



**Concretos Convencionais x
Concreto de Alto Desempenho**
Por quê buscar esse avanço?

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*

21-2 de Novembro de 2002 Centro Brasileiro Britânico São Paulo

1



2



3



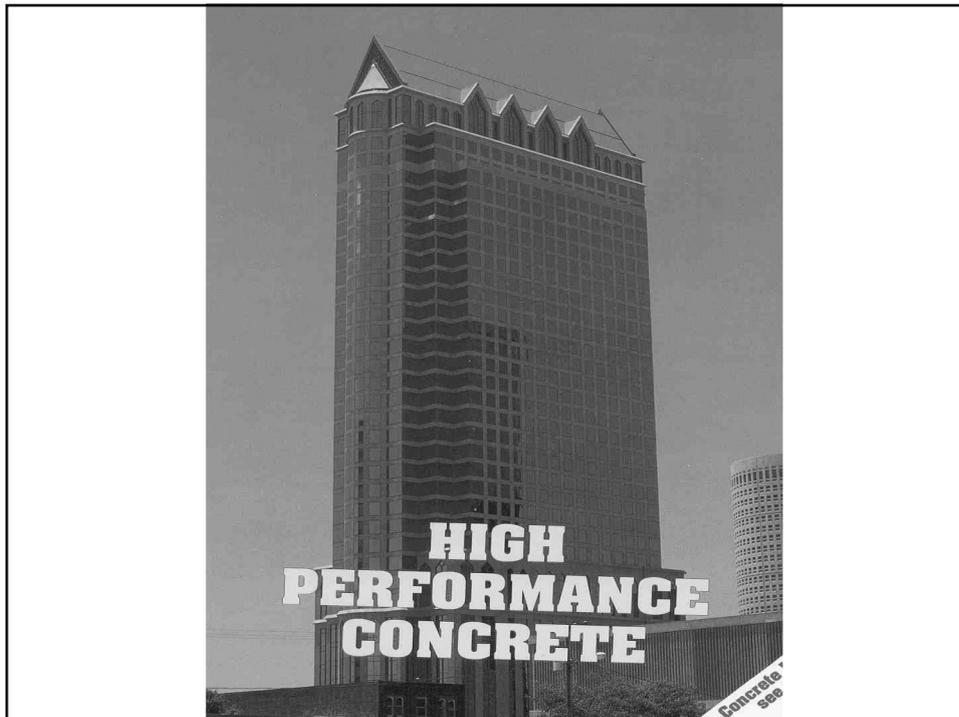
4



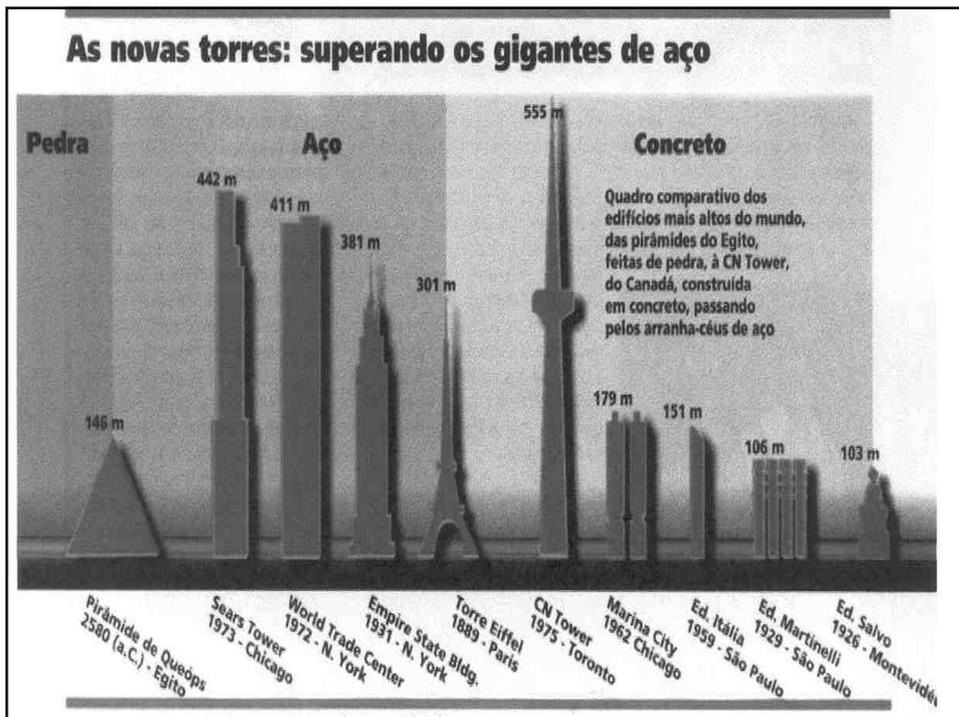
5



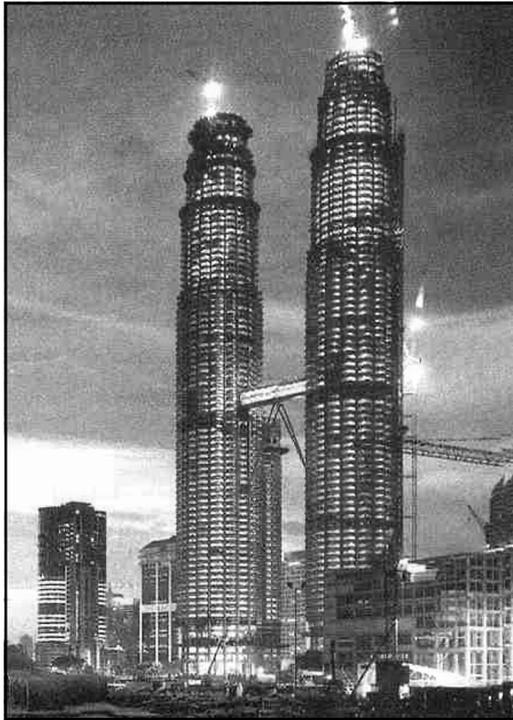
6



9



10



Petronas Towers

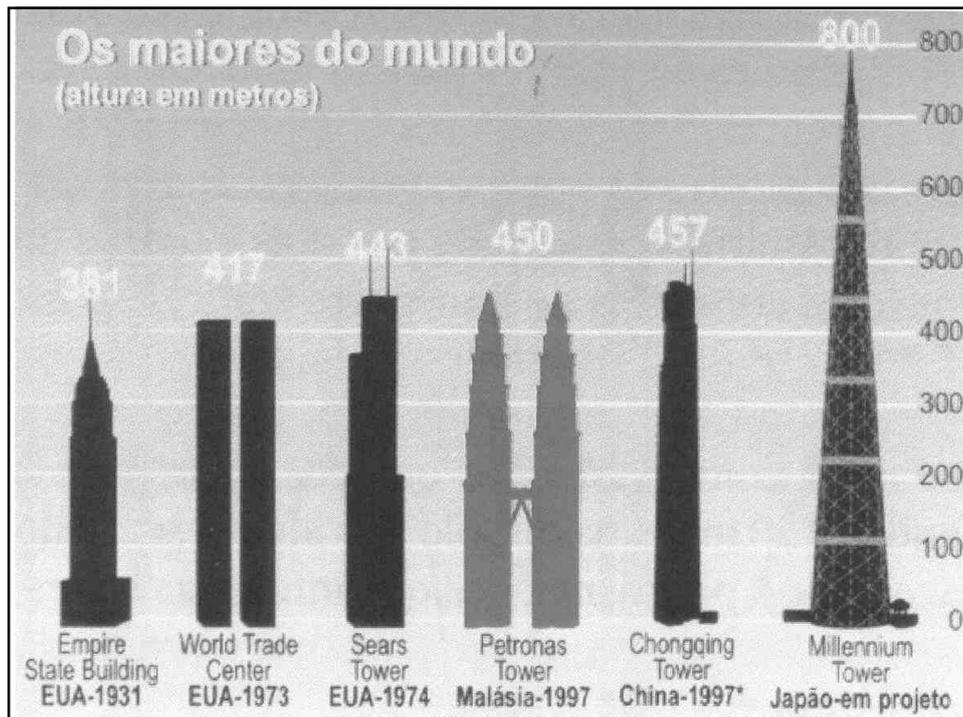
Kuala Lumpur

Malásia 1998

Altura 452 m

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

11



12

Edifício Martinelli SP



Torre Norte SP



16



Edifício Martinelli

São Paulo

1927

25 andares

Altura 106 m

Líbero Badaró

$f_{ck} = 13.5$ MPa

$f'_c = 2,000$ psi

17

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

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

18



Vida Útil

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

19

Cloretos - difusão

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

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

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

20

Cloretos - difusão

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

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

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

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

21

Carbonatação

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

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

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

22

Carbonatação

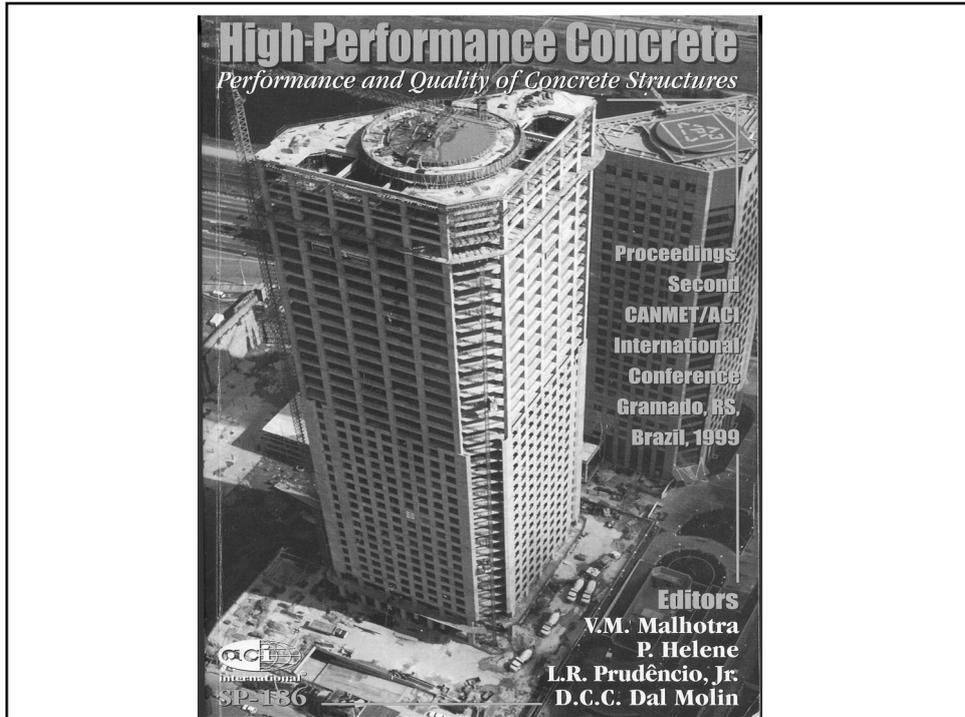
$$e = 2,0 \text{ cm}$$

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

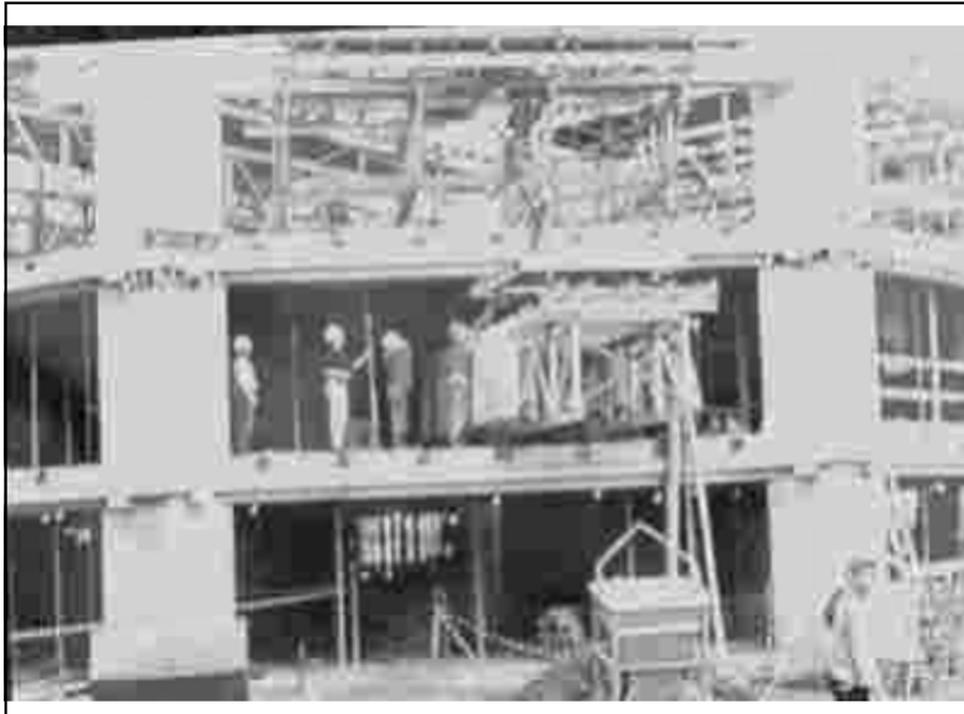
$f_{ck} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 350 \text{ anos}$

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

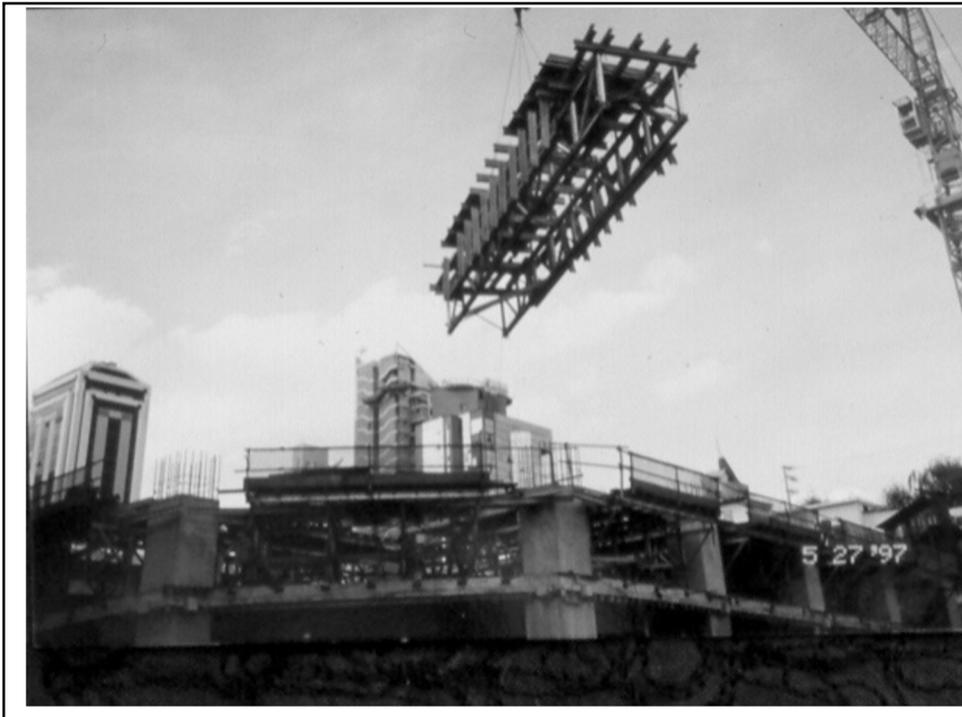
23



26



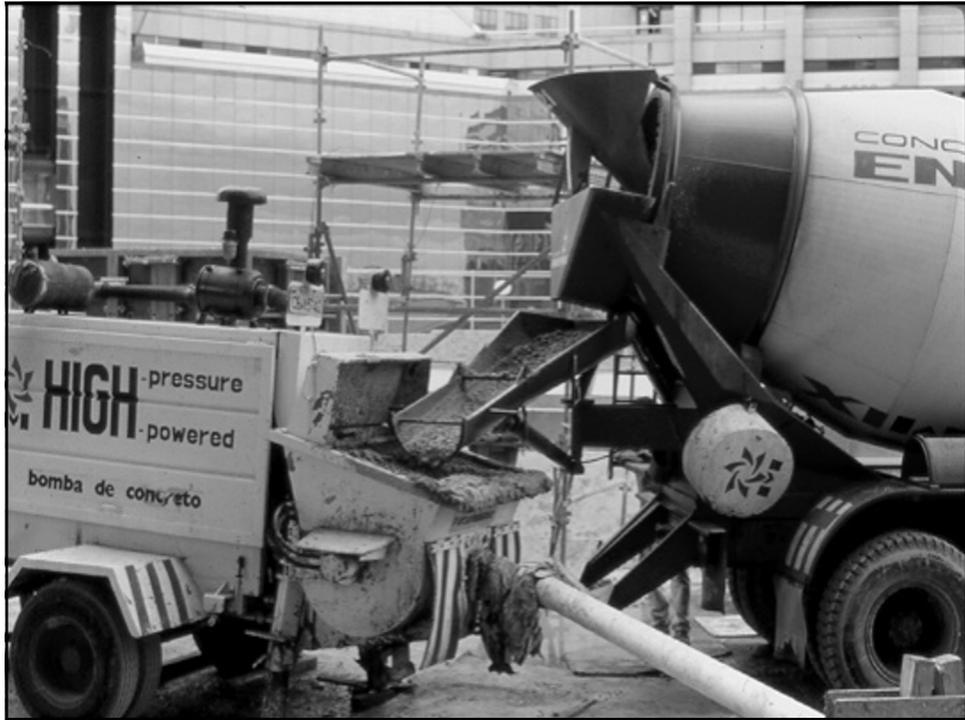
27



28



29



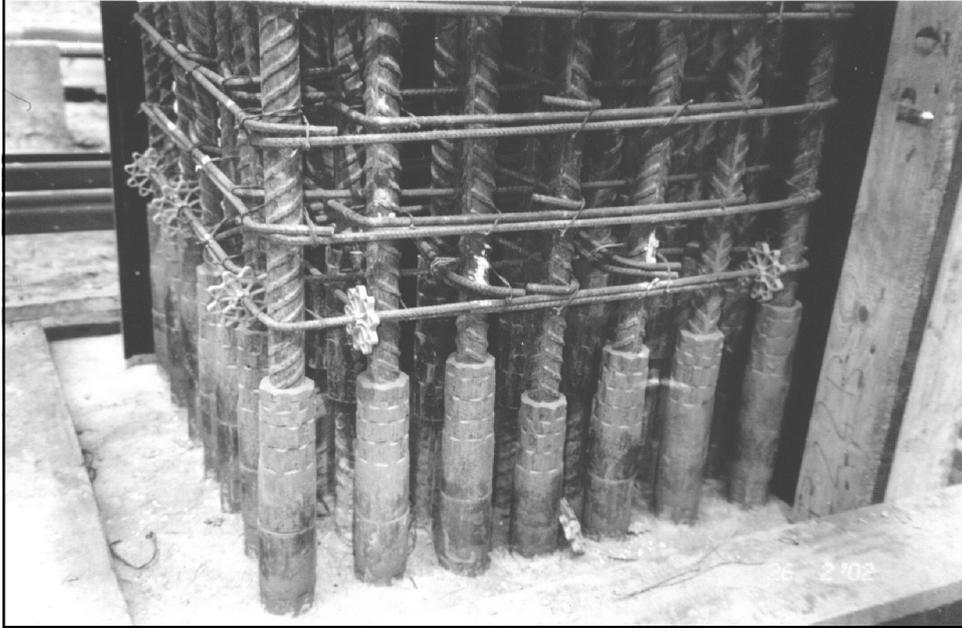
30

Menor Custo Inicial

Ganho de Área

31

construtibilidade



32

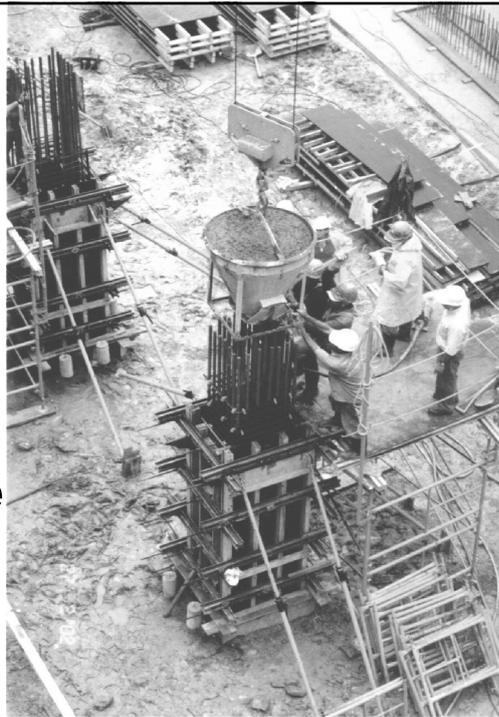


economia de fôrmas

33

lançamento do concreto

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



34

HPC composição



Cimento
Portland



Agregados
miúdos



água

Concreto comum

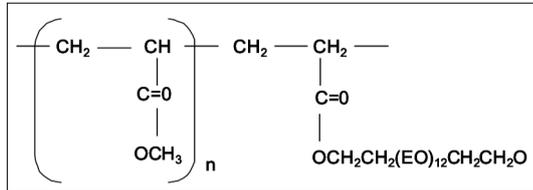


Aditivos
Adições

HPC

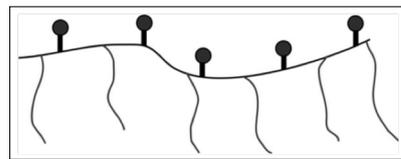
35

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

36

superplastificante

Cimento Portland + Água



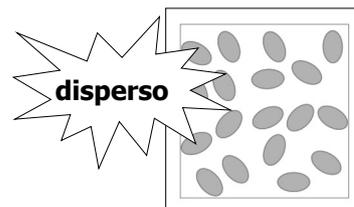
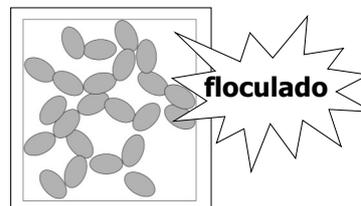
Floculação



aprisionamento de água entre os grãos de cimento

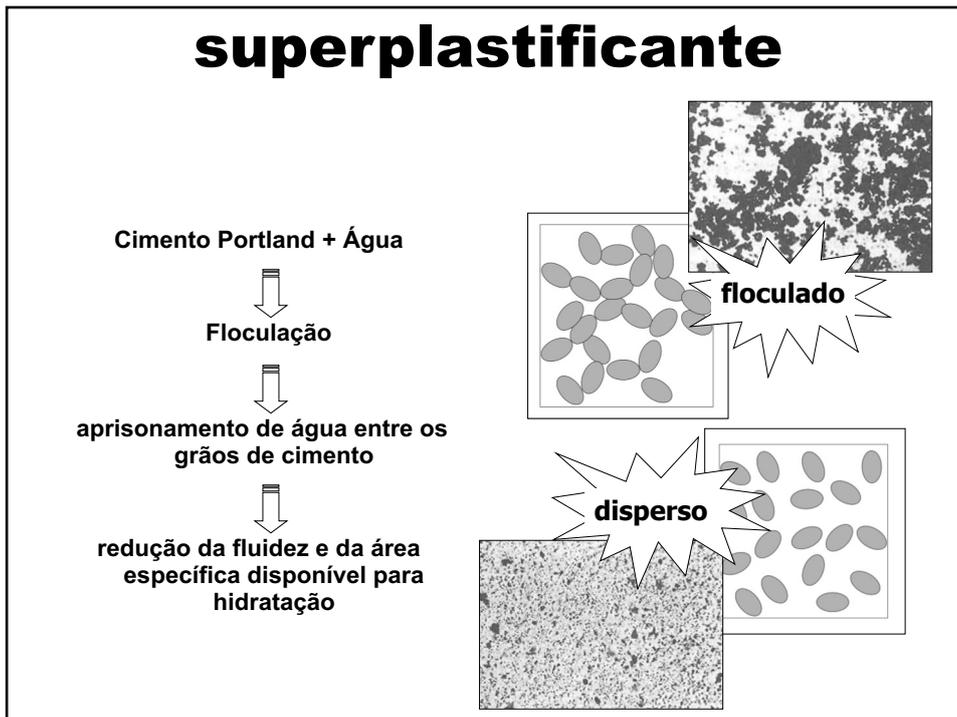


redução da fluidez e da área específica disponível para hidratação



37

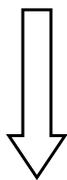
superplastificante



38

Adições Minerais

Para obter maior
compacidade e maior
resistência mecânica



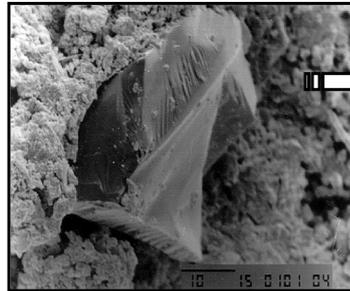
adição de minerais ativos

**Metacaulim e sílica
ativa**

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

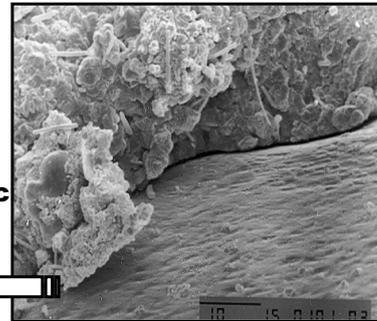
39

Adições Minerais



Aumento 1500x

Concreto corrente



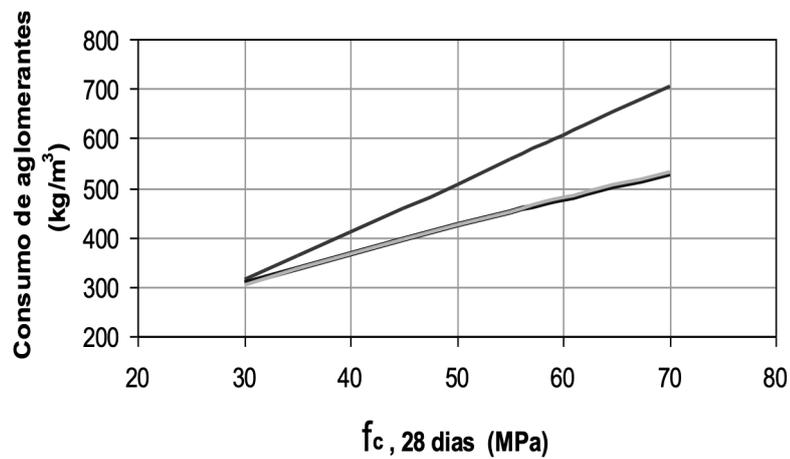
Aumento 1500x

Concreto com
adições

40

Adições Minerais

CONSUMO X f_c



42

CONTROLE do CONCRETO

43

CONCRETO FRESCO Controle de TEMPERATURA

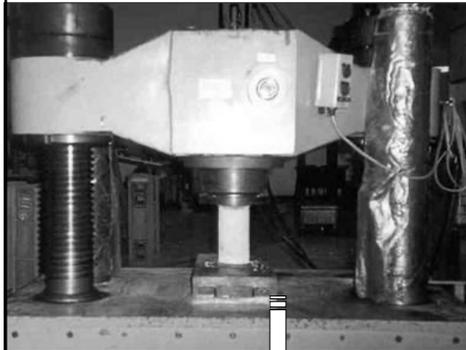
| | | | | |
|------------------|------------------|--------------|------------------|------------------|
| Problemas | Aceitável | Ideal | Aceitável | Problemas |
|------------------|------------------|--------------|------------------|------------------|



5° 10° 15° 20° 25° 30°

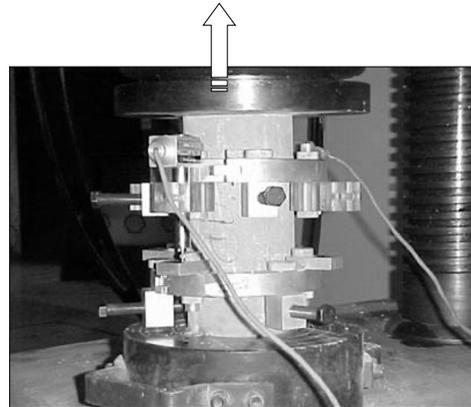
44

Controle rotineiro



**Resistência
à compressão**

**Módulo de
elasticidade**



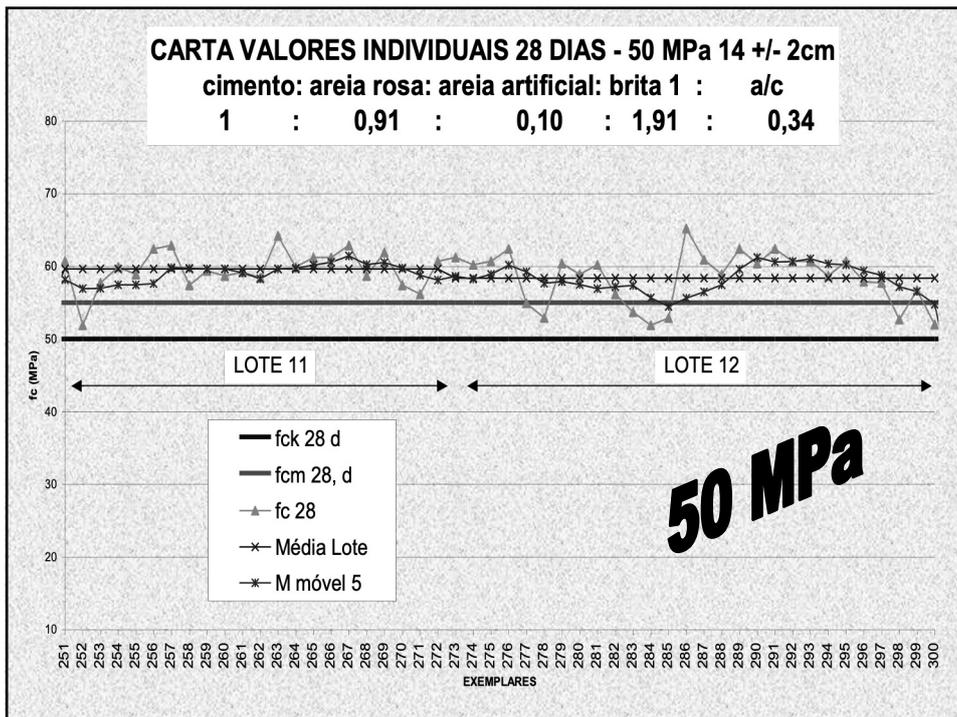
45



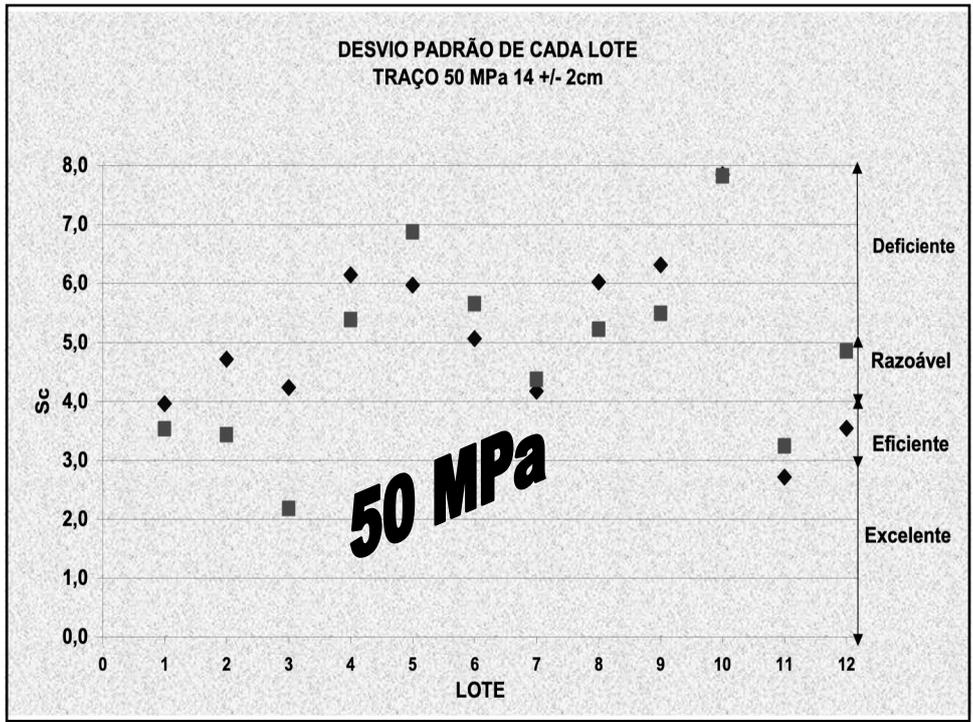
46

| CONTROLE DOS RESULTADOS | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|----------|-------------------------------------|----------------|--------------|------|--------------|------|---------|--------------|---------------------|---|
| RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS 10 X 20 | | | | | | | | | | | | |
| Interessado: CONSTRUTORA INPAR | | | Abatimento 14 +/- 2 cm | | | | | | | | | |
| Obra: CONTINENTAL SQUARE FARIA LIMA | | | fck: 50 MPa última revisão 24/04/02 | | | | | | | | | |
| Nº | LOTE | SÉRIE Nº | NOTA FISCAL Nº | DATA MOLDA GEM | 7 DIAS | | 28 DIAS | | 63 DIAS | | ELEMENTO CONCRETADO | |
| | | | | | Data Ruptura | fc 7 | Data Ruptura | cp 1 | cp 2 | Data Ruptura | | fc 63 |
| 273 | LOTE 12 | 3087 | 6897 | 14/2/02 | 21/02/02 | 51,7 | 14/3/02 | 61,2 | 59,9 | 18/4/02 | 63,2 | P27 e P19 |
| 274 | | 3088 | 6701 | 14/2/02 | 21/02/02 | 50,4 | 14/3/02 | 60,2 | 57,4 | 18/4/02 | 61,7 | P19 e P26 |
| 275 | | 3092 | 6730 | 15/2/02 | 22/02/02 | 46,7 | 15/3/02 | 60,7 | 59,9 | 19/4/02 | 62,4 | Pré-laje do 5º pavimento do Comercial |
| 276 | | 3093 | 6731 | 15/2/02 | 22/02/02 | 49,4 | 15/3/02 | 62,4 | 61,9 | 19/4/02 | 63,4 | Pilares P08 e P09 |
| 277 | | 3094 | 6736 | 15/2/02 | 22/02/02 | 44,3 | 15/3/02 | 54,9 | 54,2 | 19/4/02 | - | Laje pré-moldada e pilares do pavimento do Comercial |
| 278 | | 3138 | 6781 | 16/2/02 | 23/02/02 | 41,7 | 16/3/02 | 52,9 | 52,4 | 20/4/02 | 55,4 | Cabeça de pilares do pavimento e laje do Comercial |
| 279 | | 3188 | 6820 | 18/2/02 | 25/02/02 | 51,9 | 18/3/02 | 60,4 | 59,4 | 22/4/02 | 61,9 | Escada do P10 ao P11 e 1º ao 2º mezanino |
| 280 | | 3222 | 6900 | 20/2/02 | 27/02/02 | 51,4 | 20/3/02 | 58,9 | 57,4 | 24/4/02 | 59,9 | Pilares do 5º pav. Do Comercial - P17,22,23 |
| 281 | | 3223 | 6902 | 20/2/02 | 27/02/02 | 51,2 | 20/3/02 | 60,2 | 58,7 | 24/4/02 | 53,2 | Pilares do 5º pav. Do Comercial - P23,14,16 |
| 282 | | 3224 | 6906 | 20/2/02 | 27/02/02 | 46,4 | 20/3/02 | 56,2 | 55,4 | 24/4/02 | - | Pilares do 5º pav. Do Comercial - P16,18,04,03 |
| 283 | | 3225 | 6909 | 20/2/02 | 27/02/02 | 45,2 | 20/3/02 | 53,7 | 53,2 | 24/4/02 | 54,9 | Pilares do 5º pav. Do Comercial - P03,07 |
| 284 | | 3226 | 6916 | 20/2/02 | 27/02/02 | 41,5 | 20/3/02 | 51,9 | 51,2 | 24/4/02 | 53,7 | Escada |
| 285 | | 3231 | 6949 | 21/2/02 | 28/02/02 | 46,2 | 21/3/02 | 52,9 | 51,4 | 25/4/02 | - | Pilares do 5º pavimento do Comercial - P13,P24,P25 |
| 286 | | 3232 | 6953 | 21/2/02 | 28/02/02 | 51,2 | 21/3/02 | 65,2 | 65 | 25/4/02 | - | Pilares do 5º pavimento do Comercial - P21 e P02 |
| 287 | | 3265 | 6992 | 22/2/02 | 01/03/02 | 49,3 | 22/3/02 | 60,9 | 59,4 | 26/4/02 | - | Pilar do Comercial - P15 e Pré laje |
| 288 | | 3266 | 6997 | 22/2/02 | 01/03/02 | 52,4 | 22/3/02 | 58,9 | 57,9 | 26/4/02 | - | Pilar do Comercial - P15 e Pré laje |
| 289 | | 3267 | 7006 | 23/2/02 | 02/03/02 | 54,2 | 23/3/02 | 62,4 | 61,9 | 27/4/02 | - | Pilares do 5º pav. com. P10,P29,P28,P01,P06 e P20 |
| 290 | | 3268 | 7001 | 23/2/02 | 02/03/02 | 54,4 | 23/3/02 | 60,4 | 60,2 | 27/4/02 | - | Pilares do 5º pav. com. P10,P29,P28,P01,P06 e P21 |
| 291 | | 3269 | 7015 | 23/2/02 | 02/03/02 | 59,2 | 23/3/02 | 62,4 | 61,7 | 27/4/02 | - | Pilares do 5º pav. com. P10,P29,P28,P01,P06 e P22 |
| 292 | | 3270 | 7024 | 23/2/02 | 02/03/02 | 54,2 | 23/3/02 | 60,7 | 59,9 | 27/4/02 | - | Pilares do 5º pav. com. P10,P29,P28,P01,P06 e P23 |
| 293 | | 3271 | 7040 | 23/2/02 | 02/03/02 | 57,4 | 23/3/02 | 60,7 | 60,2 | 27/4/02 | - | Pilares do 5º pav. com. P10,P29,P28,P01,P06 e P24 |
| 294 | | 3290 | 7070 | 25/2/02 | 04/03/02 | 55,7 | 25/3/02 | 58,7 | 58,4 | 29/4/02 | - | Pré laje do 5º pavimento e P05 do 5º pavimento |
| 295 | | 3291 | 7074 | 25/2/02 | 04/03/02 | 53,7 | 25/3/02 | 60,7 | 58,7 | 29/4/02 | - | Pilares do 5º pavimento - P12,27,26 |
| 296 | | 3292 | 7079 | 25/2/02 | 04/03/02 | 53,2 | 25/3/02 | 57,9 | 57,7 | 29/4/02 | - | Pilar P26 da escada do 3º pavimento do Comercial |
| 297 | | 3304 | 7107 | 26/2/02 | 05/03/02 | 42,5 | 26/3/02 | 57,7 | 56,9 | 30/4/02 | - | Pilar do 5º pavimento do Comercial - P11 |
| 298 | | 3305 | 7113 | 26/2/02 | 05/03/02 | 44,1 | 26/3/02 | 52,7 | 52,4 | 30/4/02 | - | Pilares do setor B do térreo - P12,19 e 24 |
| 299 | | 3351 | 7156 | 27/2/02 | 06/03/02 | 48,1 | 27/3/02 | 56,7 | 53,9 | 1/5/02 | - | Cabeça dos pilares do 5º pav. com. P16,17,18,22,24 e 25 |
| 300 | | 3633 | 7655 | 15/3/02 | 22/03/02 | 43,7 | 12/4/02 | 52,4 | 51,4 | 17/5/02 | - | Laje pré-moldada do 5º pavimento do Comercial |

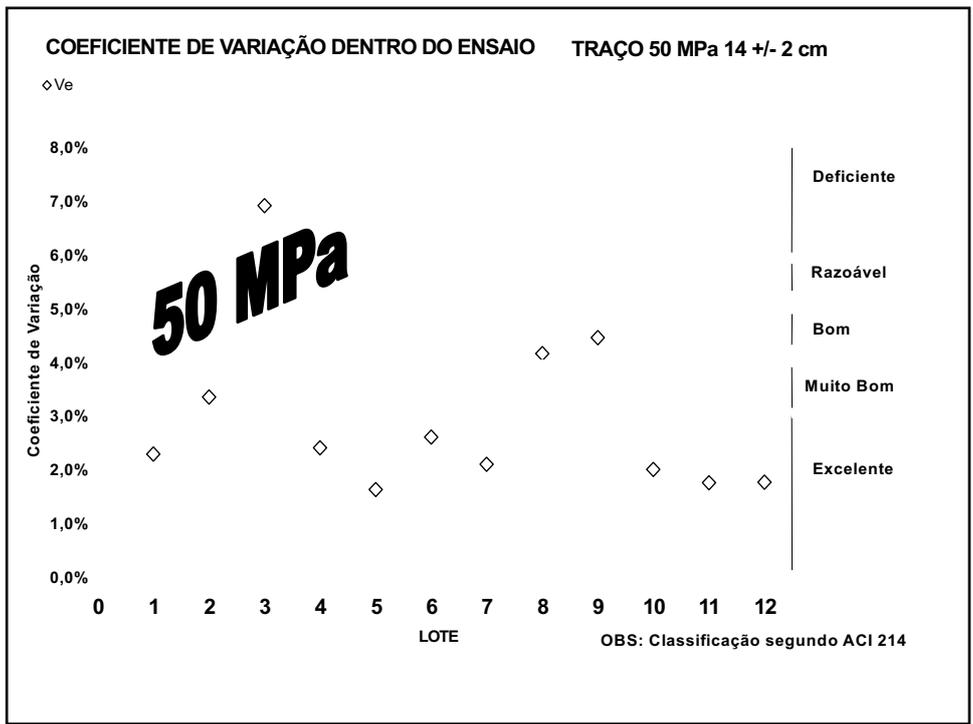
51



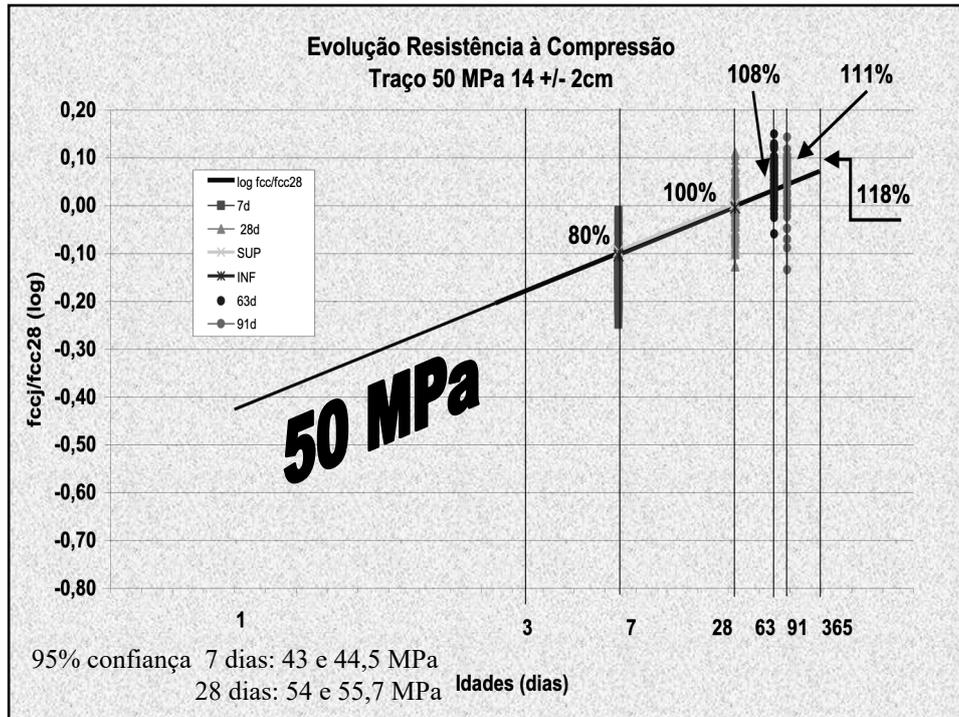
52



53



54



55

Propriedades mecânicas

| | | | |
|----------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | | $\square f_{ck} = 115 \text{ MPa}$ | $\square f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ |
| | | $\square f'_c = 17,000 \text{ psi}$ | $\square f'_c = 3,600 \text{ psi}$ |
| 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 |

56

Durabilidade

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

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

Carbonatação

28+63d 25°C 65% 5%

| | | |
|--|------------------------------|------------------------------|
| Carbonatação | zero | 29mm |
| Absorção H₂O | 0,40% | 7,5% |
| Volume de vazios | 1% | 17,5% |
| Densidade | 2530 kg/m³ | 2310 kg/m³ |
| absorção capilar | 0,1 g/cm² | 2,7 g/cm² |
| Ascensão capilar | 0 cm | 30 cm |
| Cloretos | 43 C | 8.400 C |
| Abrasão cm³/cm² | 0,019 | 0,051 |

57

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

58

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

59

CONSTRUTORA → Diálogo

- ▼ **Proprietário**
- ▼ **Arquiteto**
- ▼ **Projetista de Estruturas**
- ▼ **Produtor de Concreto**
- ▼ **Tecnologista Concreto**

60

***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.***

61



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

62