



Sustainable High Performance Concrete Structures



Paulo Helene

Diretor PhD Engenharia

Conselheiro Permanente IBRACON

Prof. Titular Universidade de São Paulo

Presidente de honra ALCONPAT Internacional

Member fib(CEB-FIP) Service Life of Concrete Structures

Millenium Centro de Exposições

08 de abril de 2014

SECOVI, São Paulo, SP

1

Edifícios Altos

Segundo o Council on Tall Buildings and Urban Habitat - CTBUH, um edifício é considerado arranha-céu quando sua altura supera os 300m (>75 andares)

PhD Engenharia

2



Em 1.997 as torres
gêmeas Petronas,
em Kuala Lumpur,
construídas em
concreto, superaram
em altura a torre
metálica Sears em
Chicago

PhD Engenharia

3

Passados poucos
anos e até 2020,
haverá 96 novos
edifícios com altura
superior a 300m

PhD Engenharia

4

Desse total de 96

“arranha-céus”:

- 40 são em concreto
- 49 são compostos
- apenas 7 são de aço

PhD Engenharia

5

O mais alto edifício do mundo, o Burj Khalifa, em Dubai, com 820m, foi construído com concreto

PhD Engenharia

6

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (HPC - High Performance Concrete)

PhD Engenharia

7

fib CEB – Bulletin 42/2008 “Constitutive modelling of high strength / high performance concrete”

- HPC – Concrete with compressive cylinder strengths up to approximately 150MPa;
- Is basically constituted of the same materials as normal strength, normal weight concretes (NSC);
- Contains more cement and less water than NSC does. This constitutes a density increase which may reach 150 kg/m³.

PhD Engenharia

8

Sustentabilidade

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

Ambiental – Social - Econômico

PhD Engenharia

9

Normas Recentes

- ✓ ISO 14025:2010 Environmental labels and declarations. Type III environmental declarations. Principles and procedures
- ✓ ACI Committee 130. Sustainability of Concrete
- ✓ U.S. Green Concrete Council. Sustainable Concrete Guide. Strategies and Examples. Applications
- ✓ ISO TC 59/SC 17. Sustainability in Building and Civil Engineering Works
- ✓ *ISO 21929-2: Sustainability Indicators (energy, materials, water and land)*
- ✓ EN 15804:2012 Core rules for the product category

10

O que é LEED?

(Leadership in Energy and Environmental Design)

Certificação para edifícios sustentáveis criada e concedida pela ONG norte-americana *U.S. Green Building Council (USGBC)*, no Brasil essa certificação é feita pelo Green Building Council Brasil.



PhD Engenharia

11

LEED

O objetivo do sistema é reduzir a emissão de carbono do “ambiente construído” e criar um sistema competitivo para a eficiência de edifícios, recompensando a prática de melhor design, construção e manutenção e criando um mercado de produtos mais sustentáveis para o setor construtivo.

A última versão do LEED também inclui Créditos Regionais que permite a tropicalização, ou a adequação do sistema, para qualquer lugar ou clima do mundo.

E por ser um sistema de certificação documentado online, isto também permite o crescimento e a adoção internacional do LEED, criando um padrão mundial de fato para construções sustentáveis.

Aplica-se a obras novas de edificações comerciais ou habitacionais, obras industriais, edifícios escolares, edifícios existentes, focando projeto e construção, projeto de interiores, operação e manutenção (uso).

PhD Engenharia

12

LEED

Leadership in Energy and Environmental Design (Liderança em Energia e Projeto Ambiental)

O sistema é usado para comparar o desempenho ambiental entre um edifício e outro pela soma de créditos de 1-110.

Os quatro níveis de certificação e pontuação são:

Certified	→ 40-49 créditos
Silver	→ 50-59 créditos
Gold	→ 60-79 créditos
Platinum	→ 80-110 créditos

PhD Engenharia

13

Concretos de Alto Desempenho: Um futuro Sustentável

Alguns Empreendimentos com certificação *LEED* no Brasil:



f_{ck} de projeto: 50MPa
Utilização de Protensão para
redução de dimensões da
estrutura.

Rochaverá Corporate Towers
São Paulo/SP

PhD Engenharia

14

Concretos de Alto Desempenho: Um futuro Sustentável

Alguns Empreendimentos com certificação *LEED* no Brasil:



f_{ck} de projeto: 50MPa
Utilização de Protensão para redução de dimensões da estrutura.

Ventura Corporate Towers
Rio de Janeiro/RJ

PhD Engenharia

15

Concretos de Alto Desempenho: Um futuro Sustentável

Alguns Empreendimentos com certificação *LEED* no Brasil:



f_{ck} de projeto: 50MPa

Eldorado Business Tower
São Paulo/SP
PLATINUM

PhD Engenharia

16

Concretos de Alto Desempenho: Um futuro Sustentável

Alguns Empreendimentos com certificação *LEED* no Brasil:



Razões do Platinum:

- ✓ Uso racional de água
- ✓ Impacto urbano
- ✓ Eficiência energética
- ✓ Cuidado ambiental - resíduos
- ✓ Ar condicionado
- ✓ Frenagem de elevadores
- ✓ Materiais sustentáveis

PhD Engenharia

17

Como o Concreto pode Contribuir?

LEED Credit Contribution Potential

Pode contribuir para os créditos LEED nas categorias:

Credit 1.1 → Innovation and Design, desde que cimento $\leq 0,6^{\circ}\text{C}$

Credit 4.1 → Recycled Content, 10% (um ponto)

Credit 4.2 → Recycled Content, 20% (dois pontos)

Credit 5.1 e 5.2 → Materials and Resources category, if materials used in the mixture are extracted or produced within 500 miles of the project site (um ponto para 10% e dois pontos para 20%)

PhD Engenharia

18

Concretos de Alto Desempenho: Um futuro Sustentável

Porque esses Programas
controlam muito o edifício em
USO e não dão muita
importância aos Materiais e
Estrutura ?

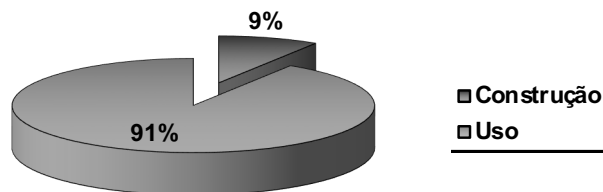
PhD Engenharia

19

Edificação - Emissões de GWP

*Considerando uma vida útil de 50 anos para
uma habitação de classe média →*

Visão holística: operação e uso



PhD Engenharia

20

O Concreto em 2010

3,3 bilhões de t de cimento

60% para concreto

2 bilhões de t de cimento

320kg/m³

6,2 bilhões de m³

16 bilhões de t

4 bilhões de m³ de agregado

1,2 trilhões de litros de água

PhD Engenharia

21

Declaração Ambiental de Produto EPD

- An Environmental Product Declaration, EPD®, is a verified document that reports environmental data of products based on life cycle assessment (LCA) and other relevant information and in accordance with the international standard ISO 14025 (Type III Environmental Declarations).
- An environmental declaration, is defined, in ISO 14025, as quantified environmental data for a product with pre-set categories of parameters based on the ISO 14040 series of standards, but not excluding additional environmental information.

PhD Engenharia

22

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (LCA) do “berço ao túmulo”

Indicadores de avaliação de impacto

- Potencial de aquecimento global, em kg de CO_{2,eq},
- Potencial de esgotamento de ozônio estratosférico: em kg de CFC11_{eq}
- Potencial de acidificação, em kg de SO_{2,eq}
- Potencial de eutrofização, em kg de PO₄^{3-,eq}
- Potencial de esgotamento de recursos abióticos, em kg de Sb_{eq}
- Potencial de formação de ozônio fotoquímico, em kg de etano

Indicadores de inventário de ciclo de vida

- Consumo de energia primária não renovável, em MJ,
- Consumo de energia primária renovável, em MJ,
- Utilização de combustíveis secundários não renováveis, em MJ,
- Utilização de combustíveis secundários renováveis, em MJ,
- Consumo de água doce, em m³,
- Produção de resíduos (perigosos, não perigosos e radioativos), em kg
- Material para reutilização, reciclagem, valorização energética, em kg

23

Redefining High-Performance Concrete Structures

Leo Panian; Phillip Williams; Mike Donovan
Concrete International nov. 2012 p. 23-30

1. Dosagem do concreto é fundamental
2. 70% de escória ou de cinza volante classe F
3. Fundação: 55MPa a 91dias Consumo: 119 kg/m³
4. Pilares: 55MPa, a 91 dias Consumo: 133 kg/m³
5. Lajes protendidas: 31MPa a 3dias e 41MPa a 56 dias.
Consumo = 208kg/m³

PhD Engenharia

24

San Francisco Public Utilities Commission Headquarters (U.S.)



- ✓ Customized mix designs made during structural design phase
- ✓ Concrete Technology developed with Design team
- ✓ HPC and HSC with low w/cm ratio and local materials

25

**Como caminhar em
direção à
SUSTENTABILIDADE
nas estruturas de
concreto?**

PhD Engenharia

26

Alternativas

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
6. industrializar o processo

PhD Engenharia

27

Alternativas

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
6. industrializar o processo

PhD Engenharia

28

Concretos: Um futuro Sustentável

4. Empregando concreto de elevada vida útil

PhD Engenharia

29

Carbonatação

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

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

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

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

PhD Engenharia

30



31



250 anos de garantia.

Quem precisa de segurança, tecnologia e competência, precisa de Engemix. Como a Método Engenharia precisa, quando foi selecionada a concretagem e reforço estrutural da Torre Norte do Centro Empresarial Nações Unidas, um bloco de 30m x 30m x 28m, correspondente a 2504 m³ de concreto, lançado em 23 horas consecutivas. Com a utilização de 300 toneladas de peso para controlar a temperatura do concreto, volume equivalente a um ônibus de 40 x 40 x 20m. Quando a Concretagem Avançada, para a injeção de quantidades de resina, permitiu ao 30º andar atingir 110 metros, a **maior altura de São Paulo**, com 30.000 m² de CAC, o concreto de alto desempenho. Estrutura que hoje está sendo reconhecida por engenheiros e técnicos como um dos grandes exemplos de utilização do CAC, a maior tecnologia e eficiência de concretagem, mais de 11 milhões. E a maior estrutura de CAC do Brasil, e não deverá apresentar qualquer tipo de problema pelas próximas 250 anos. Ou até 2040, segundo pesquisas e estudos realizados por consultores e técnicos especializados para o desenvolvimento e aplicação de estruturas inovadoras. E na construção, o respeito ao meio-ambiente, o respeito brasileiro de bombardeio de concreto em altura 158 metros.

Em menos de 4 horas, foram bombeados quase 30 m³ de concreto. Para 30 Andares. Bombas de lançamento de concreto que suportaram carga de 1 m² de concreto na área de lançamento, equivalente a 15 toneladas.

O resultado é que, hoje, o Centro Empresarial Nações Unidas é também uma verdadeira Prova da Tecnologia da Concretagem Avançada. E as soluções propostas para consultores e construtores se tornam possíveis graças à experiência e à competência da Engemix. Que garante ao empreendimento não apenas redução de custos, mas também, eliminação do tempo de concretagem, potencialização das propriedades dos aglomerados, redução da fissuração do concreto na construção, otimização da resistência e da durabilidade do concreto na obra.

Quem precisa de solução segura em concretagem não corre riscos. Chama a Engemix.

CONCRETO
ENGEMIX

32

Sustainable 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

PhD Engenharia

33

Concretos: Um futuro Sustentável

5. Empregando concreto de alta resistência HSC

PhD Engenharia

34

Concretos: Um futuro Sustentável

- **CO₂?**
- **Energia?**
- **Recursos naturais?**
 - **Água potável?**
 - **Ruído?**
 - **Esforço?**
 - **Durabilidade?**

PhD Engenharia

35

Concretos: Um futuro Sustentável

Pilar para 500t

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

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

PhD Engenharia

36

Considerando um pilar central típica de um edifício de 20 andares seção quadrada, 3m de altura, armadura principal

Força normal característica = 500 tf

f_{ck} (MPa)	taxa de reforço (%) → total do pilar	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

PhD Engenharia

37

Concretos: Um futuro Sustentável

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

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

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

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

$$\text{Água} = 210 \text{ kg/m}^3$$

PhD Engenharia

38

Concretos: Um futuro Sustentável

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

Cimento = 420 kg/m³

Areia = 801 kg/m³

Brita = 1010 kg/m³

Água = 160 kg/m³

PhD Engenharia

39

Emissões gasosas e energia consumida

Material	NOx (kg/t)	CO ₂ (kg/t)	GWP (kg/t)	Energia consumida (kWh/t)
Clinker Portland (≈ CP I)	1,85	855	1447 (880)	998
ferro gusa (minério)		1588	3006	5.060
CA 50 & CA 60 (sucata)	4,43	380	719	20.000

**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.*

PhD Engenharia

40

a guide to understanding the embodied impacts of construction products

construction
products association

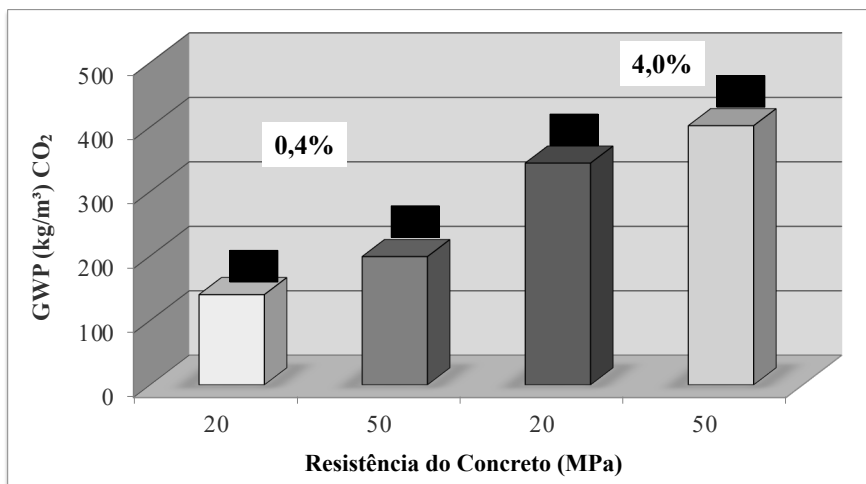
RESEARCH REPORT R11-01, **Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle**, Department of Civil and Environmental Engineering, Concrete Sustainable Hub, Massachusetts Institute of Technology, august, 2011.

ILCD handbook – **International reference Life Cycle Data System; General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance**, Publications Office of the European Union, 2012, 394 p.

ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures

41

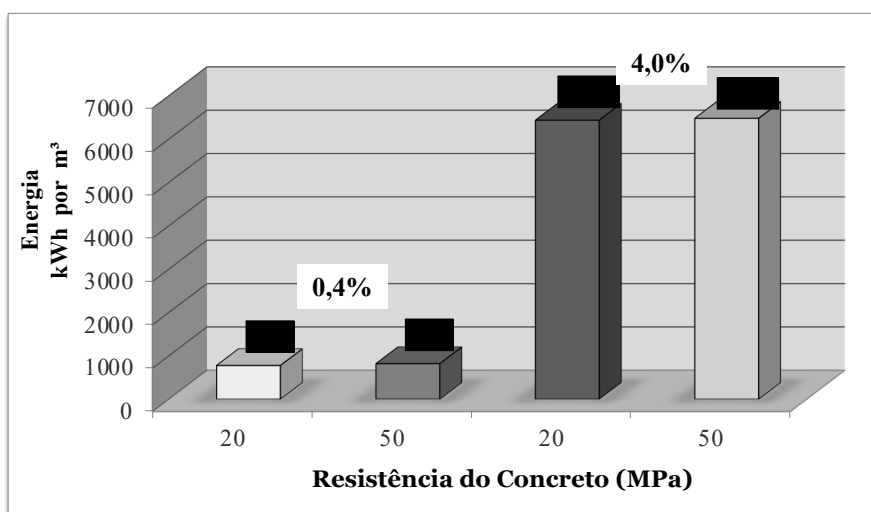
1 m³ de concreto estrutural com 70% escoria



PhD Engenharia

42

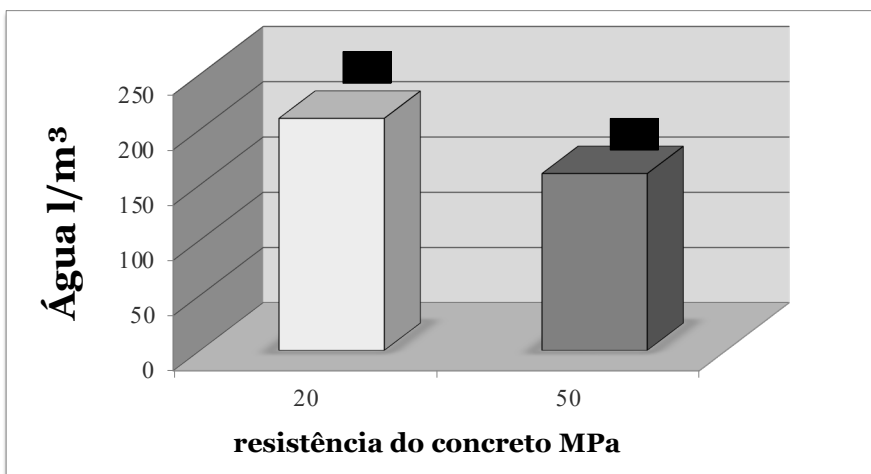
1 m³ de concreto estrutural



PhD Engenharia

43

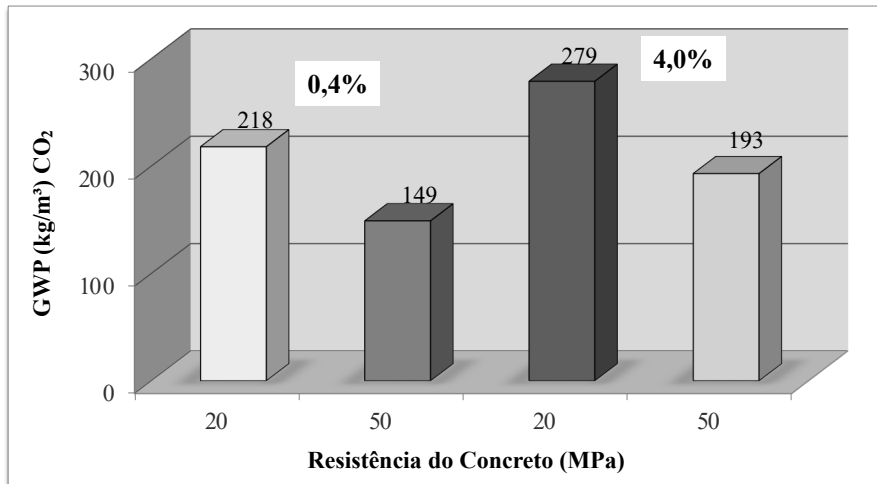
1 m³ de concreto estrutural



PhD Engenharia

44

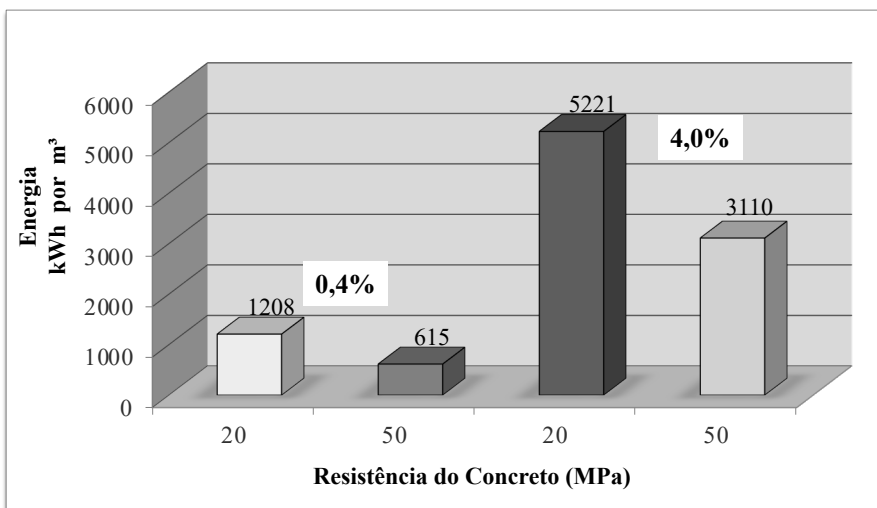
Pilar com 3m de altura, seção quadrada, 500tf



PhD Engenharia

45

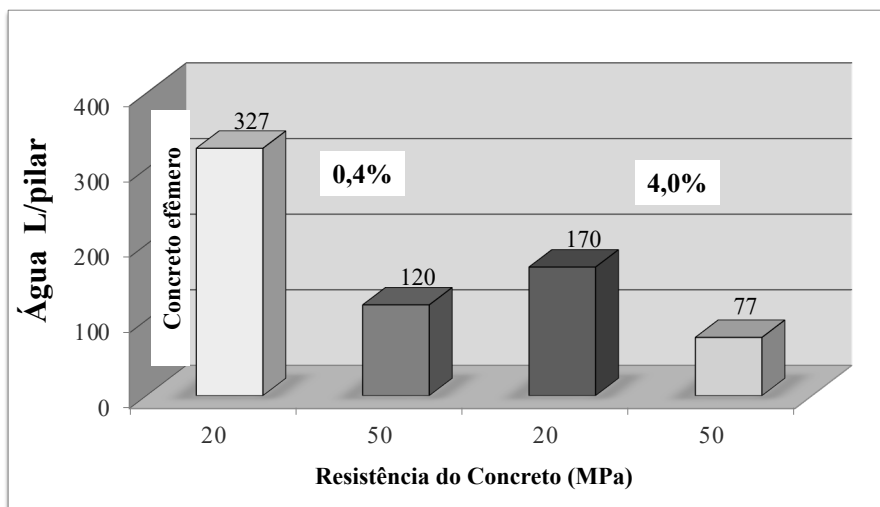
Pilar com 3m de altura, seção quadrada, 500tf



PhD Engenharia

46

Pilar com 3m de altura, seção quadrada, 500tf



PhD Engenharia

47



48

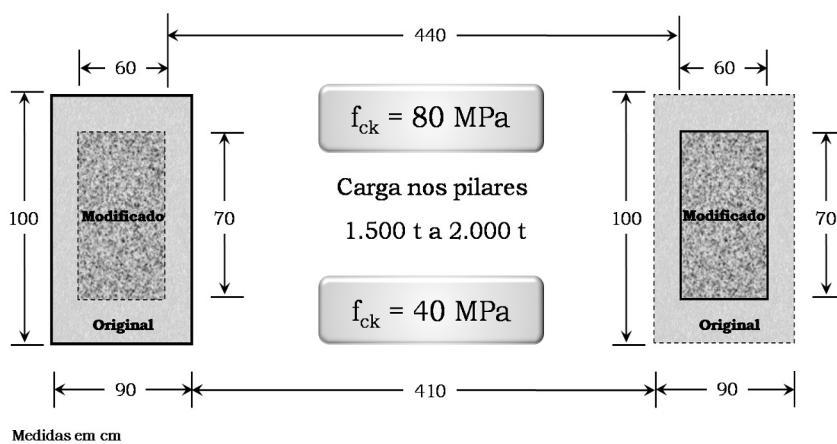
e-Tower

- Edifício e-Tower SP
- 42 andares
- heliponto
- piscina semi-olímpica
- academia de ginástica
- 2 restaurantes
- concreto colorido
- f_{ck} pilares = 80 MPa



49

Projeto estrutural (e-Tower)

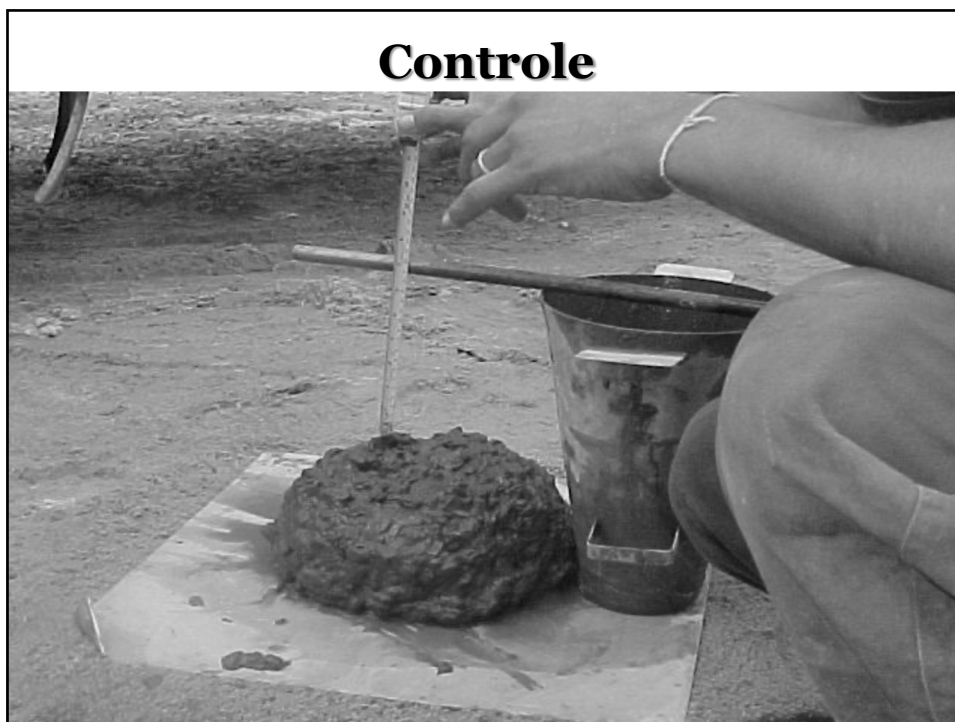


PhD Engenharia

50



51



52



53

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

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

PhD Engenharia

54

Sustentabilidade



- **70% menos areia**
- **70% menos brita**
- **53% menos concreto**
- **53% menos água**
- **20% menos cimento**
- **31% menos área de fôrma**

PhD Engenharia

55

Sustentabilidade



- **25% a mais de reaproveitamento da fôrma**
- **43% menos aço**
- **16 vagas a mais**
- **3x mais vida útil**
- **100% desfôrma mais rápida**

PhD Engenharia

56

Pontos Importantes

Conceito de rendimento:

Considerando apenas o conteúdo do cimento:

Concreto 120MPa $\rightarrow$ 4,0kg/MPa
 $\rightarrow$ 1,2kg clínquer / MPa

Concreto de 50MPa $\rightarrow$ 7,6 kg/MPa
 $\rightarrow$ 2,3kg clínquer / MPa

Concreto de 20MPa $\rightarrow$ 11,5 kg/MPa
 $\rightarrow$ 3,5kg clínquer / MPa

PhD Engenharia

57

Pontos Importantes

Idade do f_{ck}

$f_{ck} = 50\text{MPa} \rightarrow 28\text{dias} \rightarrow 380 \text{ kg/m}^3$
115 kg/m³

$f_{ck} = 50\text{MPa} \rightarrow 63\text{dias} \rightarrow 350 \text{ kg/m}^3$
105 kg/m³

$f_{ck} = 50\text{MPa} \rightarrow 91\text{dias} \rightarrow 335 \text{ kg/m}^3$
100 kg/m³

58

Pontos Importantes

Idade do f_{ck}

Passar de 28dias a 63dias pode economizar:

8% de CO_2

Passar de 28dias a 91dias pode economizar:

12% de CO_2

$120.000m^3 \rightarrow 4,500,000 \text{ kg}$

59

Pontos Importantes

Confinamento

- ✓ Partido estrutural / arquitetônico (recursos)
- ✓ Combinar adequadamente laje e viga com pilar
- ✓ Escolher f_{ck} que esteja numa proporção 1,4:1,0

60

Pontos Importantes

Confinamento

- ✓ Partido estrutural / arquitetônico (recursos)
- ✓ Combinar adequadamente laje e viga com pilar
- ✓ Escolher f_{ck} que esteja numa proporção 1,4:1,0

Pilar 70MPa lajes/vigas 50MPa

Pilar 50MPa lajes/vigas 40MPa

Pilar 40MPa lajes/vigas 30MPa

61

Shanghai Tower (Shanghai, China)

Gensler, Thornton Tomasetti



CTBUH

2015

altura: 632m (128 andares)

Fundação:
C50 → 56 dias

Super Colunas
Concreto Auto Adensável:
C70: zona baixa → 28 dias
C60: zona média → 28 dias
C50: zona alta → 28 dias

62

Burj Khalifa (Dubai, EAU)

Emmar, SOM



Prédio mais alto do mundo

altura: 828m!!
(165 andares)

Núcleo e pilares em
concreto, juntamente com
estrutura metálica no topo

© SOM-Nick Merrick Hedrich Blessing 2010 via CTBUH

Credits: CTBUH

PhD Engenharia

63

Burj Khalifa (Dubai, EAU)

Fundações (45.000m³ de concreto):

Bloco de 3,7m de altura em SCC; C50 para 90dias; concretagem em 4 etapas com intervalos de 24h (12.500m³ utilizados)

194 Estacas em SCC; C60 para 90dias; concretados com tremonha; carga nominal de 300tf; 43m de profundidade e 1,50m de diâmetro

Devido ao solo muito agressivo no local foram utilizados:

25% de cinzas volantes;

7% de sílica ativa;

relação a/c de 0,32;

Slump Flow de 675±75mm (SCC);

Inibidores de corrosão e proteção catódica;

N.Subramanian ; NBM & CW, Vol. 15, Jan 2010 http://www.pmw.de/pm_online/data/bp_3893_gb.pdf

64

Burj Khalifa (Dubai, EAU)

Superestrutura (180.000m³ de concreto):

Paredes e Pilares de concreto: C80 para 90 dias (até 452m) com
D_{max}=20mm e E_c=43800GPa;
C60 para 56dias (até 570m)

- ✓ C50 para o resto da estrutura (incluindo vigas e lajes)
- ✓ Concretagens à noite e com adição de gelo;
- ✓ Recorde de altura de bombeamento com 30m³/h;
- ✓ Uso de formas deslizantes e voadoras;
- ✓ Uso de agregados locais e Cinzas Volantes
- ✓ Estrutura de concreto erguida até 570m

N.Subramanian ; NBM & CW, Vol. 15, Jan 2010 http://www.pmw.de/pm_online/data/bp_3893_gbr.pdf

65

Concreto Sustentável é:

- mais resistente
- mais durável
- mais humano (< ruído e < esforço físico)
- consumir menos recursos (materiais não renováveis)
 - consumir menos água
 - consumir menos energia
- produzir menos resíduos e menos entulho

PhD Engenharia

66

Sustentabilidade combina
em gênero, número e grau com
Racionalização
Concreto Pré-Moldado
Industrialização
e....

PhD Engenharia

67

Sustentabilidade combina
em gênero, número e grau com
Edifícios
Altos

PhD Engenharia

68



69



70