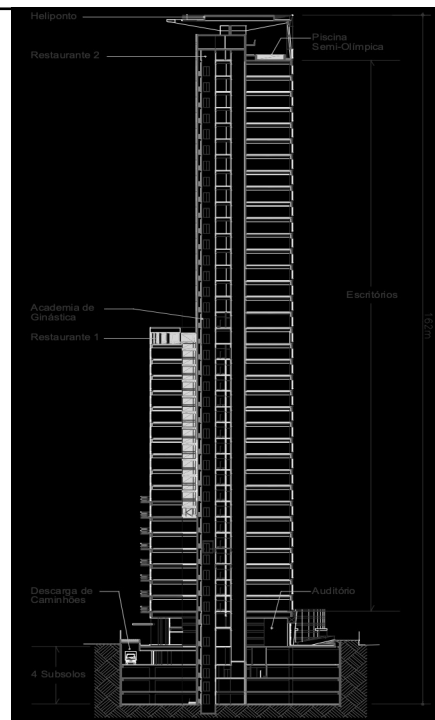


31

e-Tower

São Paulo

- 52.000 m² de área construída
- 42 pavimentos (04 subsolos)
- 800 vagas de garagem
- 02 restaurantes
- Academia de ginástica (19º andar)
- Piscina semi-olímpica (37º andar)



32

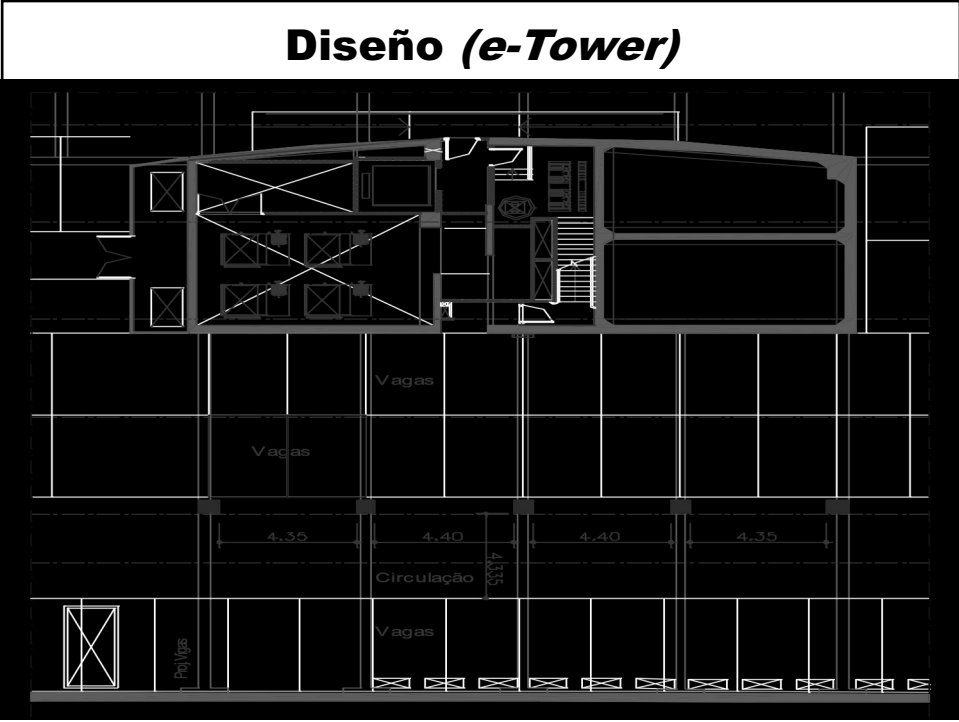


33

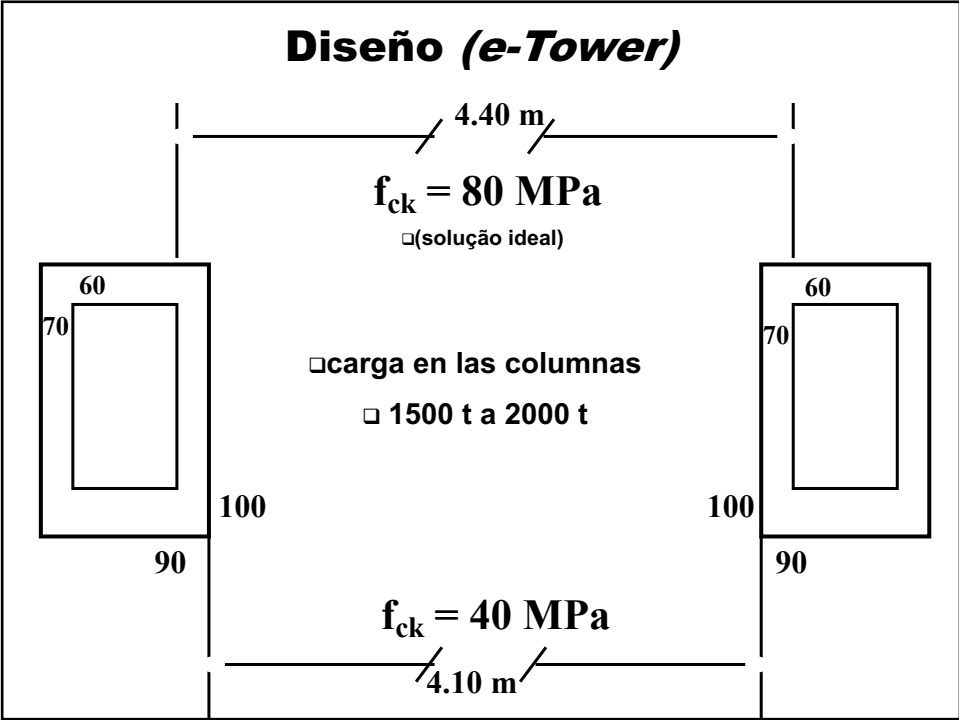
Diseño (*e-Tower*)

- ❑ **Coordinación modular rigurosa - ejes a cada 1,25 m**
- ❑ **Columnas a cada 5 m en la fachada norte**
- ❑ **Distancia libre entre columnas de por lo menos 4,20 m**
- ❑ **Faces alineadas con pasillo (p/ facilitar circulación de autos)**

34



35



36

Diseño (*e-Tower*)

- ganó 4 plazas de auto por piso
- son 4 pisos = 16 plazas
- cada plaza vale US \$ 5,000
- ganó US \$ 80,000

37

Diseño (*e-Tower*)

- area inicial = $90 \times 100 = 0.9 \text{ m}^2$
- area final = $60 \times 70 = 0.42 \text{ m}^2$
- economia = $0.9 - 0.42 = 0.48 \text{ m}^2$
- 53% menos concreto
- C80 cuesta 45% mas que C40
- ahorro de 8% en concreto

38



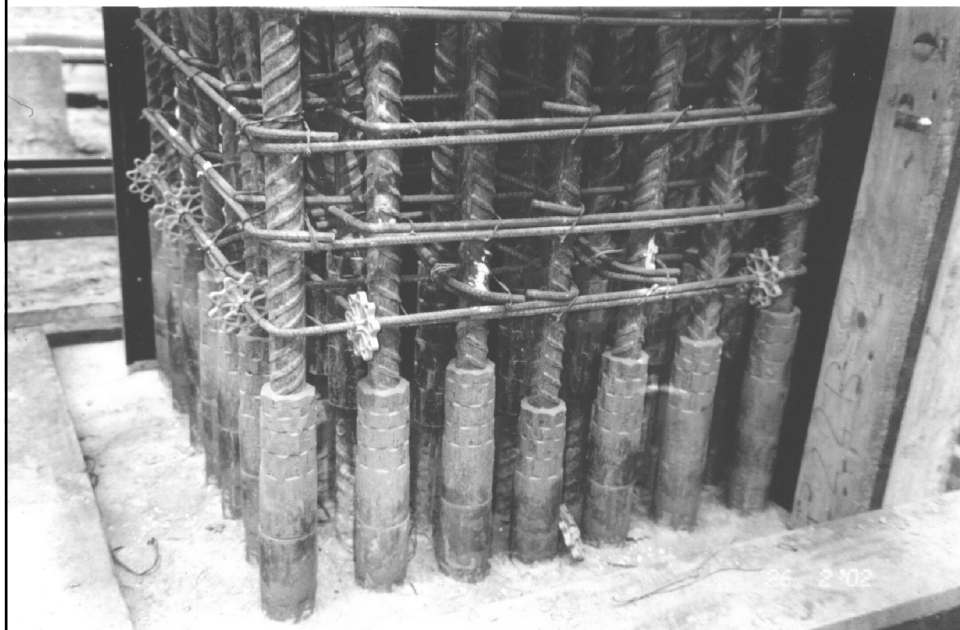
ENCOFRADO

**sistema de
columnas
"SOLTERAS"**

**economía de
encofrado**

39

ARMADURAS



40

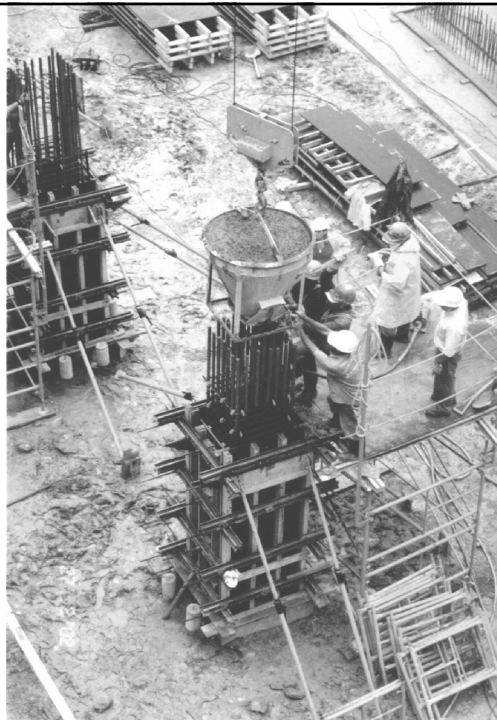
VACIADO

✓ **directo por encima de las armaduras**

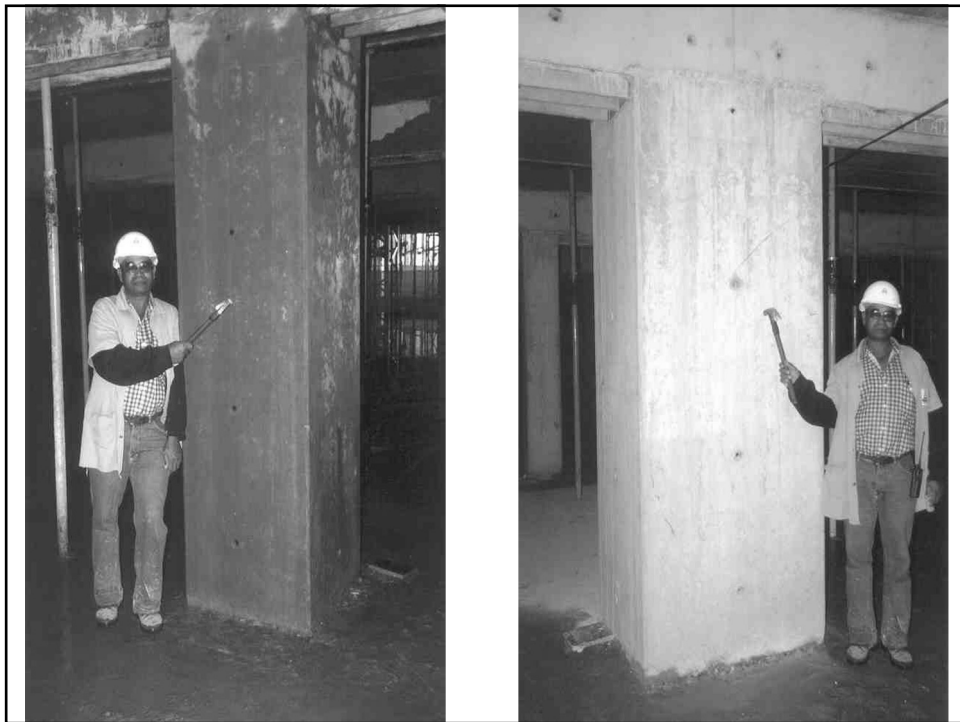
5.5 m

✓ **coesión impide nidos de abeja**

✓ **aumento de productividad**



41



42

Estudio de Mezclas

3 meses

laboratório



composiciones potenciales



estudios en camión hormigonera



execución de columnas aparcamiento

43

Experimento

Engemix,
Central da Barra
Funda,
São Paulo y
Centro de
Investigaciones
y Desarrollo de
la Universidad
de São Paulo



44

Control de los Materiales



45

Prueba de Hormigonado

Columnas de la Periferia
concreto sin pigmento e sin gelo
slump: 190 mm
prueba sob condiciones extremas
temperatura de vaciado: 37° C
temperatura ambiente de 32° C



46



47



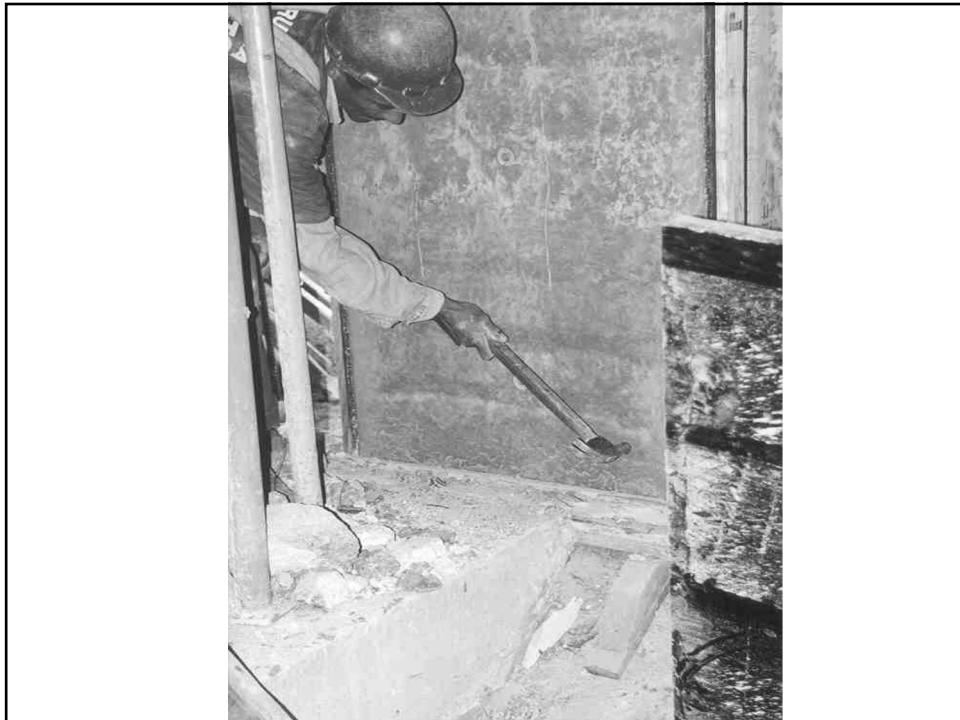
48



49



50



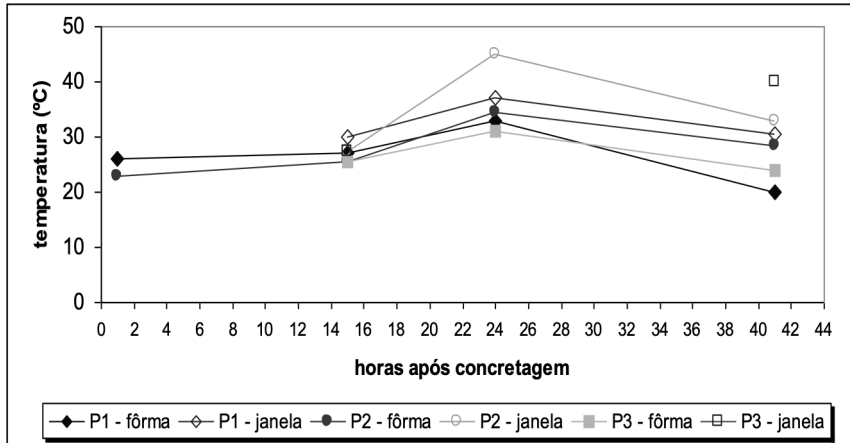
51

Tempo e temperatura

Controle de tempo	
Horário de início da mistura	12:55
Horário da saída da central	13:35
Horário chegada obra	14:30
Horário término da concretagem	16:00
Temperatura concreto na chegada na obra	
37,5 °C	

52

Monitoramento da temperatura



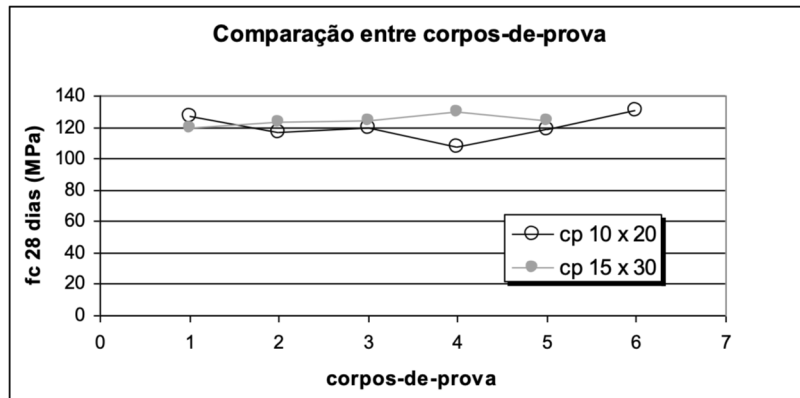
P1 = 133 P2 = 134 P3 = 135

53



54

Resistência à compressão pilares do subsolo



55

EJECUCIÓN

**Trabajabilidad
del concreto**

14 a 20 cm

**4 m³ por camión
hormigonera**



56

Hormigonado de las Columnas

- 4 pisos de aparcamiento, planta baja y 2 pisos más
- concreto con pigmento e hielo
- slump: 190 mm
- temperatura del concreto: 21° C
- temperatura ambiente: 22 a 30° C



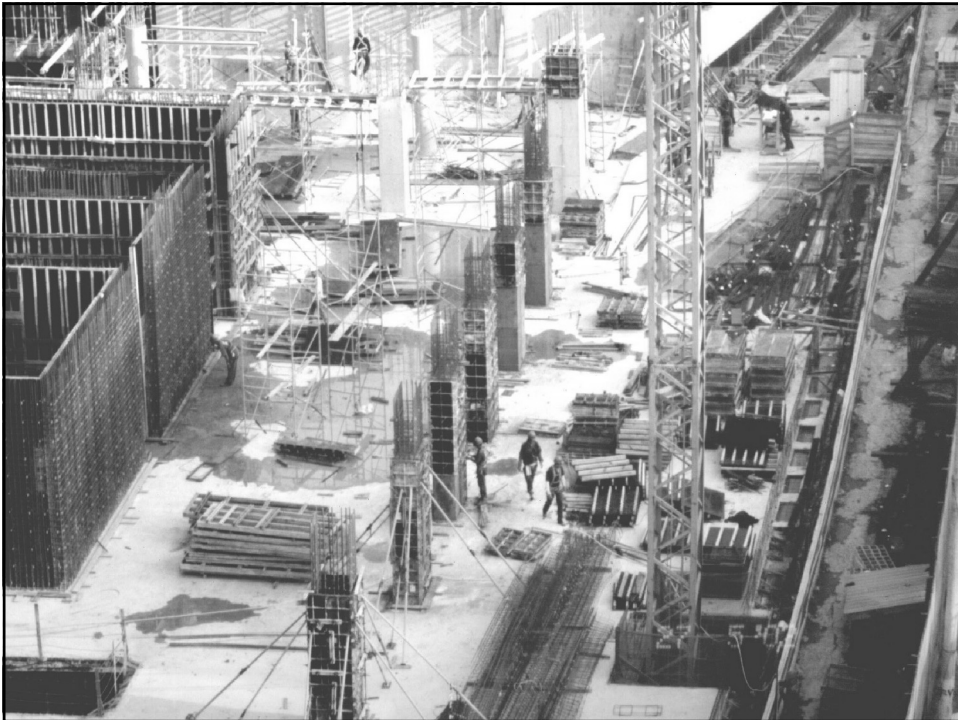
57



58

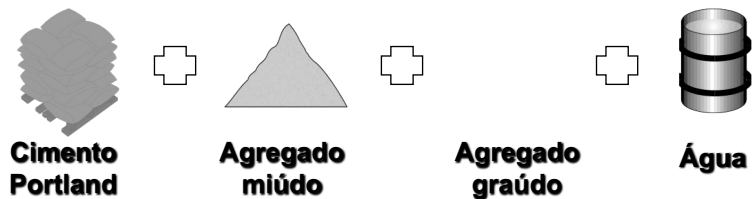


59



60

HPC (CAP) COMPOSIÇÃO



Concreto comum

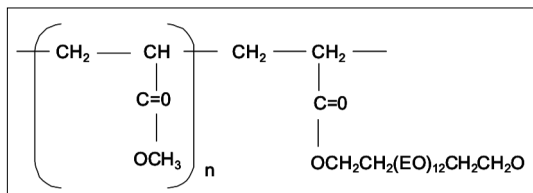


Aditivos químicos
Adições minerais ativas

□ **HPC** → **Concreto de Altas Prestaciones**

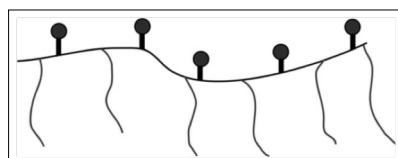
61

POLICARBOXILATO



(a) Monômero de um policarboxilato

- Conhecidos comercialmente como de 3ª geração;
- Redução de até 40% de água da mistura (Leidhdt, et al., 2000);
- Possuem grupos carboxílicos COOH;
- Cadeia lateral longa.



(b) Esquemática da molécula

62

MECANISMO DE ACCIÓN

Cimento Portland + Água



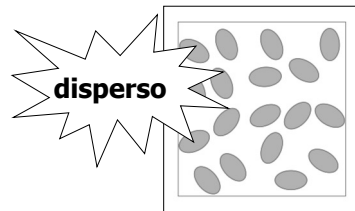
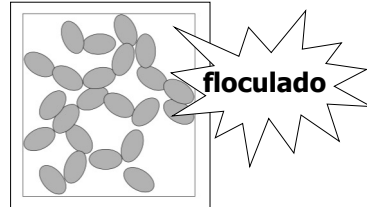
Floculação



aprisionamento de água
entre os grãos de
cimento



redução da fluidez e da
área específica disponível
para hidratação



63

MECANISMO DE ACCIÓN

Cimento Portland + Água



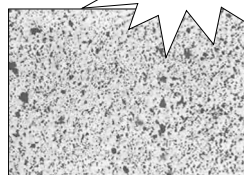
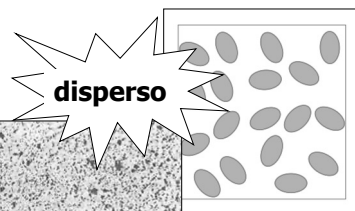
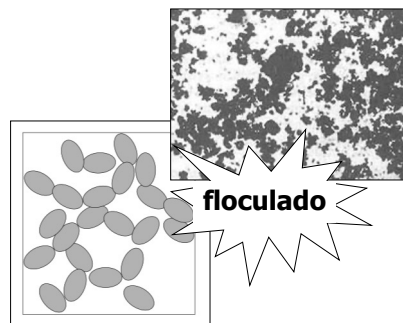
Floculação



aprisionamento de água entre os
grãos de cimento



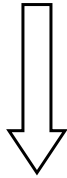
redução da fluidez e da área
específica disponível para
hidratação



64

ADICIONES MINERALES

Para obter maior
compacidade e maior
resistência mecânica



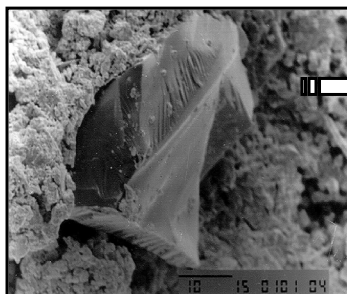
adição de minerais ativos

Metacaulim y Humus de Sílice

- **estrutura mais compacta**
- **reagem com a cal livre melhorando a resistência e durabilidade.**

65

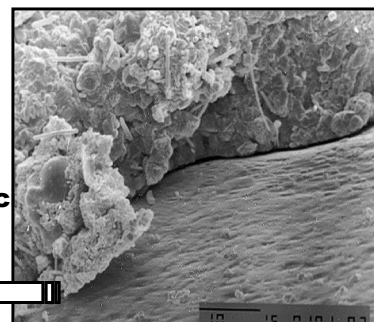
ADICIONES MINERALES



Aumento 1500x

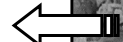


Concreto convencional



Aumento 1500x

**Concreto con
Metacaulim**



66

PIGMENTO

- ✓ Óxido de Yerro Fe_2O_3 > 98%
- ✓ grado 8 de solidez a la luz solar
- ✓ 0,5% de sales solubles
- ✓ 99,95% diámetro de partícula < 0,045mm (#325) 0,05% de retenido
- ✓ Densidade 4.500 kg/m³
- ✓ Formato Partícula: Esférica
- ✓ EN 12878 y ASTM C 979

67

Composición del Concreto

materiales	ratio	amount	obs
cemento	1,00	623 kg/m ³	CPV ARI
adición	0,15	93 kg/m ³	silica y metacaulim
arido grueso	1,65	1.027 kg/m ³	basaltico, 19mm, MF 6,9, 3.020 kg/m ³
arido fino	0,88	550 kg/m ³	quartzo, 2,4mm, MF 2,0, 2.670 kg/m ³
pigmento	0,04	25 kg/m ³	oxido de yerro
super	0,01	6,2 kg/m ³	policarboxilato
retardador	0,0058	3,6 kg/m ³	acido hydrocarboxálico
água	0,19	135 kg/m ³	A / C = 0,19

68

CONTROL TECNOLÓGICO

- ❑ Verificação da nota de entrega
- ❑ Recebimento do concreto fresco
 - ❑ Verificação dos tempos de transporte e lançamento
 - ❑ Execução de abatimento no início e no final da descarga
 - ❑ Controle da temperatura
- ❑ Determinação da resistência à compressão
 - ❑ Moldagem de Corpos de prova com dimensões (10x20cm)
 - ❑ Câmara úmida na obra
 - ❑ Acabamento dos topos do corpo de prova (retífica)
 - ❑ Identificação e rastreabilidade do concreto
 - ❑ Especificação de idades mais avançadas (63, 91 dias)
- ❑ Determinação do módulo de deformação

69

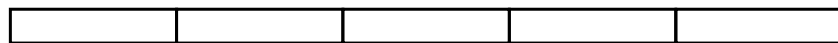
COMUNICACIÓN VISUAL



70

CONTROL DE TEMPERATURA INICIAL del CONCRETO FRESCO

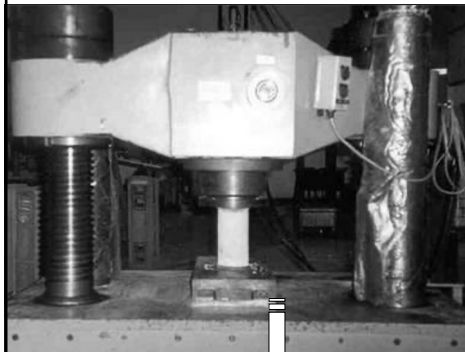
Problemas	Aceitável	Ideal	Aceitável	Problemas
-----------	-----------	-------	-----------	-----------



5° 10° 15° 20° 25° 30°

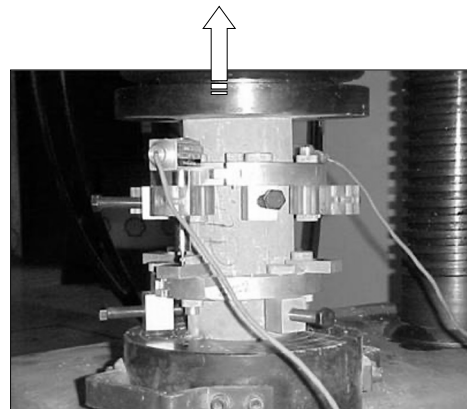
71

Propiedades Mecânicas



**Resistência
à compressão**

**Módulo
de elasticidade**



72



73

Resistência à Compressão

Trço	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
Amostra	amostra 1	amostra 2	amostra 3	amostra 4	amostra 5	amostra 6	amostra 7	amostra 8	amostra 9	amostra 10
Data	10/10/2002	7/10/2002	11/2002	15/2/2002	27/2/2002	16/3/2002	25/3/2002	5/4/2002	11/4/2002	11/4/2002
moldagem										
CP 1	134.3	119.7	120.2	113.1	133.0	114.9	121.8	115.6	119.0	116.2
CP 2	131.2	123.0	124.7	121.8	144.3	105.6	127.4	114.9	129.9	126.2
CP 3	127.4	124.1	120.8	125.6	149.9	115.6	133.7	111.2	123.7	126.8
CP 4	129.9	129.6	115.8	118.7	143.0	112.4	124.9	123.1		
f _{max} f _c	134.3	129.6	115.8	133.1	149.9	115.6	133.7	123.1	129.9	126.8
f _{min} f _c	127.4	119.7	124.7	105.6	133.0	105.6	121.8	111.2	119.0	116.2
f _f f _{cm}	130.7	122.3	120.4	127.3	142.6	119.1	127.0	116.2	124.2	123.1
Desvio padrão	2.9	2.3	3.6	3.0	3.0	2.6	2.0	3.0	2.5	3.0
Coef. Variação	2.2	1.9	3.0	8.2	2.9	3.1	3.0	3.3	3.4	3.8
f _f						124.6				
f _{cm}						116.6				
f _{min} f _c						149.9				
f _{max} f _c										

28 dias

74

Módulo de elasticidade

	T7	T8	T9	T11
CP 1	41.6	47.1	42.8	51.7
CP 2	42.2	48.4	47.2	55.2
CP 3	41.7	45.8	45.7	51.2
CP 4		48.2	50.8	
Média	41.8	47.4	46.6	52.7
Desv pad	0.3	1.3	2.2	2.2
Coef var	0.8	2.7	4.8	4.1
Média total:			47.1	
Máximo			55.2	
Mínimo			41.6	

75

Comparación de Propiedades Mecánicas

□ $f_{ck} = 115 \text{ MPa}$ □ $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

□ $f'_c = 17,000 \text{ psi}$ □ $f'_c = 3,600 \text{ psi}$

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

76

Comparación de Durabilidad

$\sigma_{f_{ck}} = 115 \text{ MPa}$ $\sigma_{f_{ck}} = 25 \text{ MPa}$

$\sigma_{f'_c} = 17,000 \text{ psi}$ $\sigma_{f'_c} = 3,600 \text{ psi}$

Carbonatación

28+63d 25°C 65% 5%

zero

29mm

Absorción H₂O

0,40%

7,5%

Volumen Vacío

1%

17,5%

Densidad

2530 kg/m³

2310 kg/m³

Absorción Capilar

0,1 g/cm²

2,7 g/cm²

Ascensión Capilar

0 cm

30 cm

Cloruros

43 C

8.400 C

Abrasión cm³/cm²

0,019

0,051

77

Protección del Medio Ambiente

“As estruturas devem ser projetadas para vida útil de pelo menos 150 anos.

Projetar com base no custo global de construção e uso, incluídas as despesas de manutenção e reparo, (*life-cycle cost*) maximiza o retorno do capital disponível e protege os recursos naturais.”

Freyermuth

Life-Cycle Cost Analysis

Concrete International, ACI, v. 23, n. 2, Feb. 2001. p.89-95

78

Desarrollo Sostenible

“Aumentar a vida útil das estruturas de concreto é uma solução fácil e efetiva para preservação dos recursos naturais.

Se desenvolvermos nossa capacidade de projetar e construir estruturas de concreto que durem **500 anos**, em vez de 50 anos, iremos multiplicar por 10 a produtividade de nossas reservas de matérias primas, o que significa dizer preservar 90% das mesmas.”

Kumar Mehta

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

79

***Los Arquitectos e Ingenieros
constroem los marcos de grandeza
de una civilización.***

***Traduzem su história,
sus sueños, sus ideales
en obras imponentes e durables
que elevan la auto estima
de su pueblo.***

80



***El Concreto
de Altas
Prestaciones
es una de las
grandes
oportunidades
atuales de rescatar
esa importancia y
vocación de la
arquitectura e
ingeniería de sur
America***