



6º QUALICON



Concreto de Alto Desempenho: O quê ele pode fazer por sua obra?

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*

Vitória, 06 de Novembro de 2002

1

Prof. Jefferson Libório → HSC early age

**Universidade de São Paulo SP
Escola de Engenharia de São Carlos**

Prof. Geraldo Isaia → HPC HVFA

Universidade Federal de Santa Maria RS

Prof. Ivan Ramalho Almeida → HPC MS

Universidade Federal Fluminense RJ

Profa. Denise Dal Molin → HPC MS

Universidade Federal do Rio Grande do Sul RS

Prof. Fernando Lordêlo → HSC

Universidade Federal do Espírito Santo ES

2



3



4



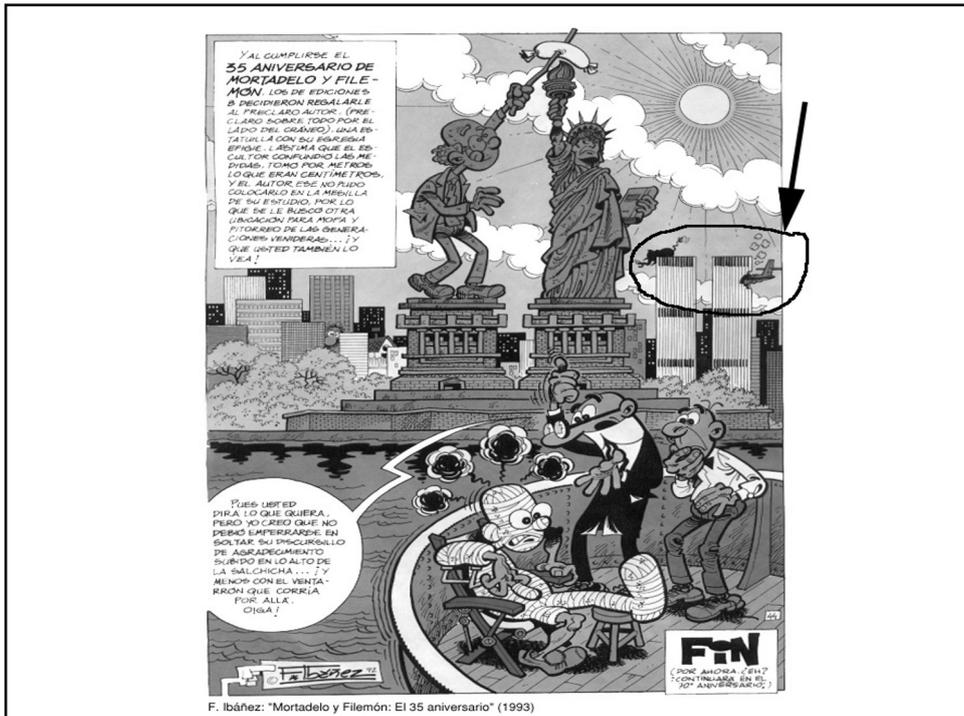
5



6

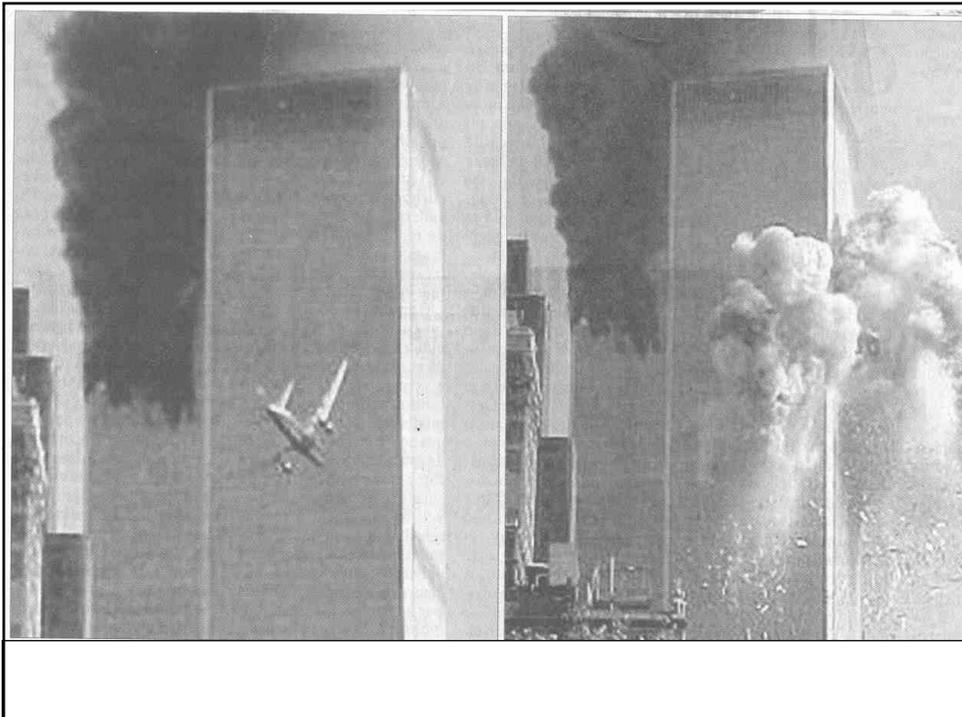


7

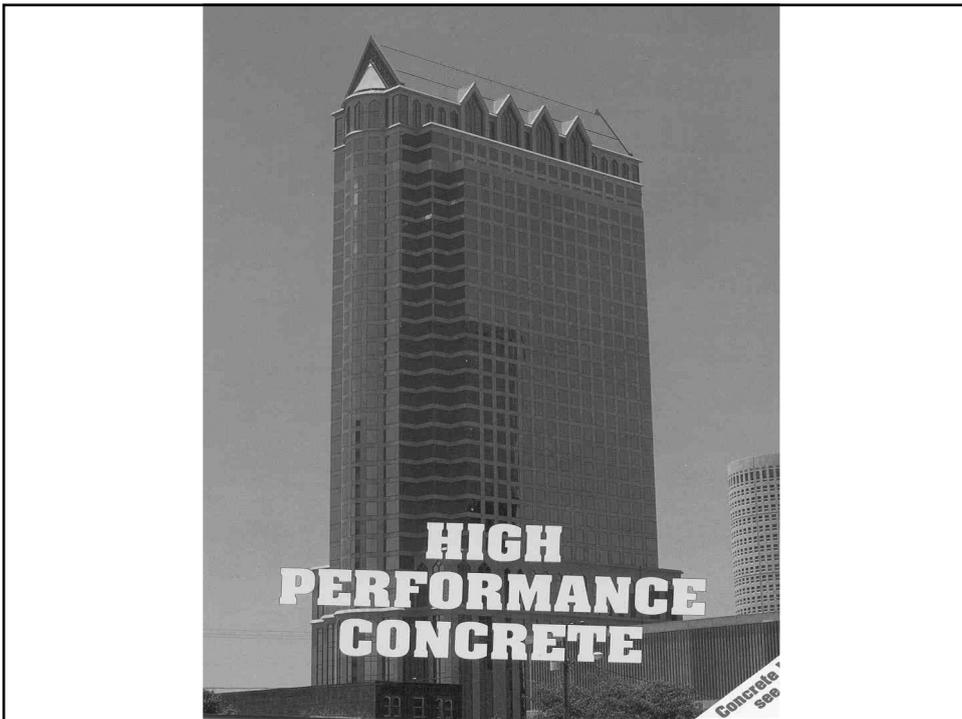


F. Ibáñez: 'Mortadelo y Filemón: El 35 aniversario' (1993)

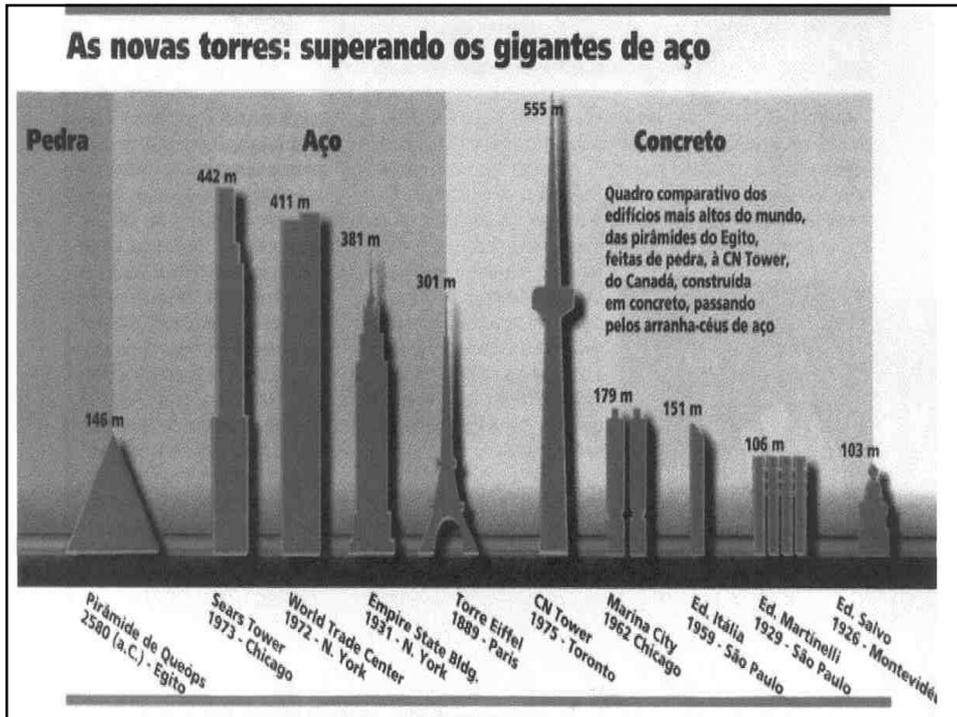
9



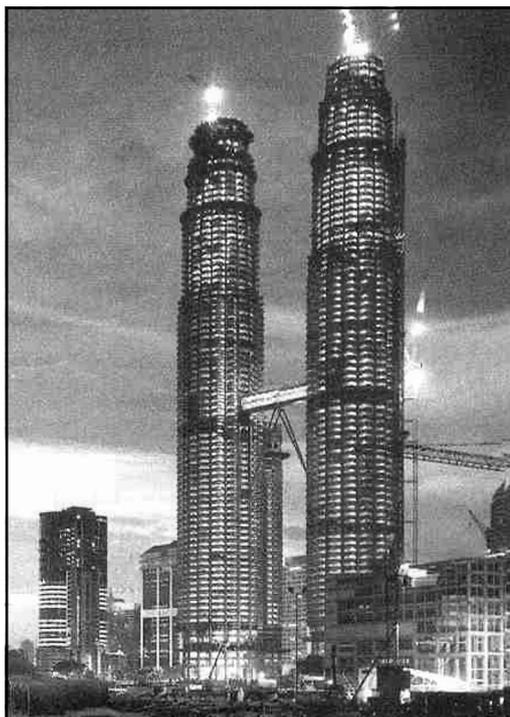
10



11



12



Petronas Towers

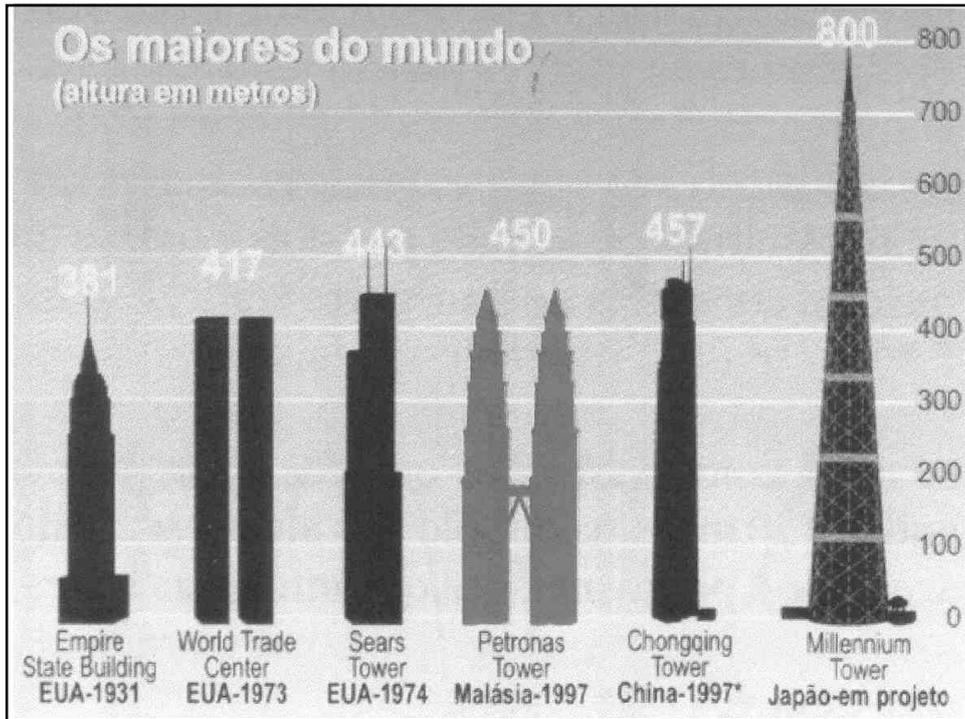
Kuala Lumpur

Malásia 1998

Altura 452 m

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

13



14



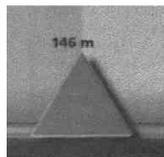
15

Genesis, 11.4

O povo de Deus disse:

“ Vamos construir uma cidade e uma torre cujo ápice toque o céu e alcance o Paraíso, gravando nosso nome para sempre e evitando que sejamos dispersados sobre a face de toda a terra.”

16



**Pirâmide de
Queóps
Egito**

**2580 b.C.
altura 146 m**

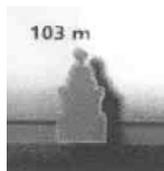
Existente



**Farol de
Alexandria
Egito**

**280 b.C.
altura 134 m**

**Destruído por
terremoto
Século XIV**



**Edifício
Salvio
Montevideo**

**1926
altura 103 m**

Existente

17

Edifício Martinelli SP



Torre Norte SP



18



Edifício Martinelli

São Paulo

1927

25 andares

Altura 106 m

Líbero Badaró

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

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

19

Edifício Itália

São Paulo

1959

45 andares

Altura 156 m

$f_{ck} = 18 \text{ MPa}$

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



20

***satisfação espiritual mas também
atender as necessidades atuais***

- **Segurança estrutural**
- **Vida Útil**
- **Construtibilidade**
- **Economia**
- **Sustentabilidade**

21



Vida Útil

- Carbonatação
- Cloretos
- Fuligem
- Fungos
- Lixiviação
- Retração
- Sulfatos
- << pH
- Corrosão
- fissuras
- destacamentos

22

Cloretos - difusão

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

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

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

23

Cloretos - difusão

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

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

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

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

24

Carbonatação

$$t = \frac{e^2_{co2} \text{ (ano)}}{k^2_{co2}}$$

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

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

25

Carbonatação

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

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

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

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

26

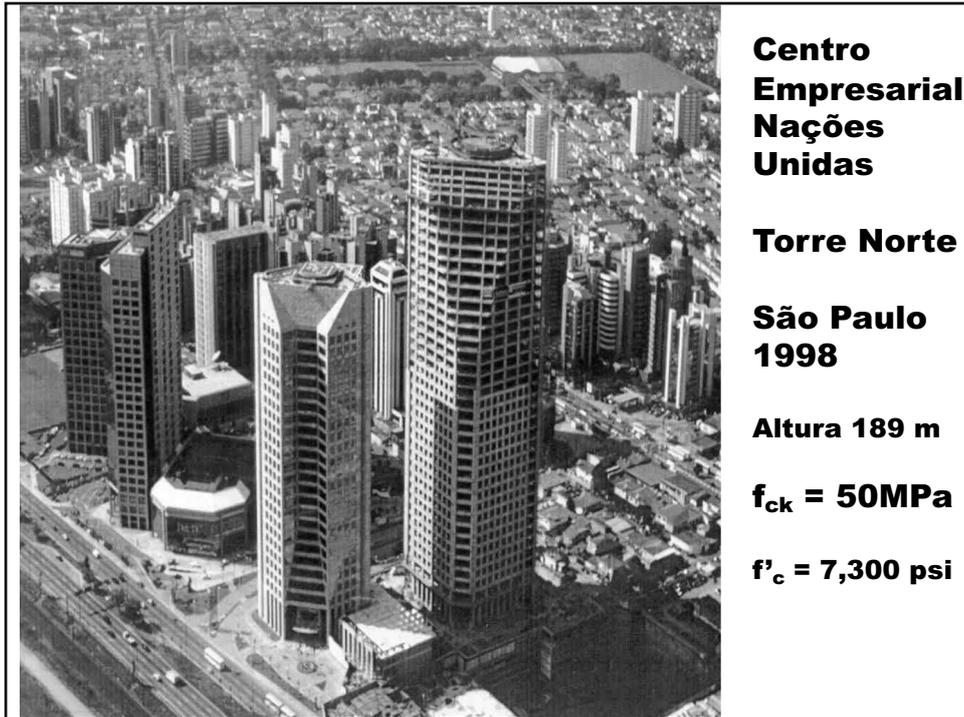


250 anos de garantia.

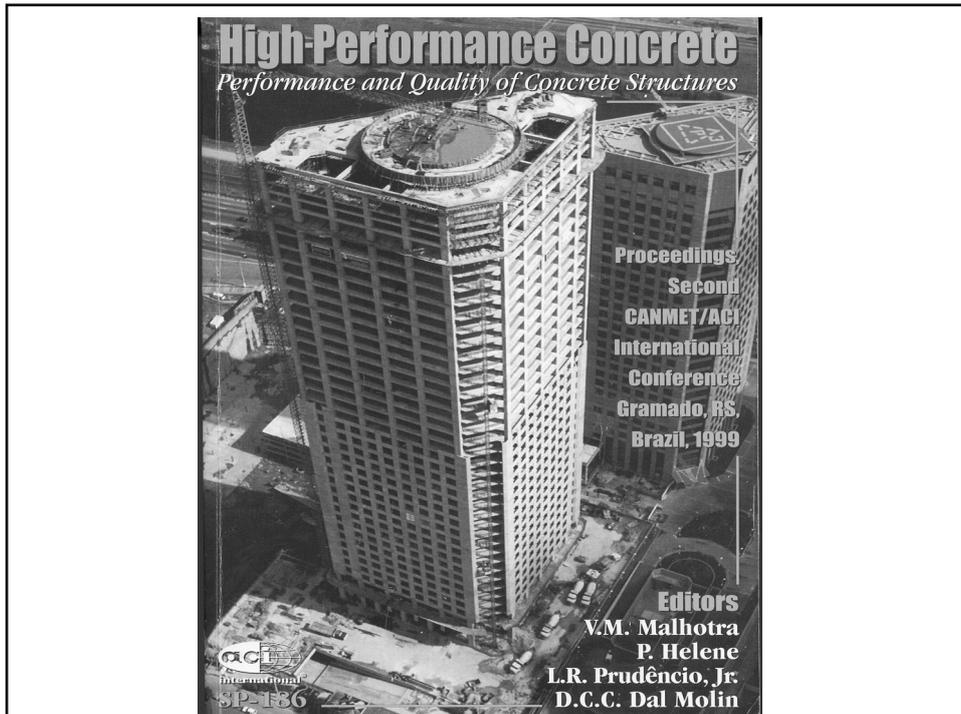
Quem precisa de segurança, integridade e durabilidade precisa do Engemix. Com a tecnologia desenvolvida pela equipe de Engenharia e Desenvolvimento da Torre Norte do Centro Empresarial Nações Unidas, em São Paulo, o Engemix é a combinação ideal de materiais para garantir a máxima durabilidade. Com a aplicação de 30 toneladas por metro cúbico de concreto, o Engemix garante a máxima resistência e durabilidade. O resultado é que, hoje, o Centro Empresarial Nações Unidas é considerado uma verdadeira obra-prima de tecnologia de concreto. Engemix é a solução para quem busca a máxima durabilidade e resistência em qualquer situação. Quem precisa de solução segura em concreto, não pode ficar sem Engemix.

CONCRETO ENGEMIX

27



28

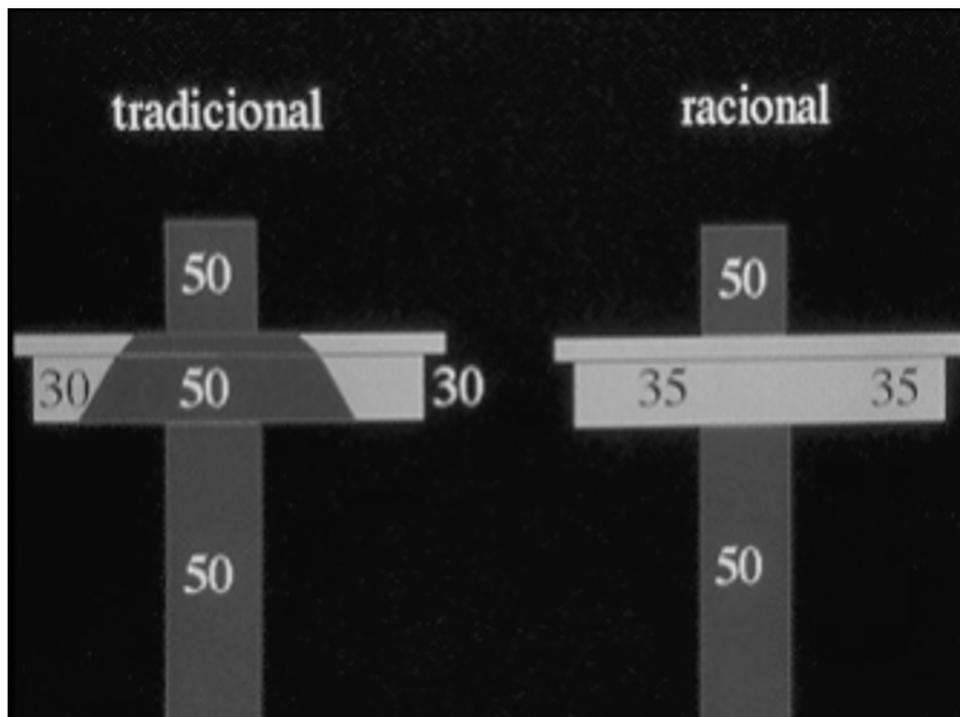


29

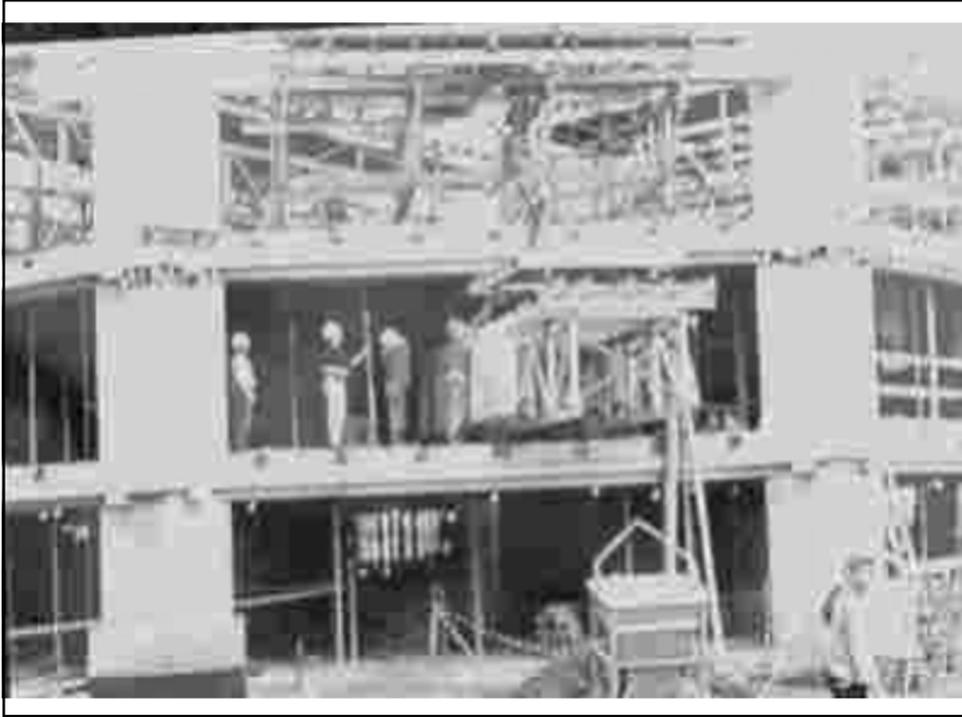
Centro Empresarial Nações Unidas CENU

- 300.000 m²
- 3 torres Oeste, Leste e Norte
- 180m altura, 160m acima térreo
- 3.700 estacionamentos
- U\$ 226.000.000
- construção de 1995 a 2000
- 93.000 m³ concreto
- 9.700 t de aço

30



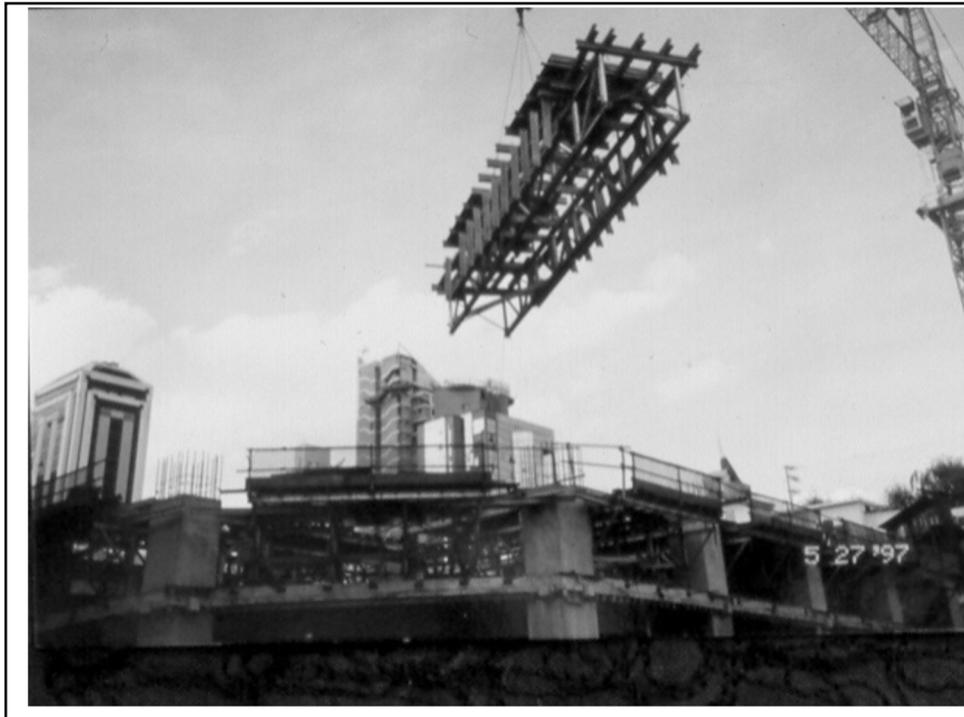
31



32



33



34



35



36



37



38

Concreto f_{ck} 35 MPa p/ lajes		
	Feb 98	May 97
cimento	460	420
areia	950	858
brita 1	790	920
água	196	182
plastificante	0.3%	0.3%
bombeante	0.8%	—
slump	150±20	100±20
pavimento	≥ 34°	< 10°

39

Water Tower Place, Chicago, 1975

cimento :

traço	1 : 1.67 : 2.26	450 kg/m ³
a/c = 0.37	a/a = 0.37	165 L/m ³
superfluidificante	12 L/m ³	2.5 %
$f_{c28} = 80 \text{ MPa}$		

40

Scotia Plaza, Toronto, 1987

cimento : escória de alto forno : sílica ativa

traço	1 : 0.44 : 0.11 : 1.65 : 2.28	315 kg/m ³
a/c = 0.46	a/a = 0.30	145 L/m ³
superfluidificante	7 L/m ³	2.2 %
$f_{c28} = 83 \text{ MPa}$		

41

Two Union Square, Seattle, 1988

cimento : sílica ativa

traço	1 : 0.08 : 1.33 : 2.10	513 kg/m ³
a/c = 0.25	a/a = 0.23	130 L/m ³
superfluidificante	15.7 L/m ³	3.1 ‰
f_{c28} = 119 MPa		

42

Centro Empresarial Nações Unidas, SP 1997

cimento : sílica ativa

traço	1 : 0.08 : 1.39 : 2.02	498 kg/m ³
a/c = 0.39	a/a = 0.36	193 L/m ³
superfluidificante	3.5 L/m ³	0.7 ‰
f_{c28} = 61 MPa		

43

Concreto f_{ck} 50 MPa pilares

cimento	498	550
sílica ativa	40	—
areia	692	737
brita 1	1002	968
água	193	193
plastificante	0.3%	0.3%
superplast.	0.7%	—
$a/(c+s)$	0.36	0.35
α	55%	57%
slump	70±10	70±10

44

Menor Custo Inicial

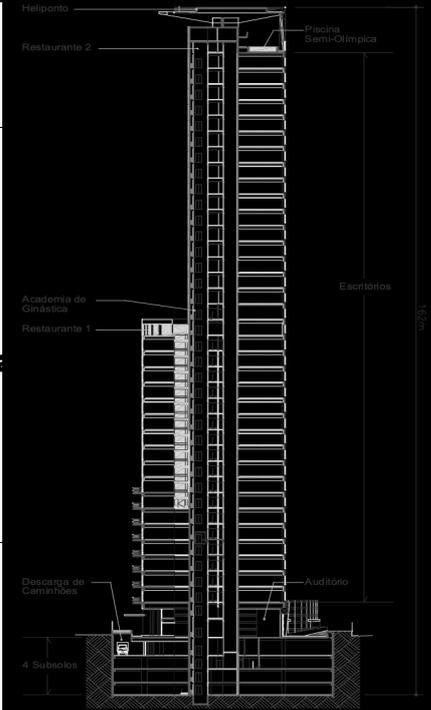
Ganho de Área

45



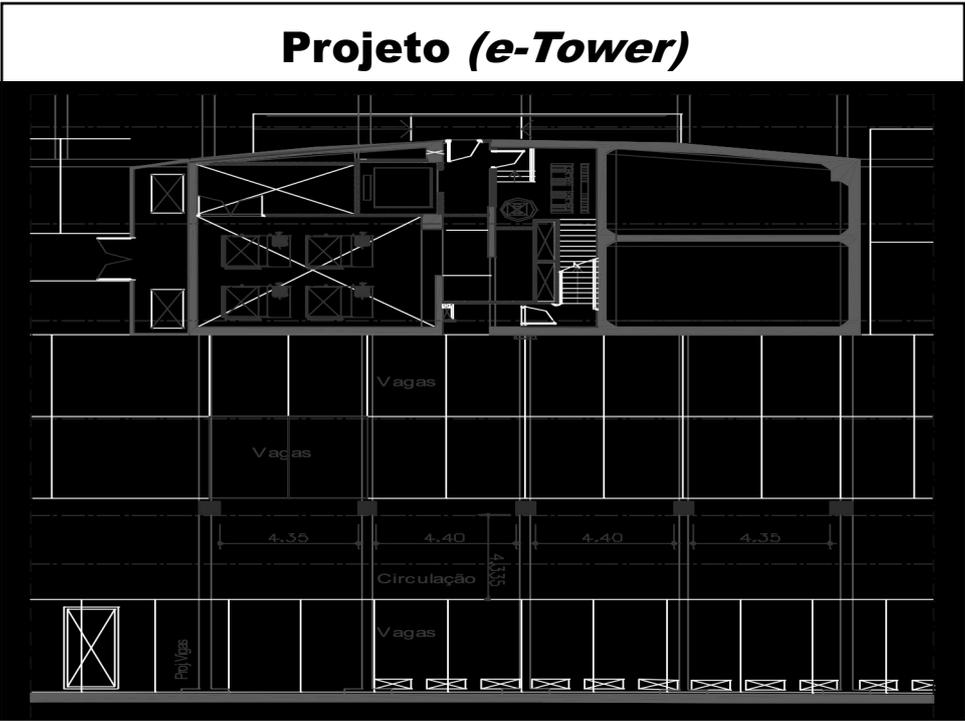
50



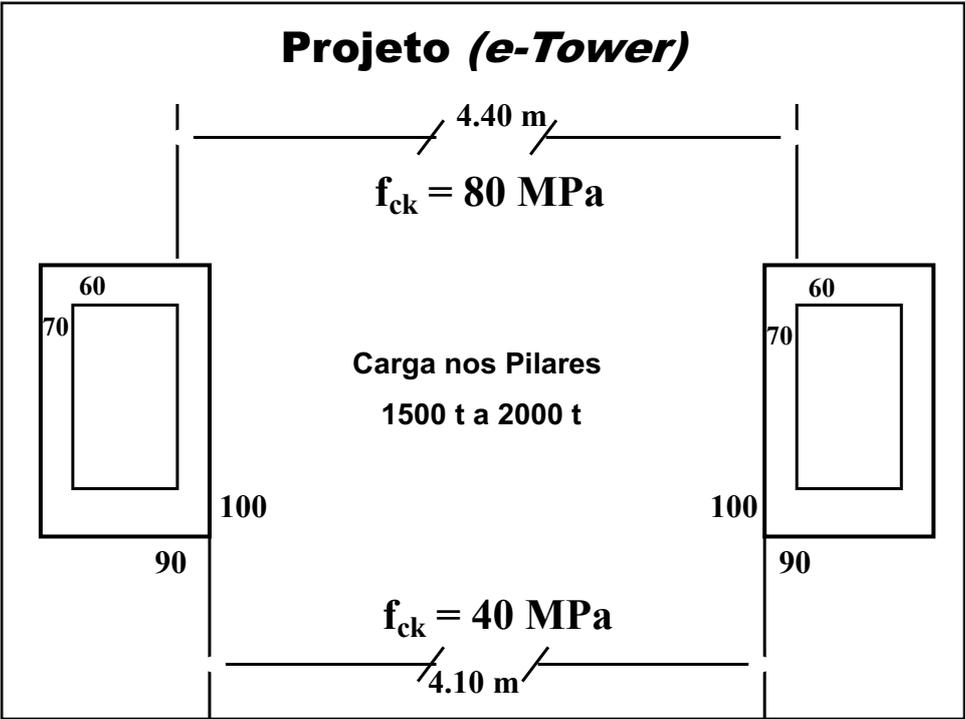


- ▼ **Edifício e-Tower SP**
- ▼ **42 andares**
- ▼ **Heliponto**
- ▼ **Piscina**
- ▼ **Academia de ginástica**
- ▼ **2 restaurantes**
- ▼ **Concreto colorido**
- ▼ **f_{ck} pilares = 80 MPa**

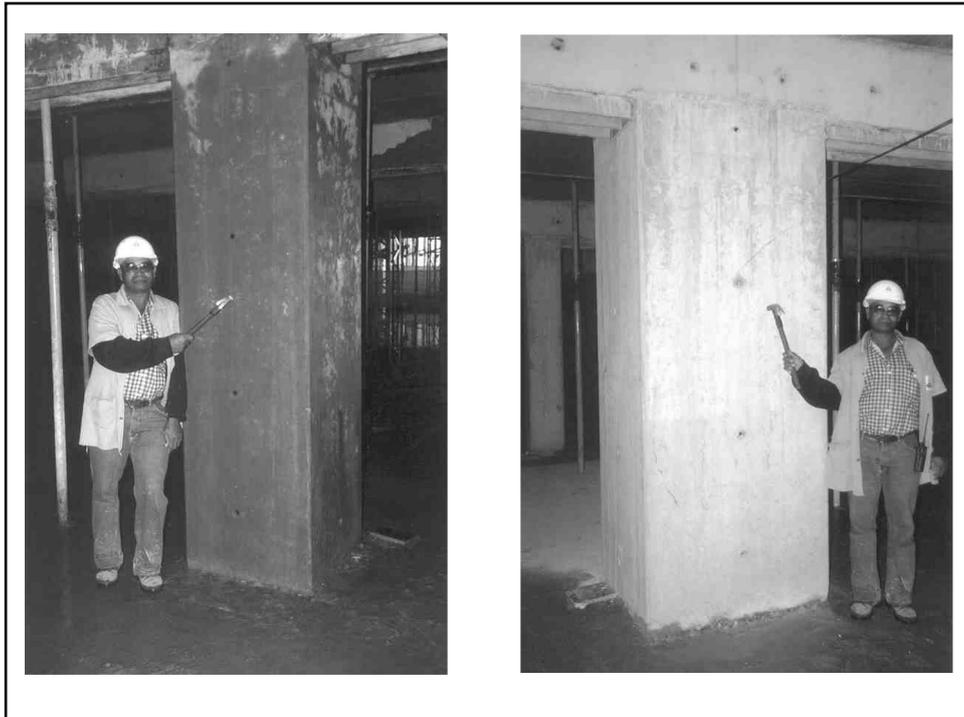
51



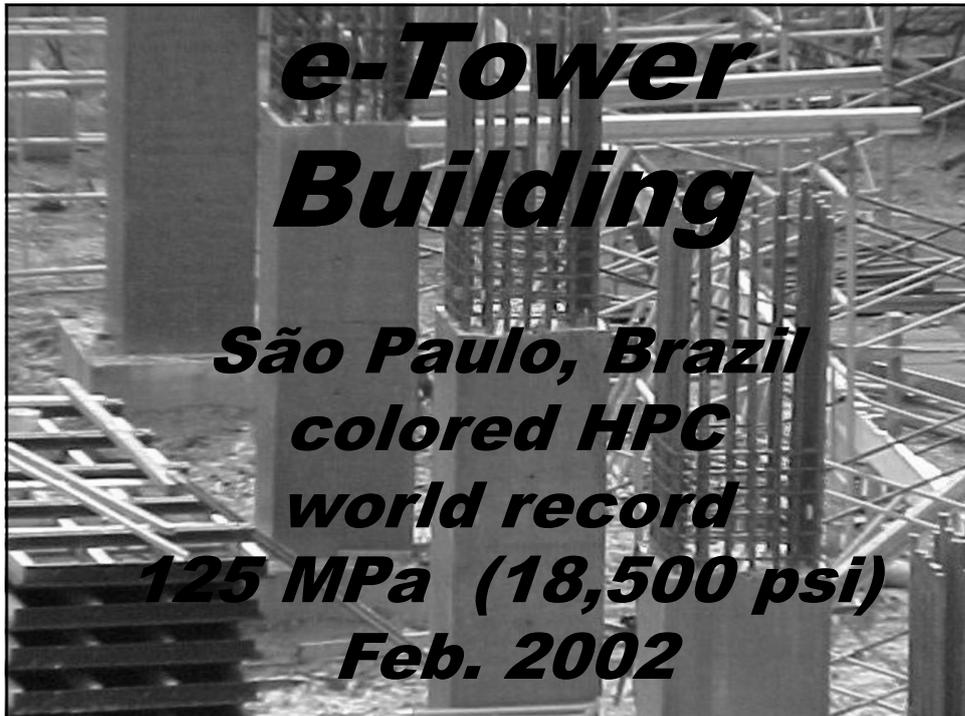
52



53



54



55

Projeto (*e-Tower*)

- Ganho de 4 vagas por andar
- 4 x 4 andares = 16 novas vagas
- US \$ 4,000 cada vaga
- ganho de R\$ 64.000,00

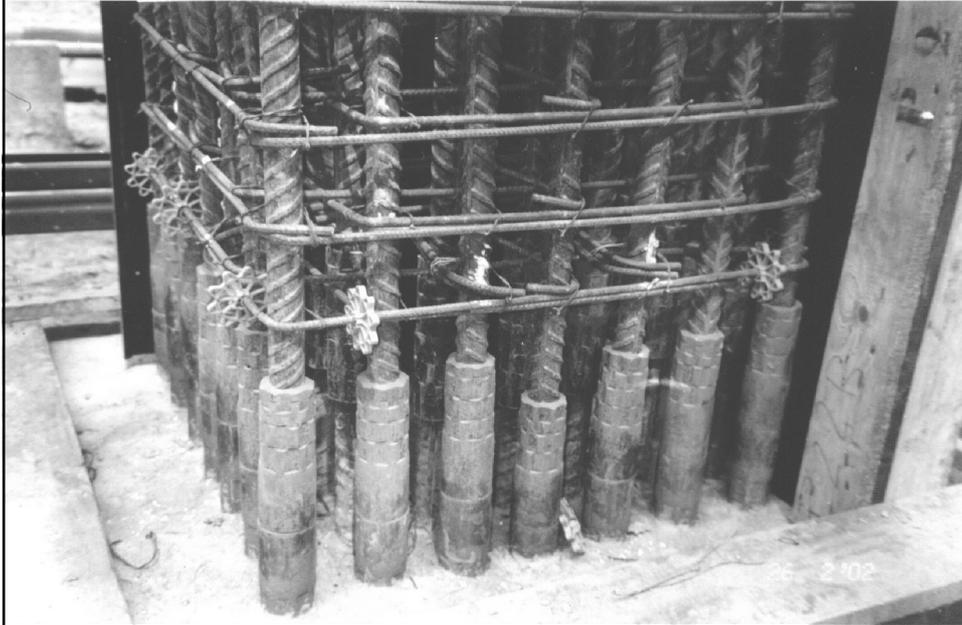
56

Projeto (*e-Tower*)

- seção transversal = $90 \times 100 = 0.9 \text{ m}^2$
- nova = $60 \times 70 = 0.42 \text{ m}^2$
- economia $\Rightarrow 0.9 - 0.42 = 0.48 \text{ m}^2$
- 53% volume concreto
- custo C80 = 45% mais que C40
- ganho de 8% só no concreto!!!

57

construtibilidade



58

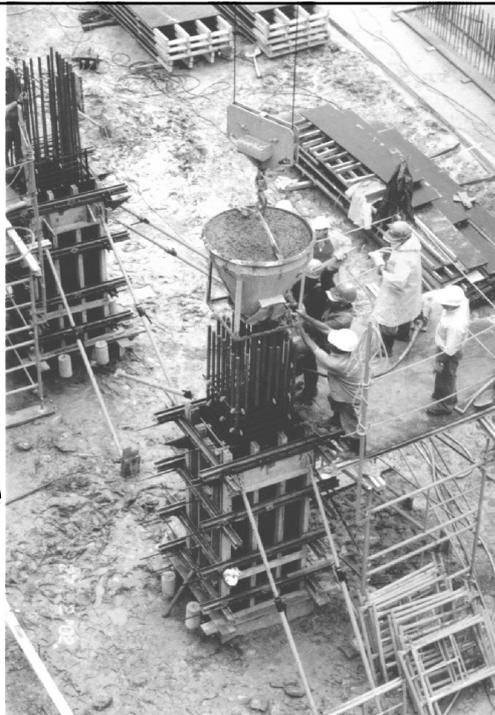


economia de fôrmas

59

lançamento do concreto

- ✓ **5.5 m**
- ✓ **ninhos**
- ✓ **produtividade**



60

Dosagem do concreto

3 meses

laboratório



Traços potenciais



Teste em caminhão betoneira



Teste completo de campo pilares

61

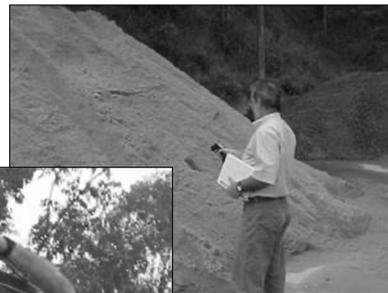
Experimentos

Engemix,
e
Universidade
de São Paulo
Centro de
Pesquisas e
Desenvolvi-
mento em
Construção
Civil PCC.USP



62

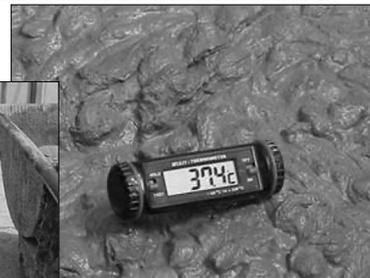
Controle de Materiais



63

Teste de campo

Pilares do estacionamento
Sem gêlo e sem pigmento
slump: 190 mm
Condições desfavoráveis
Temperatura concreto 37° C
Temperatura ambiente 32° C



64



65



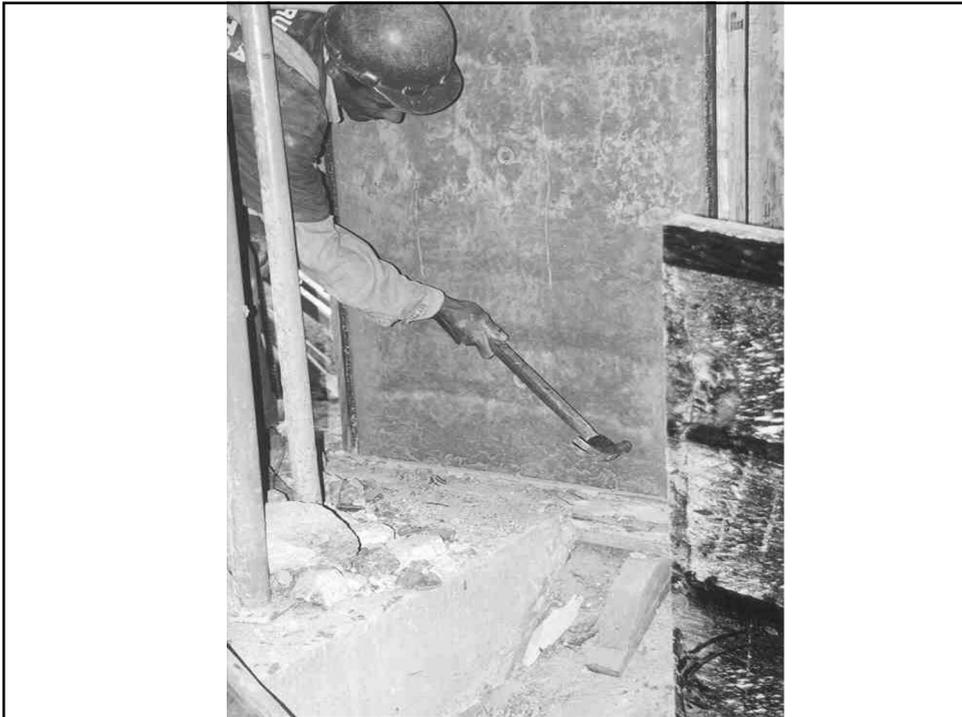
66



67



68



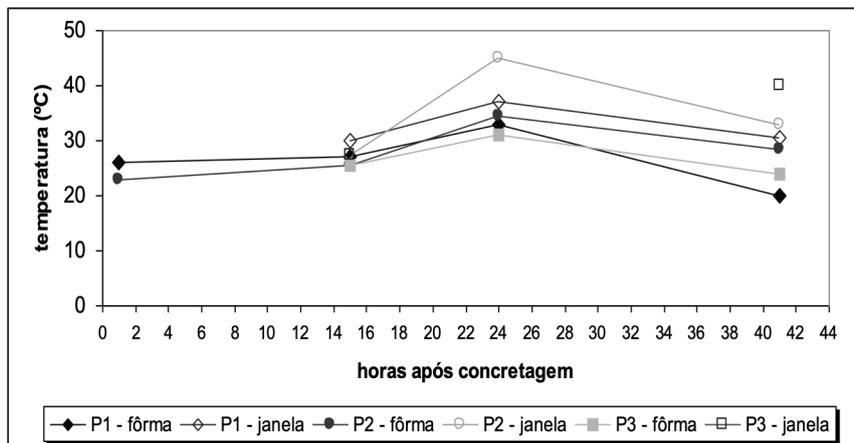
69

Temperatura e Tempos

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	

70

Temperatura do concreto dos pilares



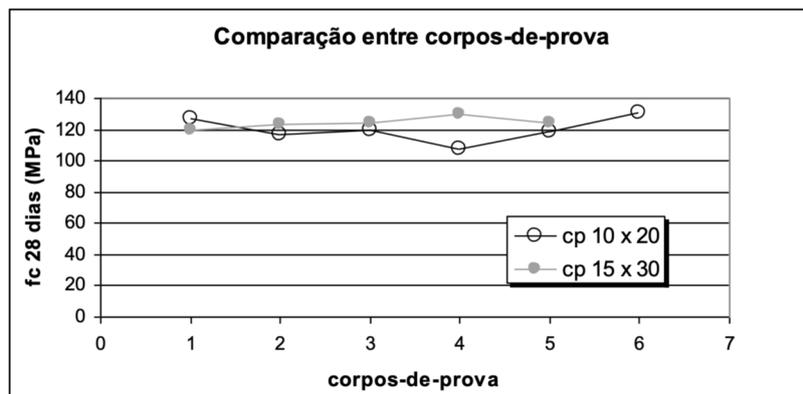
P1 = 133 P2 = 134 P3 = 135

71



72

Resistência à compressão



73

Pilares definitivos

Concreto

slump

14 to 20 cm

**4 m³ por
caminhão**



74

Concretagem dos pilares

- 4 andares de estacionamento, térreo, 2 tipo
- gelo e pigmento
- slump: 14 a 20 cm
- temperatura do concreto 21° C
- temperatura ambiente 22 to 30° C



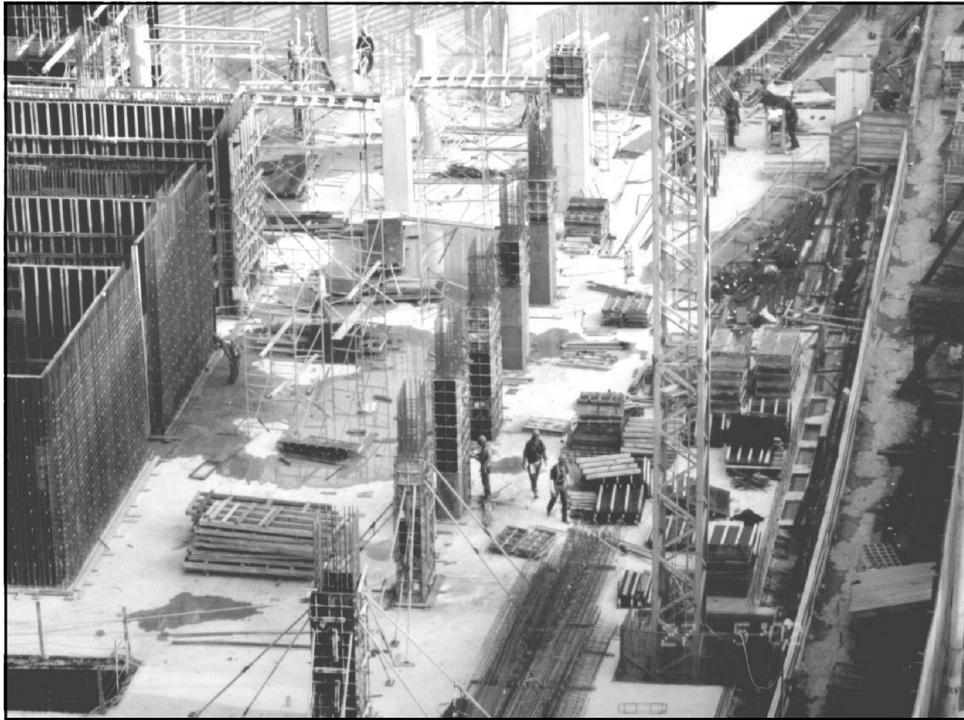
75



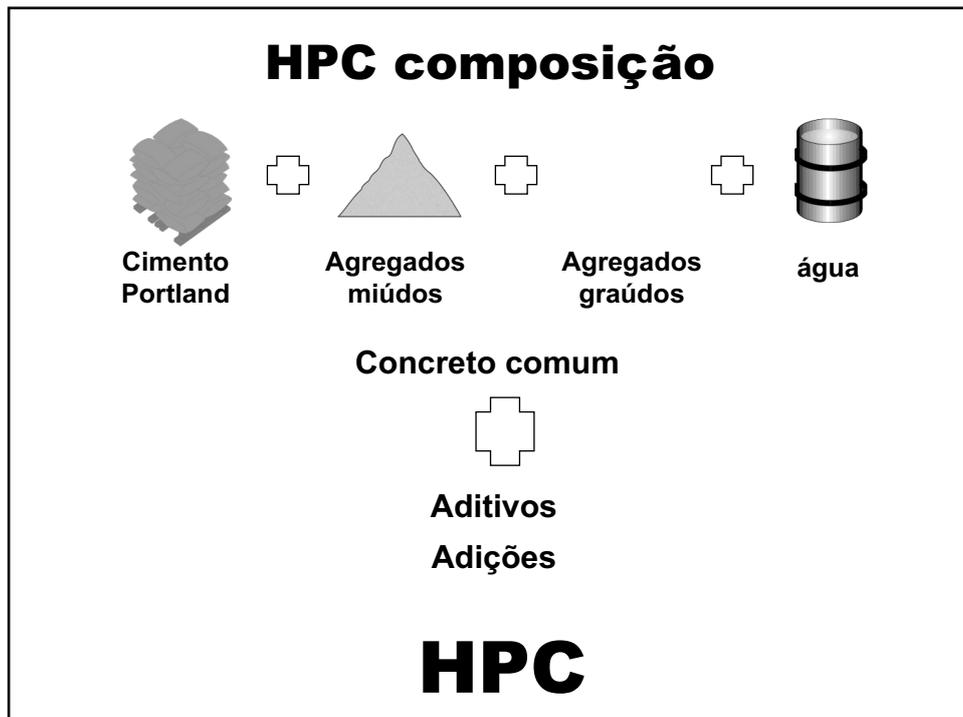
76



77

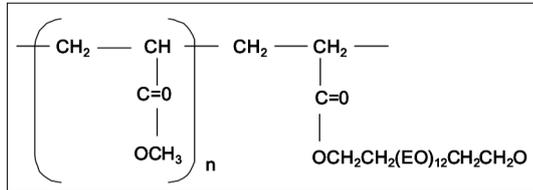


78



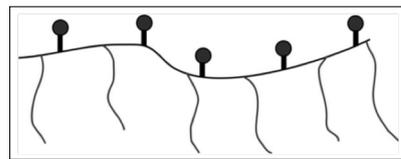
79

POLICARBOXILATO



(a) Monômero de um policarboxilato

- Conhecidos comercialmente como de 3ª geração;
- Redução de até 40% de água da mistura
- Possuem grupos carboxílicos COOH;
- Cadeia lateral longa.



(b) Esquematização da molécula

80

superplastificante

Cimento Portland + Água



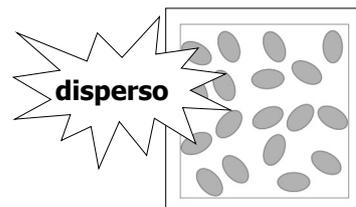
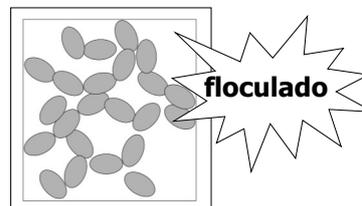
Floculação



aprissonamento de água entre os grãos de cimento

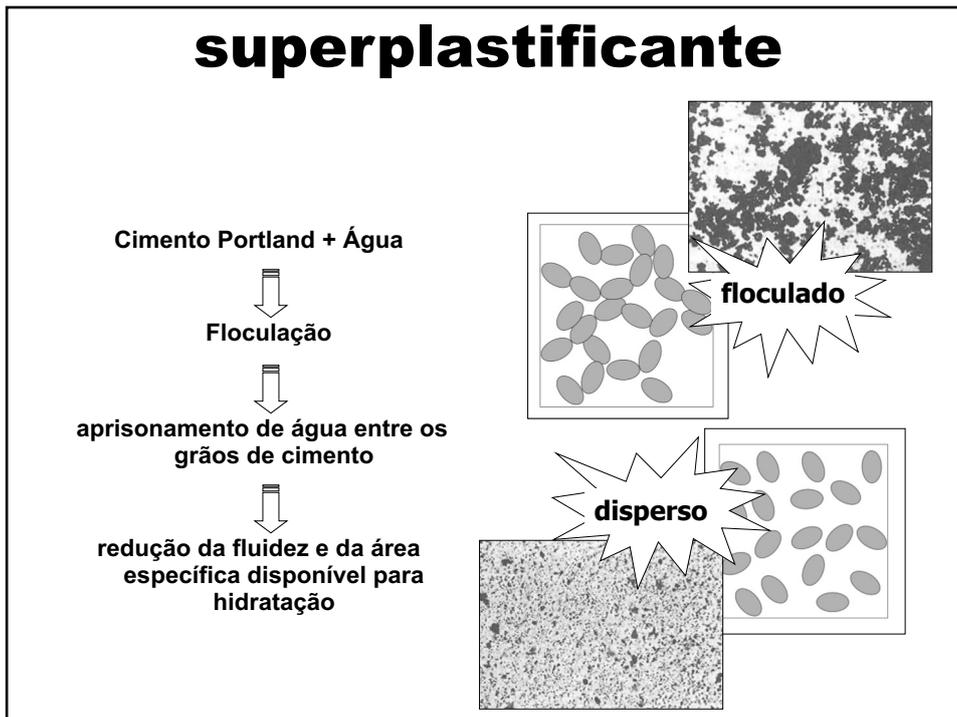


redução da fluidez e da área específica disponível para hidratação



81

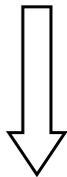
superplastificante



82

Adições Minerais

Para obter maior
compacidade e maior
resistência mecânica



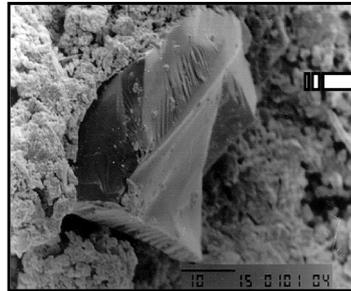
adição de minerais ativos

**Metacaulim e sílica
ativa**

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

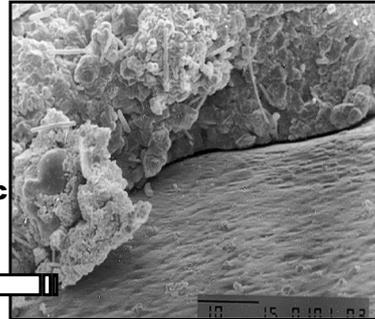
83

Adições Minerais



Aumento 1500x

Concreto corrente

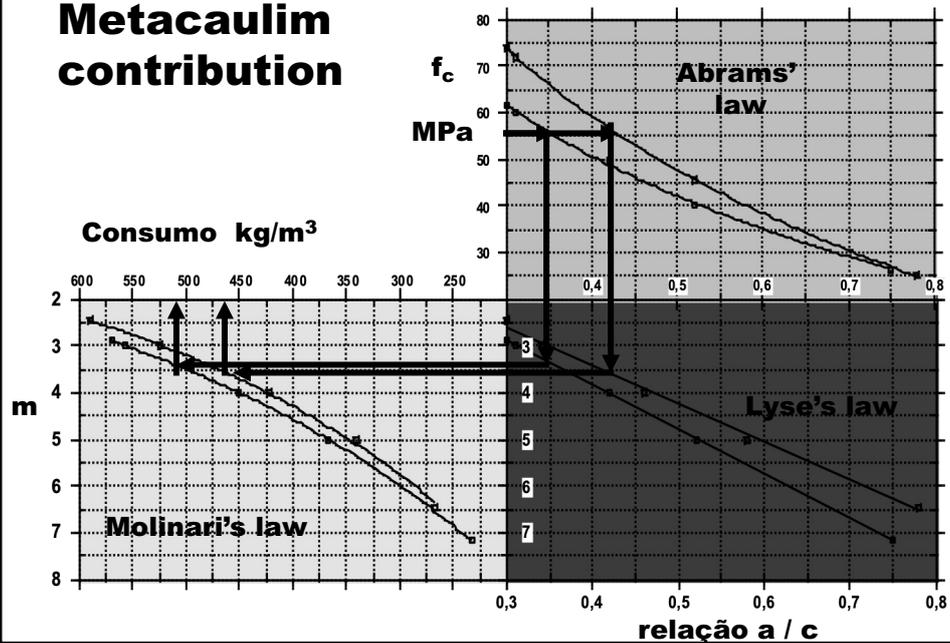


Aumento 1500x

Concreto com Metacaulim

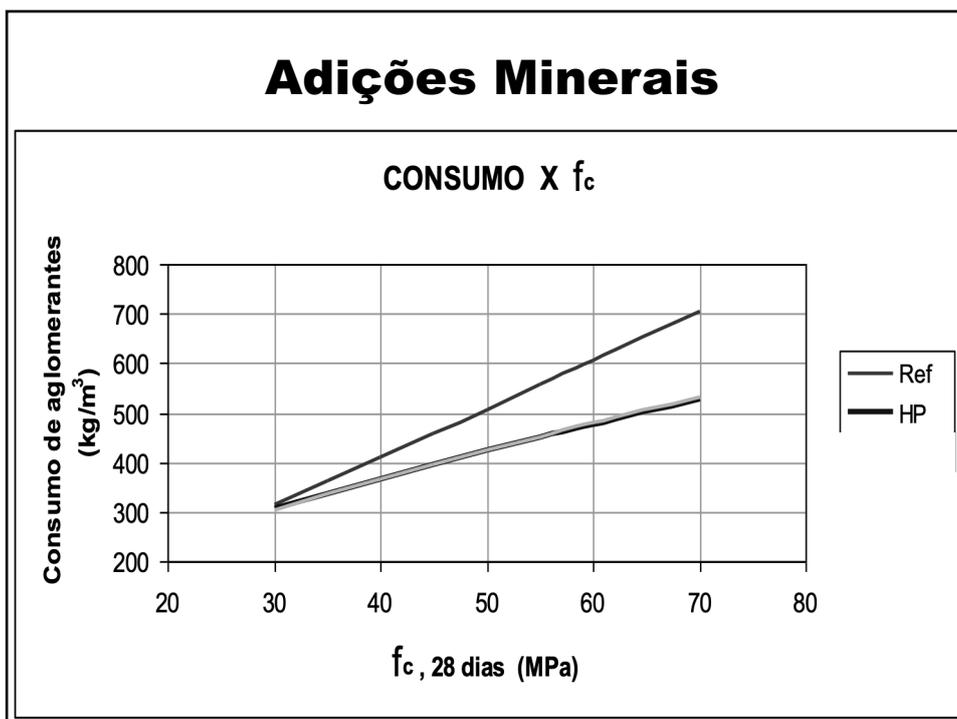
84

Metacaulim contribution



85

Adições Minerais



86

Adições Minerais

fck em MPa	referência cimento kg/m3	silica ativa aglomerantes kg/m3	Metacaulim HP aglomerantes kg/m3	Metacaulim HP cimento kg/m3	Metacaulim HP adição 8% kg/m3
30	314	304	305	281	24
35	361	336	336	309	27
40	409	366	366	337	29
45	458	395	395	363	32
50	506	424	423	389	34
60	605	479	477	439	38
70	704	532	529	487	42

87

PIGMENTO

- ✓ Óxido de ferro Fe_2O_3 > 98%
- ✓ grau 8 de solidez a luz solar
- ✓ 0,5% de sais solúveis
- ✓ 99,95% diâmetro de partícula < 0,045mm (#325) 0,05% de retenção
- ✓ Densidade 4.500 kg/m³
- ✓ Formato Partícula: Esférica
- ✓ EN 12878 y ASTM C 979

88

Concreto

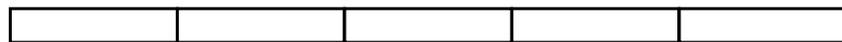
materiais	proporção	quantidade	obs
cimento	1,00	623 kg/m ³	(460 + 163 escória) CPVRS
adição	0,15	93 kg/m ³	silica & metacaulim
agregado graúdo	1,65	1.027 kg/m ³	basalto, 19mm, MF 6,9, 3.020 kg/m ³
agregado miúdo	0,88	550 kg/m ³	quartzo, 2,4mm, MF 2,0, 2.670 kg/m ³
pigmento	0,04	25 kg/m ³	óxido de ferro
superplastificante	0,01	6,2 kg/m ³	policarboxilato
retardador	0,0058	3,6 kg/m ³	ácido hidrocarboxílico
água	0,19	135 kg/m ³	A / C = 0,19

89

CONCRETO FRESCO

Controle de TEMPERATURA

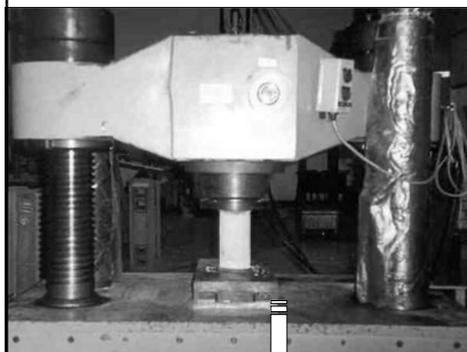
Problemas	Aceitável	Ideal	Aceitável	Problemas
-----------	-----------	-------	-----------	-----------



5° 10° 15° 20° 25° 30°

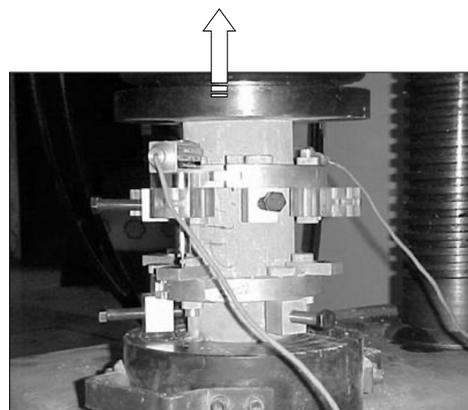
90

Controle rotineiro



**Resistência
à compressão**

**Módulo de
elasticidade**



91



92

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										

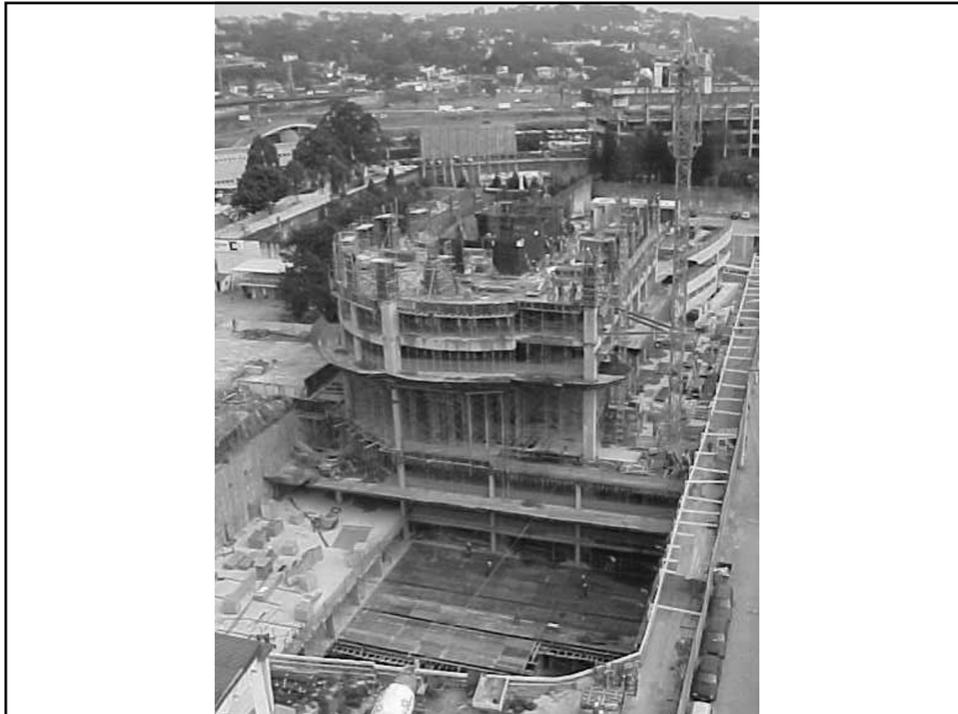
28 dias

93

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	
Average	41.8	47.4	46.6	52.7
Stand. Dev.	0.3	1.3	2.2	2.2
Variab.	0.8	2.7	4.8	4.1
Average			47.1	
Maximum			55.2	
Minimum			41.6	

94



95

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

96

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 cm ³ /cm ²	0,019	0,051

97

Vida Útil utilizando a segunda lei de Fick para agressividade por carbonatação: 980 years!!!!

98

Desenvolvimento Sustentável

“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

99

***Os Arquitetos e os Engenheiros
Constroem os marcos de pujança
de uma civilização.***

***Traduzem sua história,
seus sonhos, seus ideais
em obras imponentes e duráveis
que elevam a auto estima
de seu povo.***

100



***O Concreto de
Elevado
Desempenho é
uma das grandes
oportunidades
atuais de resgatar
essa importância
e vocação da
arquitetura e da
engenharia de
nossos países***

101