



Sustentabilidade das Estruturas de Concreto

Tecnologia das Estruturas de Concreto

visão atualizada e sucinta

São Paulo, 25 e 27 de novembro de 2008

1

Arte e Ciência da Construção

Marcus Vitruvius Pollio (*Engenheiro / Arquiteto Romano*)

40 anos aC → "*De Architectura*"

10 volumes → 800 anos como best - seller

Utilitas

(funcional)

Firmitas

(estável e durável)

Venustas

(bonita)

Até hoje pode-se considerar como os grandes marcos da pesquisa, da inovação e do desenvolvimento em construção civil

direitos reservados



2

Arte e Ciência da Construção

Marcus Vitruvius Pollio (*Engenheiro / Arquiteto Romano*)

40 anos aC → "De Architectura"

Sustentável

Ace hoje pode-se considerar como os grandes marcos da pesquisa, da inovação e do desenvolvimento em construção civil

direitos reservados



3

Water - The next world crisis on the horizon ?

- Estimated 500 million people on the planet live in countries critically short of water.
- By 2025, the above number will leap to 3 billion.

Globe and Mail, June 2001

direitos reservados



4

Water (cont'd)

The World Commission on Water estimates that the demand for water will increase by around 50% in the next 30 years. Moreover, around 4 billion people – one half the world's population – will live in conditions of severe water stress, meaning they will not have enough water for drinking and washing to stay healthy, by 2025.

**The Economist
July 30, 2005**

5

Water consumption by Continent

Continent	Water Consumption Litres/day
North America	600
Europe	300
Africa	30

6

Como pode o setor de cimento e concreto contribuir para o movimento global de Sustentabilidade na construção civil?

direitos reservados



7

Juramento do Engenheiro

“ Prometo sob juramento observar os postulados da ética profissional, concorrer para o desenvolvimento da técnica, da ciência e da arte e bem servir aos interesses da sociedade e da nação”.

“este é o juramento dos engenheiros utilizado na colação de grau da POLI.”

direitos reservados



8

Concreto e Sustentabilidade

1. Sustentabilidade na construção civil

2. Concreto

Materiais constitutivos

Concreto com agregados reciclados

Concreto auto-adensável - SCC

Concreto de elevada vida útil

Concreto de alta resistência – HSC

direitos reservados



9

Construção Civil

tempo – custo – qualidade (trinômio clássico)

- PRODUÇÃO → pós-guerra
- CAMINHO CRÍTICO → anos 60
- DESEMPENHO → anos 70, ISO 6241
- QUALIDADE → anos 80, ISO 9000
- Gestão AMBIENTAL → anos 90, ISO 14000
- VIDA ÚTIL → anos 00, ISO 15686
- Produtividade, Re-engenharia, Lean Construction (*Toyota Production System*), Life Cycle Cost, Life Cycle Analysis, Life Cycle Assessment, Inovação Tecnológica
- SUSTENTABILIDADE → 2005

direitos reservados



10

Por que tantas “palavras de ordem” ?

- ✓ criar novos desafios;
- ✓ impulsionar o conhecimento;
- ✓ alcançar o desenvolvimento;
- ✓ superar a inércia da acomodação.

→ *Maior aproveitamento dos países desenvolvidos.*

→ *Na Construção Civil e em especial o CONCRETO pode e tem acompanhado o movimento internacional*

direitos reservados



11

Revolução Industrial 1750 ...

→ carvão 1750-1850; → petróleo; → nuclear, hidroelétrica, → gás, renovável
→ gerou inúmeros benefícios porém hoje há *quase* consenso sobre a necessidade de redução:

- do aquecimento global e
- do consumo de fontes de energia não renováveis

direitos reservados



12

Cronologia da Sustentabilidade:

- 1972 → Clube de Roma
 livro → “Limites do Crescimento”
- 1972 → “ONU Declaration on the Human Environment” *26 princípios*
- 1980 → “IUCN World Conservation Strategy”
 introduziu o termo sustentabilidade
- 1987 → “ONU Brundtland Commission”
 definiu o termo sustentabilidade

direitos reservados



13

- 1992 → ECO 92 no Rio de Janeiro
 → “Agenda 21” *com 40 cap. 4 partes e 900 p.*
1. Sociais e Econômicos
 2. Conservação e Gestão dos Recursos
 3. Fortalecer Grupos Majoritários
 4. Meios de Implementação
- 1997 → Protocolo de Kyoto:
 *em 2020 emitir 6% menos gases estufa
 que em 1990 → países desenvolvidos*

direitos reservados



14

Sustentabilidade

“...é o desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer as do futuro...”

Ambiental – Social - Econômica

direitos reservados



15

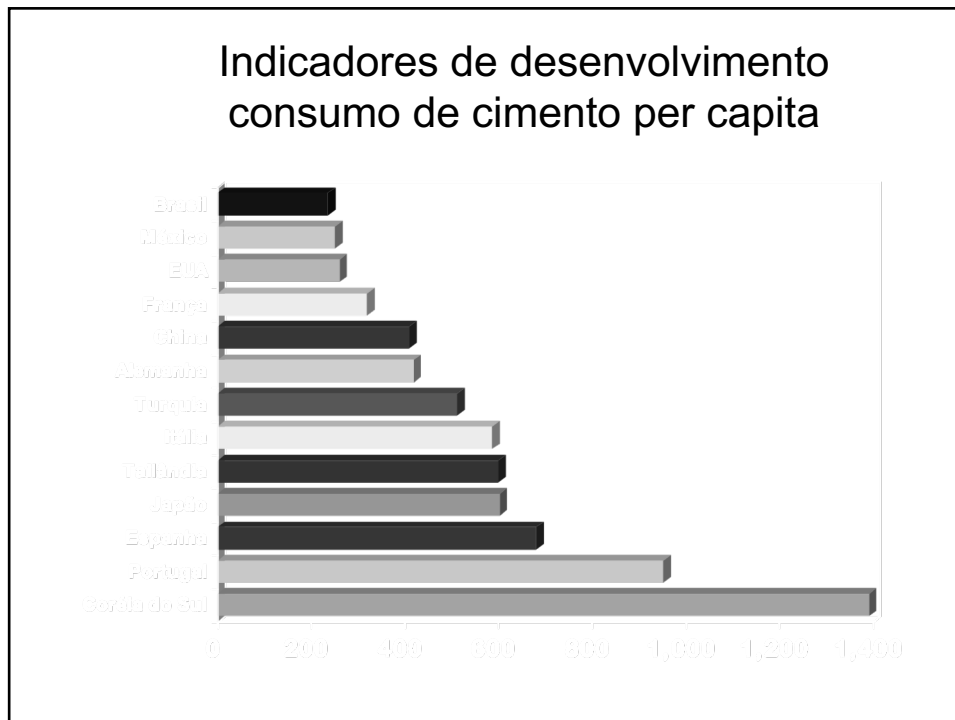
Qual a relação entre desenvolvimento e produção de concreto, o mais consumido material industrial?

→ população mundial crescente
→ precisa de muitos empregos → precisa de muita infra-estrutura → precisa da construção civil → precisa das estruturas de concreto

direitos reservados



16



17

Paradoxo !

Como o consumo de cimento e de concreto que são utilizados como índices de desenvolvimento de uma nação, podem, ao mesmo tempo serem utilizados como índice de degradação do meio ambiente?

Uma das respostas está em pensar na estrutura, na obra, no produto final, e não nos materiais isoladamente

direitos reservados

CYRELA
BRAZIL REALTY

18

Edificação - Emissões de GWP (CO₂)

Visão holística:

Vida Útil funcional;
Vida Útil econômica;
Vida Útil técnica

*Considerando uma vida útil de 50 anos para
uma habitação de classe média estima-se:*

direitos reservados



19

Edificação - Emissões de GWP

Visão holística:

Na etapa de construção: (1,5 anos)

- consome 40% da energia total
- gera 40% a 60% de resíduos

Na etapa de uso: (50 anos)

- consome 50% da energia elétrica total
- consome 20% da energia total

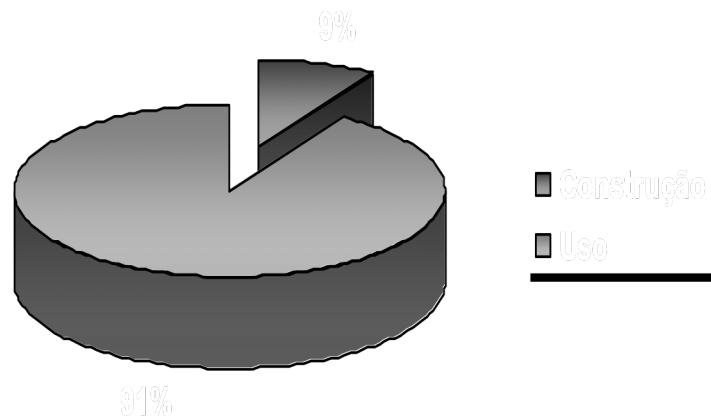
direitos reservados



20

Edificação - Emissões de GWP

Visão holística: *operação e uso*



direitos reservados



21

O desperdício no concreto é de 2% a 5% enquanto na Construção Civil...



direitos reservados



22

Como caminhar em direção à SUSTENTABILIDADE nas estruturas de concreto?

direitos reservados



23

Alternativas ou caminhos

1. atuar sobre os materiais
2. empregar agregados reciclados
3. empregar concreto auto-adensável
4. empregar concreto de elevada vida útil
5. empregar concreto de alta resistência

direitos reservados



24

Como alcançar SUSTENTABILIDADE nas estruturas de concreto?

1. Atuando sobre os materiais constitutivos:

- cimento
- agregado miúdo
- agregado graúdo
 - água;
 - aditivos;
- armadura / aço;
- fôrma

direitos reservados



25

Cimento sem Pó

- Nova tecnologia de cimento com aditivos que promove a eliminação do pó
- Contribui para eliminação do desperdício de material e, principalmente, impede a inalação do cimento (saúde)

direitos reservados



26

Cimento sem Pó



direitos reservados



27

REDUZINDO Consumo de Energia

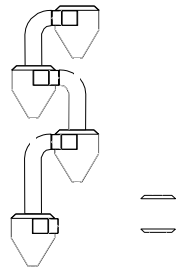
CO-PROCESSAMENTO

direitos reservados

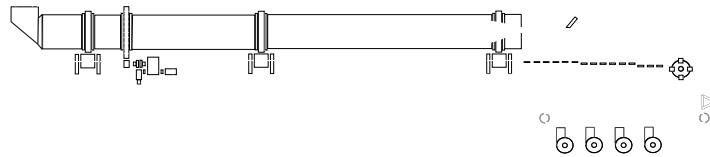


28

Linha de produção moderna



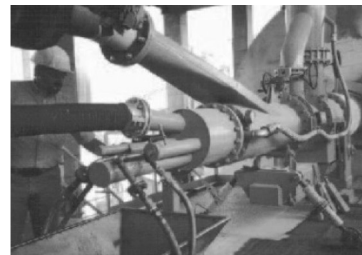
- 97% via seca
- Pré-aquecedor / pré-calcinador
- Queimadores multcombustíveis
- Eficiência energética
 - Térmica = 825 kcal / kg clínquer
 - Elétrica = 107 kWh / t cimento
 (Consumo específico médio)



29

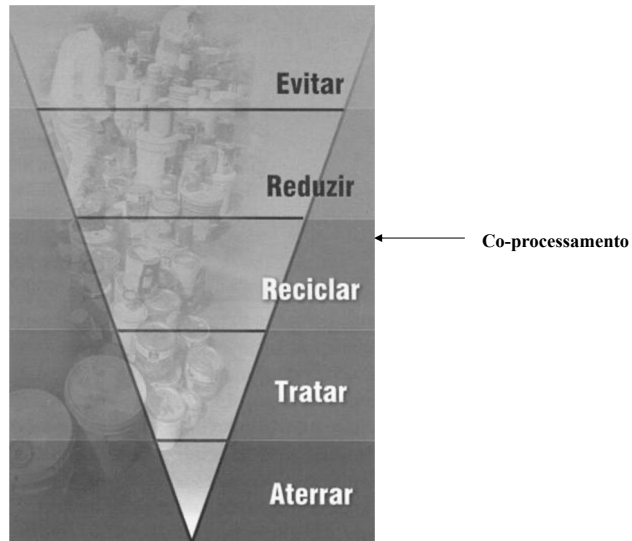
Maçarico multi-combustíveis

- Adaptação às alternativas de combustíveis disponíveis no mercado
- Canais para introdução de vários resíduos e combustíveis simultaneamente



30

Hierarquia da gestão de resíduos



direitos reservados

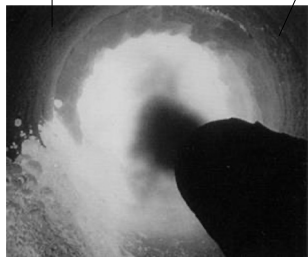


31

Volumes co-processados

1991 a 2003
~
1,6 milhão t

Atual
~
800 mil t / ano



Potencial da indústria
cimenteira nacional
~
1,5 milhão t resíduos/ano

direitos reservados



32

Exemplos comparativos

- EUA:
 - 1,2 milhões t / ano resíduos co-processados
 - 19% do consumo de energia térmica
- União Européia:
 - 3 milhões t / ano
 - 250 fábricas entre os 15 países-membros
 - 10% do consumo de energia térmica

direitos reservados



33

REDUZINDO
Consumo de Energia

INCORPORAÇÃO DE
REJEITOS INDUSTRIAIS

direitos reservados



34

atuando no processo

Adições

- **ESCÓRIAS**
 - subproduto da fabricação do ferro gusa (siderurgia) → CP III (29% do CPI)
- **CINZAS VOLANTES (pozolanas)**
 - subproduto de usinas termo-elétricas → CP IV (49% do CP I)
- **FÍLER CALCÁRIOO → CP II**
 - - pó das pedreiras (82% do CP I)

direitos reservados



35

justificativas para o uso das adições

- **TÉCNICAS:** melhoria de propriedades específicas
- **ECONÔMICAS:** redução de custos, diminuição do consumo energético
- **ECOLÓGICAS:** aproveitamento de resíduos poluidores
- **ESTRATÉGICAS:** preservação das jazidas

direitos reservados



36

Como alcançar SUSTENTABILIDADE nas estruturas de concreto?

2. Empregando concretos com agregados reciclados a partir de entulho gerado por construções novas ou demolições

direitos reservados



37

Agregados reciclados



- Reciclados de base cimentícia (concreto e argamassas)
- Reciclados de base cerâmicas (pisos, alvenarias)
- Substituição de 20% a 50% do agregado miúdo e graúdo sem prejuízo da resistência e da durabilidade

38

Como alcançar SUSTENTABILIDADE nas estruturas de concreto?

3. Empregando concreto auto- adensável de elevado desempenho CAA ou SCC

direitos reservados

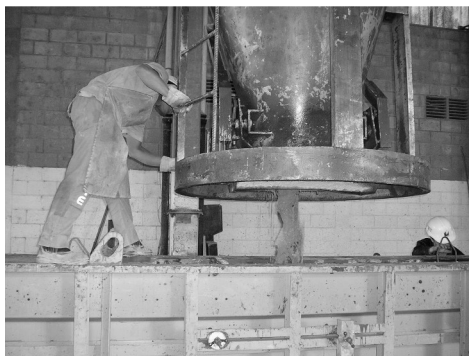


39



40

estudo comparativo



direitos reservados



41

concreto auto-adensável



concreto vibrado

direitos reservados



42

10 x produtividade

CC: moldagem e acabamento: 4,4min + 3,3min
nº de operários empregado: 5 (cinco)
caçamba (2), vibração (1) e acabamento (2)

0,870 homens-hora / m³ de concreto

CAA: moldagem e acabamento: 1,2min
nº de operários empregado: três (3)
caçamba (1) e acabamento (2)

0,081 h.h/ m³ de concreto

direitos reservados



43



direitos reservados



44

CAA ou SCC

1. reduz ruído → saúde
2. reduz tempo → produtividade
3. aumenta uniformidade
4. reduz energia elétrica → não usa vibrador
5. reduz desgaste de fôrmas
6. aumenta vida útil

direitos reservados



45

Como alcançar SUSTENTABILIDADE nas estruturas de concreto?

4. Empregando concreto de elevada vida útil

direitos reservados



46

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...

direitos reservados



47

...se a estrutura de concreto deteriora implica em novos consumos de materiais, energia, geração de entulho...

...interessa aumentar vida útil de projeto...

interação entre a estrutura e o meio ambiente

principal mecanismo deletério é a corrosão do aço

como reduzir risco de corrosão precoce?

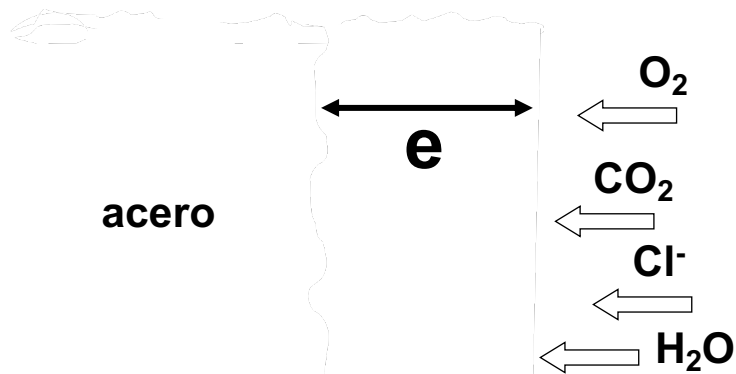
direitos reservados



48

Carbonatação

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



49

Carbonatação

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

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

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

direitos reservados



50

Carbonatação

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

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

$$f_{ck} = 50 \text{ MPa} \rightarrow t = 240 \text{ anos}$$

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

direitos reservados



51



direitos reservados



52

Vida Útil

1. *Funcional (arquitetura)*
2. *Econômica (economista)*
3. *Técnica (Engenharia)*

direitos reservados



55

Panteão
de
Roma



direitos reservados

56

Cúpula do Panteão
Século II dC → Diâmetro de 47m



direitos reservados



57

**Como alcançar SUSTENTABILIDADE
nas estruturas de concreto?**

**5. Empregando concreto
de alta resistência HSC**

direitos reservados



58

Projetar e Construir
obras lindas, funcionais,
resistentes e duráveis, levando
em conta os princípios de
sustentabilidade

direitos reservados



59

CO₂?
Energia?
Recursos naturais?
Vida Útil?
(Life Cycle Analysis)

direitos reservados



60

considerando um pilar central típico de um edifício de 20 andares
secção quadrada, 3m de altura, armadura principal

fôrça normal característica = 500 tf			
f_{ck} (MPa)	taxa de armadura (%)	seção (cm)	adotado (cm)
20	0.4 → 49kg	71.8 x 71.8	72 x 72
50	0.4 → 24kg	46.9 x 46.9	50 x 50
20	4.0 → 255kg	51.2 x 51.2	52 x 52
50	4.0 → 151kg	39.5 x 39.5	40 x 40

61

Pilar para 500t

$$f_{ck} = 20\text{MPa}$$

$$f_{ck} = 50\text{ MPa}$$

ASTM 36

direitos reservados



62

$$f_{ck} = 20\text{MPa}$$

$$\text{Cimento} = 280 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Areia} = 845 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Brita} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Água} = 210 \text{ kg/m}^3$$

direitos reservados



63

$$f_{ck} = 50\text{MPa}$$

$$\text{Cimento} = 420 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Areia} = 801 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Brita} = 1010 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Água} = 160 \text{ kg/m}^3$$

direitos reservados



64

emissões gasosas e energia consumida

Material	NO _x (kg/ton)	CO ₂ (kg/ton)	GWP (kg/ton)	Energia consumida (kWh/ton)
Clinker Portland	1,85	855	1447	998
Ferro Gusa Sucata	4,43	1588 380	3006 719	5060 20000

**Global warming potential (GWP) is a measure of how much a given mass of greenhouse gas is estimated to contribute to global warming. It is a relative scale which compares the gas in question to that of the same mass of carbon dioxide.*

direitos reservados



65

Concreto f_{ck} 20MPa

	para 1 m³	GWP (kg/ton)	GWP kg/m³	energia kWh/m³
Cimento CPI	280kg	1447	405	280
Areia	845kg	Desprezível	0	1
Pedra	1036kg	Desprezível	0	12
Água	210kg	Desprezível	0	0
Aço	32kg 315kg	719	23 226	640 6300
Formas 12 m²/m³ 6 reutilizações chapa de 1,4cm	0,0280 m³	Desprezível	0	43
TOTAL			428 631	933 6636

direitos reservados



66

Concreto f_{ck} 50MPa				
	para 1 m ³	GWP (kg/ton)	GWP kg/m ³	energia kWh/m ³
Cimento CPI	420kg	1447	607	419
Areia	801kg	Desprezível	0	3
Pedra	1010kg	Desprezível	0	12
Água	160kg	Desprezível	0	0
Aço	32kg 315kg	719	23 226	640 6300
Fôrmas 12 m ² /m ³ 6 reutilizações chapa de 1,4cm	0,0280 m ³	Desprezível	0	43
TOTAL			630 833	1117 6777

direitos reservados

CYRELA
BRAZIL REALTY

67

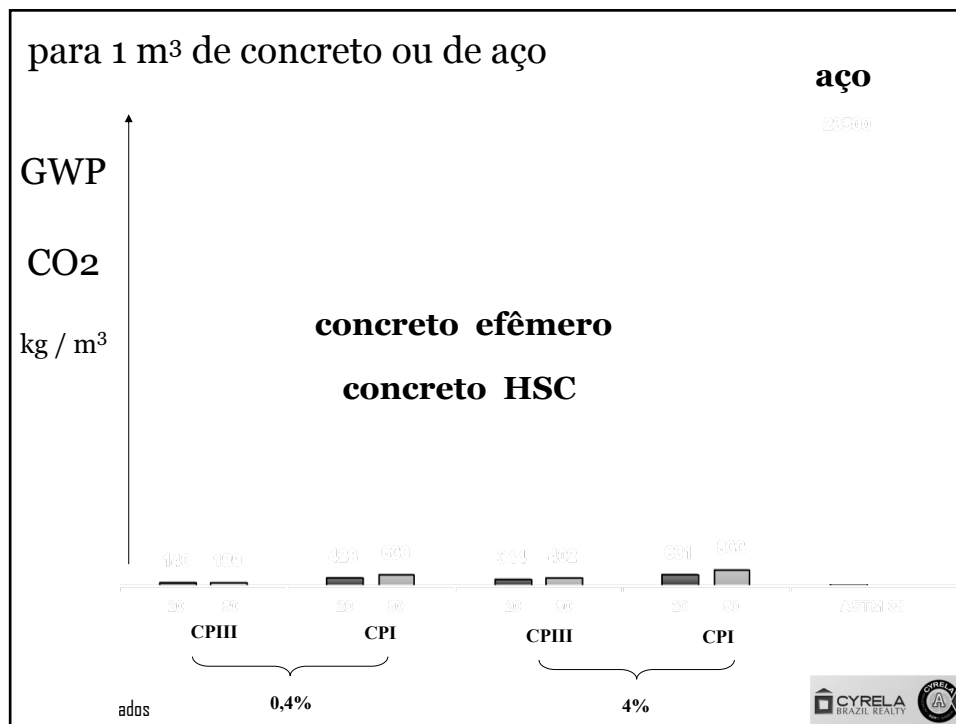
1 m ³ de material				
material	tipo	f_{ck} MPa	energia kWh/m ³	GWP kg/m ³
concreto armado	CP I	20	933 / 6636	428 / 631
concreto armado	CP III	20	777 / 6437	140 / 344
concreto armado	CP I	50	1117 / 6777	630 / 833
concreto armado	CP III	50	820 / 6480	199 / 402
aço	ASTM 36		39700	23500

direitos reservados

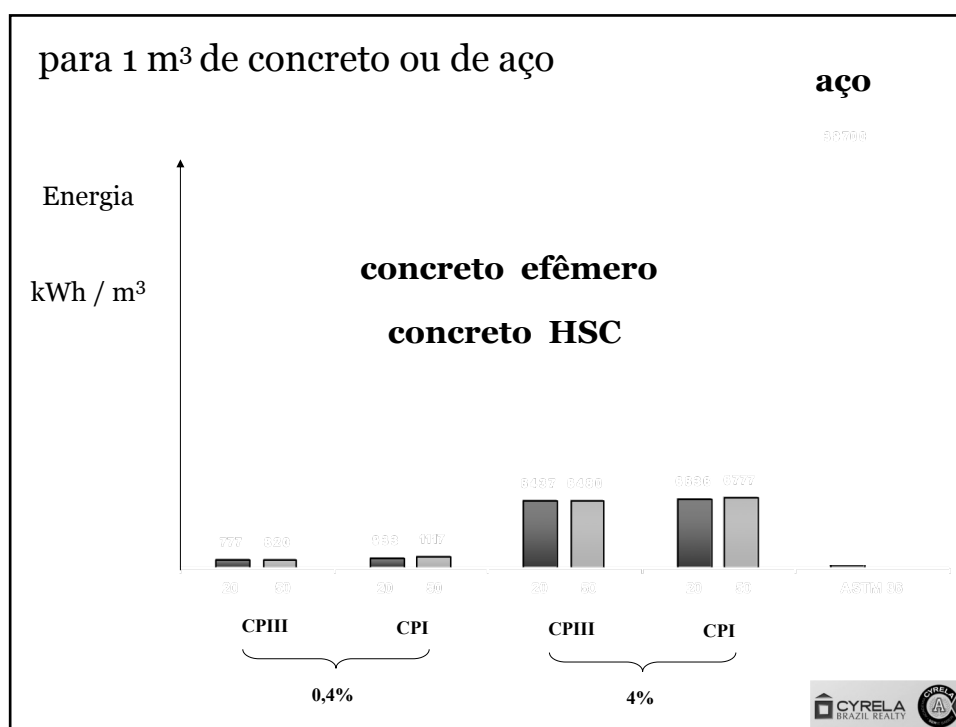
0,4% & 4% de taxa de **imposto**

CYRELA
BRAZIL REALTY

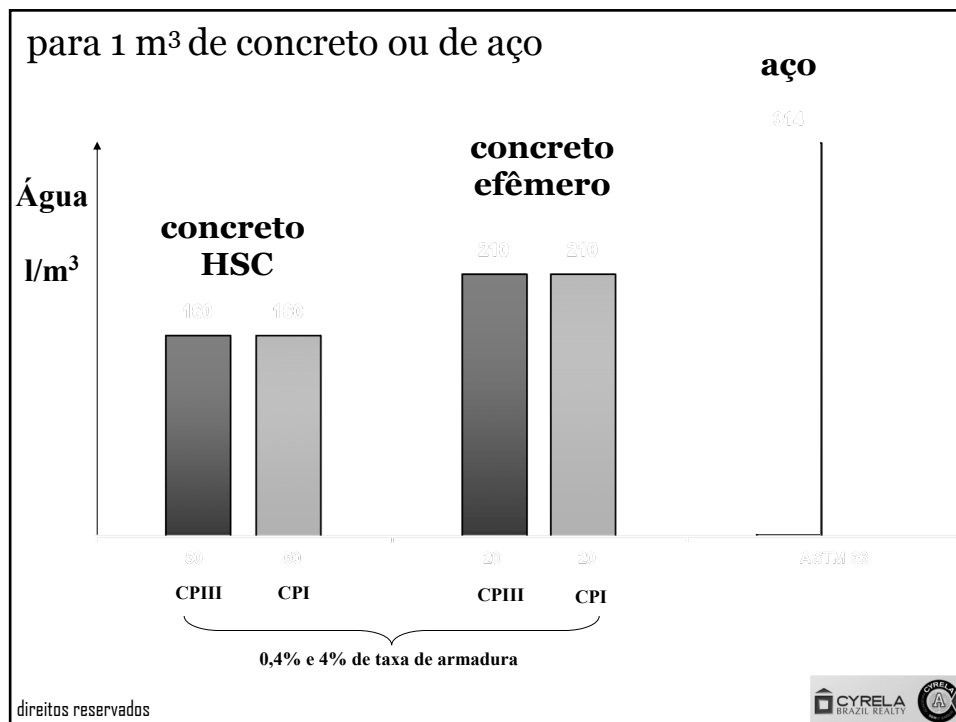
68



69



70



71

Pilar com 3m 0,4% armadura, 500tf				
material	tipo / f _{ck}	seção	energia	GWP
	/ MPa	cm	kWh	kg
concreto armado	CP I / 20	72 x 72	1451	665
concreto armado	CP III / 20	72 x 72	1208	218
concreto armado	CP I / 50	50 x 50	838	472
concreto armado	CP III / 50	50 x 50	615	149
aço	ASTM 36	300cm²	3500	2100

direitos reservados

CYRELA BRAZIL REALTY

72

Pilar com 3m 4% armadura, 500tf

material	tipo / f_{ck}	seção	energia	GWP
	/ MPa	cm	kWh	kg
concreto armado	CP I / 20	52 x 52	5383	512
concreto armado	CP III / 20	52 x 52	5221	279
concreto armado	CP I / 50	40 x 40	3253	400
concreto armado	CP III / 50	40 x 40	3110	193
aço	ASTM 36	300cm ²	3500	2100

direitos reservados



73

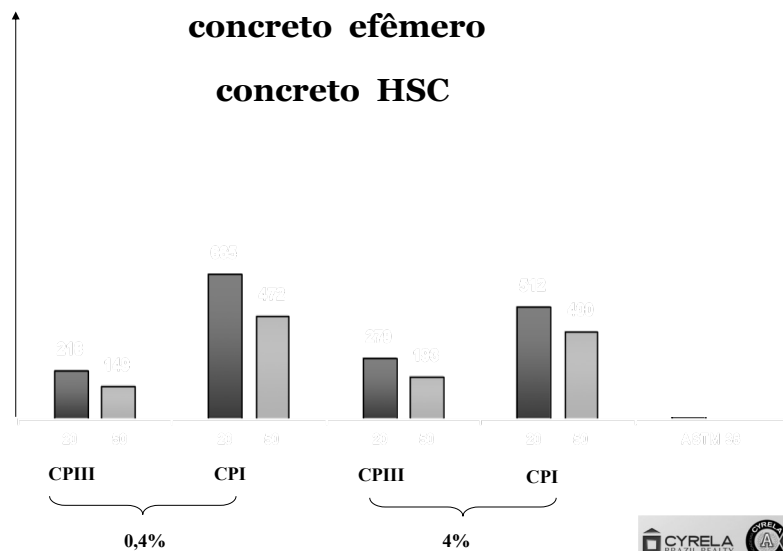
para 1 pilar de 3m de altura
seção quadrada

aço

2100

GWP
CO₂
kg/pilar

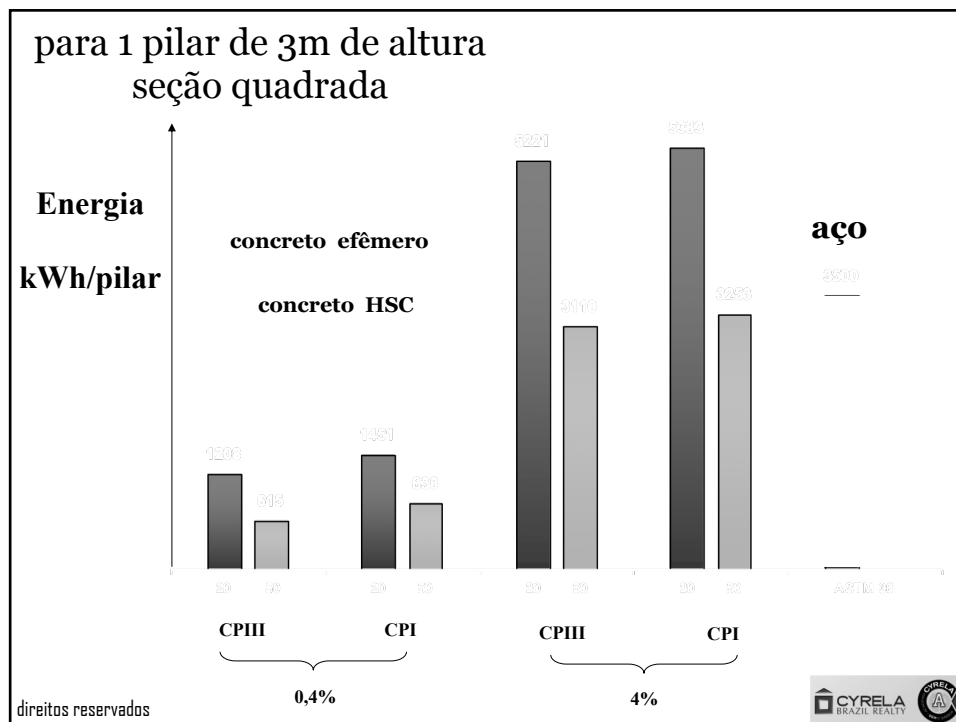
concreto efêmero
concreto HSC



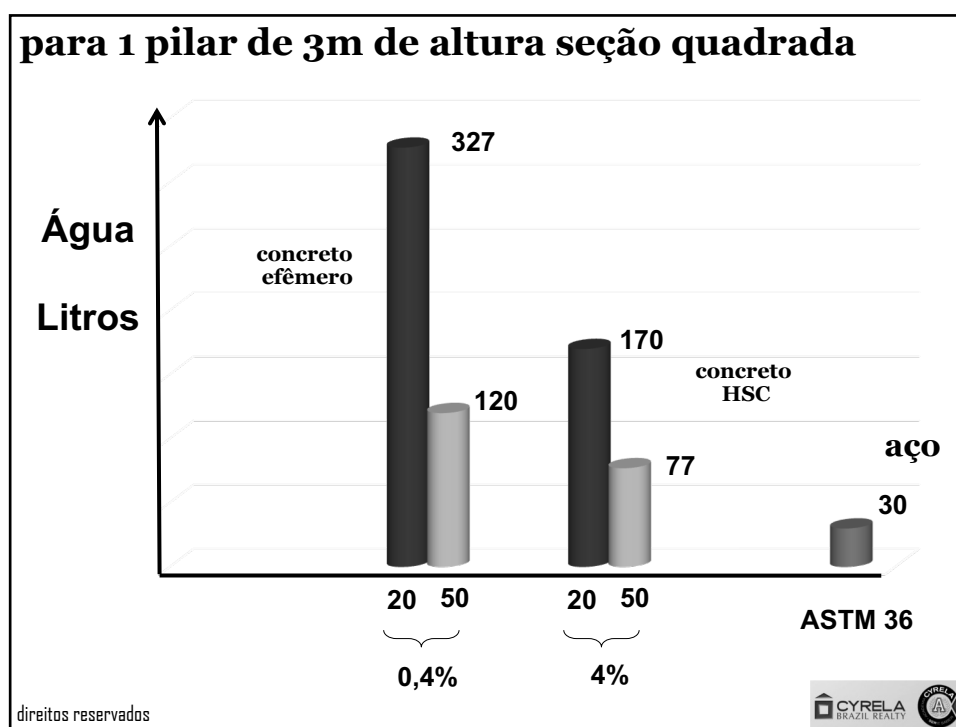
direitos reservados



74



75



76

Concrete R & D

SCC → Self –Compacting Concrete
HPC → High Performance Concrete
HSC → High Strength Concrete
CRC → Compact Reinforced Composite
RPC → Reactive Powder Concrete

direitos reservados



77



78

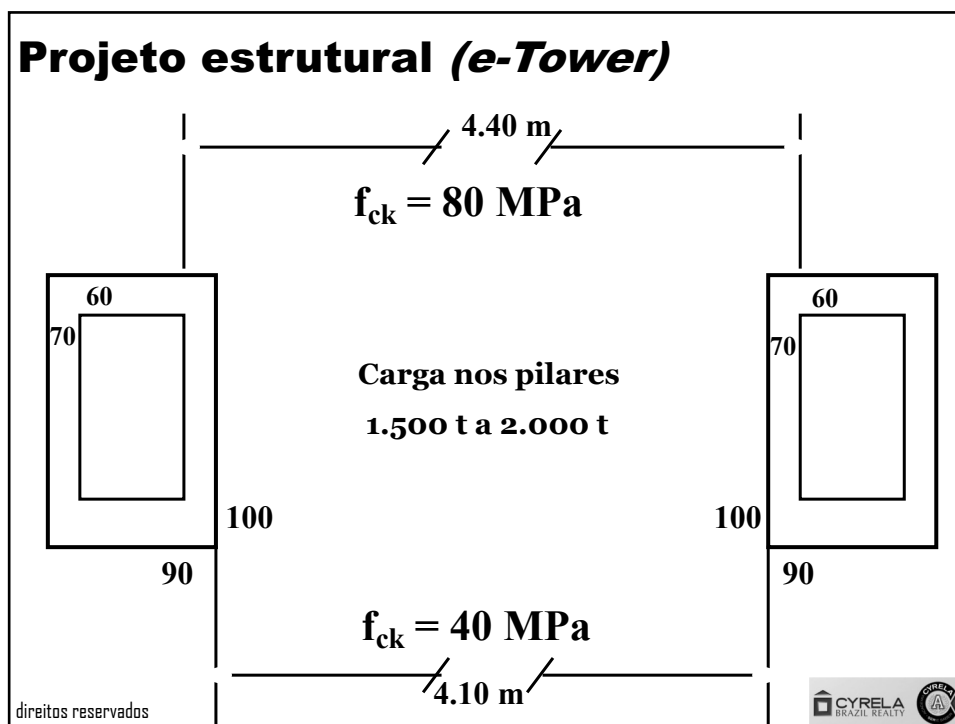
- **Edifício e-Tower SP**
- **42 andares**
- **Heliponto**
- **Piscina semi-olímpica**
- **Academia de ginástica**
- **2 restaurantes**
- **Concreto colorido**
- **f_{ck} pilares = 80 MPa**



direitos reservados




79



80



81



82



83

Economia de recursos naturais

Original:

$f_{ck} = 40\text{MPa}$

seção transversal $\rightarrow 90\text{cm} \times 100\text{cm}$

$0,90\text{m}^2$

HPC / HSC:

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

seção transversal $\rightarrow 60\text{cm} \times 70\text{cm}$

$0,42\text{m}^2$

direitos reservados



84

Economia de recursos naturais

- 70% menos areia
- 70% menos pedra
- 53% menos concreto
- 53% menos água
- 20% menos cimento

direitos reservados



85

Durabilidade

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

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

Carbonatação

28+63d 25°C 65% 5%

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

87

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

direitos reservados



88

Vida Útil para carbonatação 980 years !

(second Fick's law)

direitos reservados



89

CONCLUINDO
projetar e construir obras bonitas,
resistentes, seguras,
duráveis e *sustentáveis* é:

- **contribuir para a valorização profissional**
- **defender os reduzidos recursos de nosso país**
- **praticar uma boa engenharia**
- **é cumprir o juramento da profissão**

direitos reservados



90

**Beleza
Segurança
Durabilidade**

Abastado por
90 milhões
de votos.



O **Concreto** tem respeito pelo
Meio Ambiente por sua capacidade de:

- Ser reciclável
- Incorporar os rejeitos industriais
- Confinar materiais perigosos
- Fixar gás carbônico CO₂

O **Concreto** é o **material estrutural** mais
adequado para uma **construção sustentável**.

direitos reservados



91

Seguem alguns questionamentos que consideramos pertinentes

- 1. Como atuar na definição de slump, frente às tabelas pré-definidas pelas concreteiras?**
- 2. Além da amostragem total para 28 dias, qual é a sua recomendação de ensaios para outras idades?**
- 3. Qual a recomendação para amostragem e periodicidade do ensaio de módulo de deformação e de tração por compressão diametral?**
- 4. Como podemos atuar no cobrimento da armadura, frente à durabilidade da estrutura, considerando o controle que realizamos na execução da estrutura? (Exemplo: redução de 0,5 cm).**

Alexandre Britez (Cyrela)

direitos reservados



92

Seguem alguns questionamentos que consideramos pertinentes

- 5. Como minimizar flechas excessivas em lajes?**
- 6. Qual é um desvio padrão de produção da usina considerado aceitável para resultados de resistência à compressão e qual a amostragem mínima recomendada para avaliação deste desvio?**
- 7. Como executar a cura do concreto de estrutura de um edifício de multipavimentos (pilares, vigas e lajes), considerando o ciclo de uma laje por semana com 5 dias trabalhados?**
- 8. Frente ao ciclo apresentado acima, quais os principais cuidados a serem tomados nas estruturas de concreto armado (fôrma, armação e concretagem)?**

Alexandre Britez (Cyrela)

direitos reservados



93

Seguem alguns questionamentos que consideramos pertinentes

- 9. Como programar e julgar resultados de ensaios em pilares, vigas e lajes nos quais o controle informou que a resistência não foi atendida aos 28 dias?**
- 10. Qual o melhor critério para amostrar concreto no caminhão betoneira?**
- 11. Como e quando calcular o $f_{ck,est}$?**

Alexandre Britez (Cyrela)

direitos reservados



94



95