

Comportamento de Estruturas de Concreto de Edifícios Frente a Incêndio

Paulo Helene
Diretor PhD Engenharia
Presidente da ALCONPAT
Diretor Conselheiro IBRACON
Prof. Titular Universidade de São Paulo USP
fib (CEB-FIP) member of Model Code for Service Life

Porto Alegre

02 de Dezembro de 2010

NORIE.UFRGS

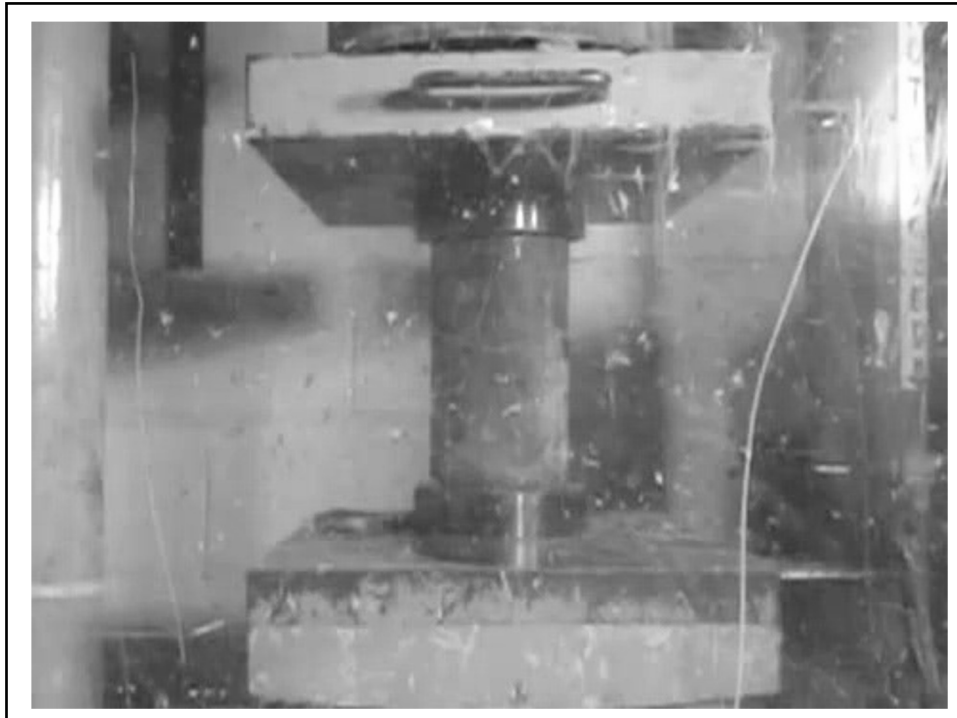
1

Concreto de Alta Resistência *Mitos e Verdades*

2

MITO
HSC > 50MPa
EXPLODE na
ruptura

3



4

VERDADE

HSC > 50MPa

O corpo-de-prova pode explodir no ensaio, mas nunca o pilar, a viga ou a laje pois a ductilidade é um dos requisitos do projeto estrutural

5

MITO

HSC > 50MPa

consome muito cimento e não é SUSTENTÁVEL

6

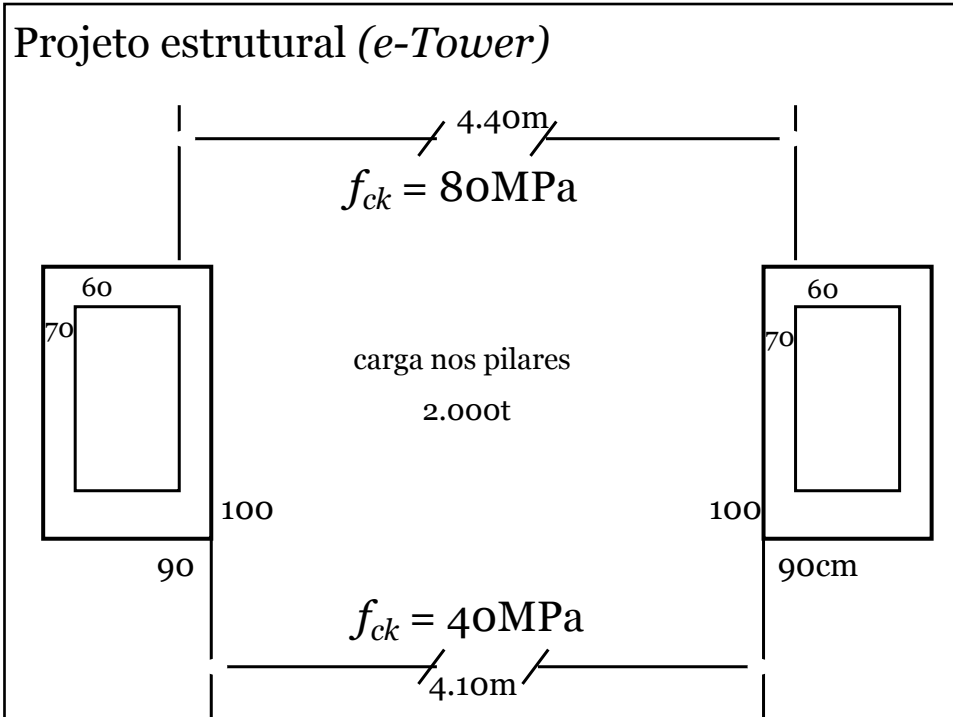


7

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



8



9



10



11

Economia de recursos naturais

Original:

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

seção transversal \rightarrow 90cm x 100cm

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

HPC / HSC:

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

seção transversal \rightarrow 60cm x 70cm

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

12

Economía de recursos naturais

- **70% menos areia**
- **70% menos brita**
- **53% menos concreto**
- **53% menos água**
- **20% menos cimento**

13

VERDADE

pode consumir mais cimento por m³, mas a quantidade final de CO₂ vai depender da eficiência no uso, pois consumo de água e liberação de CO₂ decrescem com MPa

H₂O / CO₂ / MPa

14

HSC > 50MPa

**EXPLODE frente
a incêndio**

(explosive spalling)

MITO ou VERDADE ?

15

Comprehensive fire protection and safety with concrete



**European
Concrete Platform**

April 2007

**European
Concrete Platform
ASB**

BCA
BRITISH
PRECAST

BRITISH READY-MIXED
CONCRETE ASSOCIATION

the Sign of Quality

16

Mortes / Incêndio

1. Asfixia / toxidez
2. Pânico / pisoteamento
3. Queimadura
4. Colapso (bombeiros)

17

Edifício ANDRAUS
São Paulo
Brasil
1972



18



19



20



aspecto tipico das vigas

21



aspecto tipico das lajes

22

**Edifício JOELMA
São Paulo
Brasil
1974**



23



**Edifício JOELMA
Estrutura de Concreto Armado**

**26 andares
10 andares de garagem
+ 15 andares de escritórios**

Construção: 1971

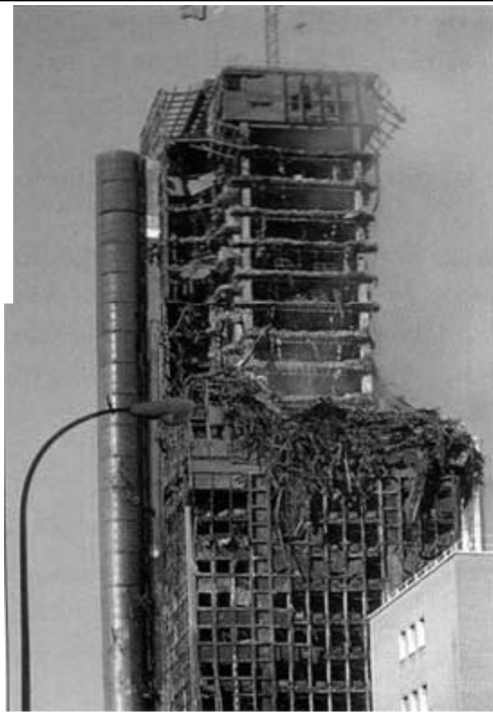
Incendio: 1 Fevereiro 1974

***duração: 6h30min
390min***

***perfeitas condições
nada colapsou***

24

**Edifício WINDSOR
Madrid
Espanha
2005**



25

**Edifício WINDSOR
Estrutura mista aço-concreto**

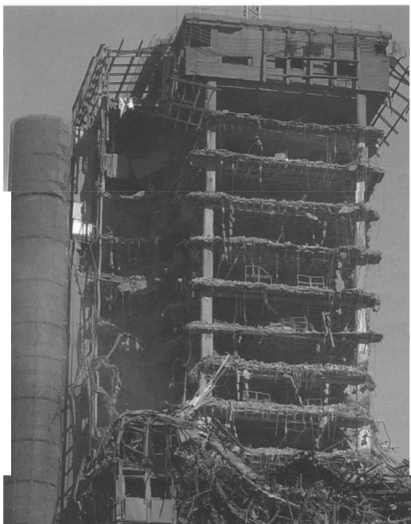
**37 andares
5 andares de garagem
+ 31 andares de escritórios**

Construção: 1991

Incêndio: 12 Fevereiro 2005

***Duração: 16h
960min***

***→ somente as partes de
aço colapsaram
→ totalmente demolido***



26

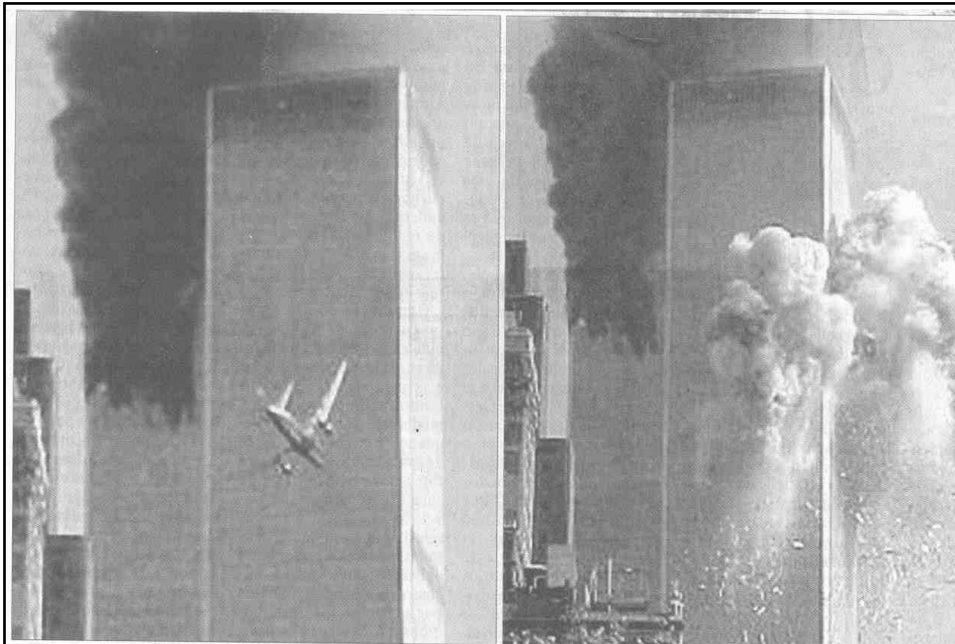


“the reinforced concrete structure, columns, beams and slabs under 16h severe fire condition , could perform well and no collapse”

... “the penetration of the damaged, is heterogeneous and vary from 1.5cm in 19 floor to 3 cm in 12 floor...”

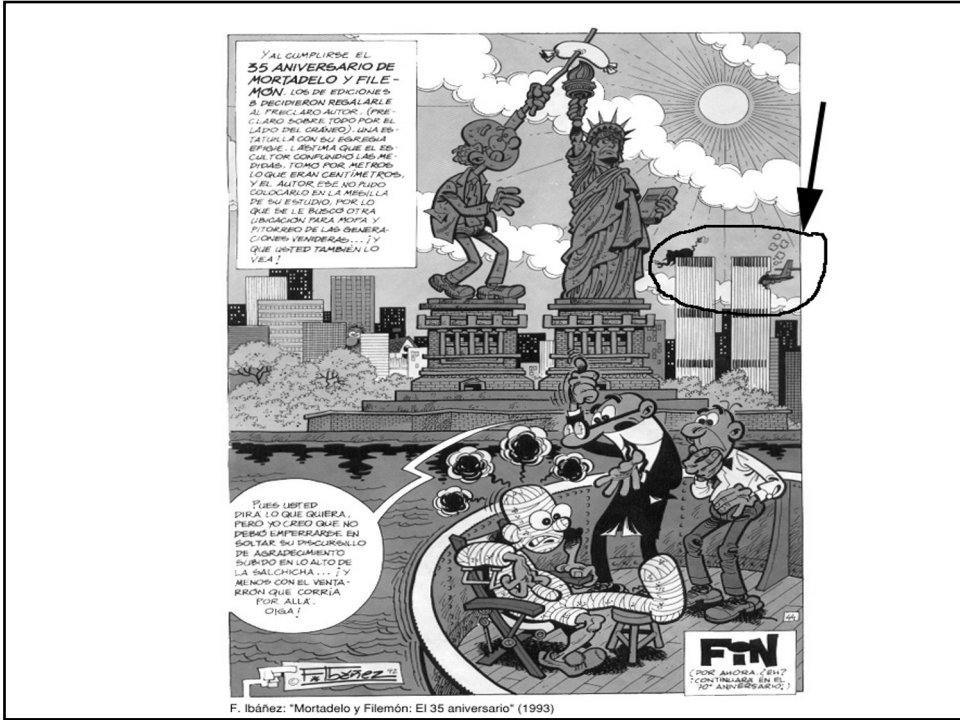
Dra. Cruz Alonso. IET.

27



11 de Setembro de 2001

28



29

FEMA
Federal Emergency Management Agency
www.fema.gov

NIST
National Institute of Standards and Technology
wtc.nist.gov

Port Authority of New York
NYC Building Code

30

WTC 1 → 103 min
WTC 2 → 56 min
WTC 7 → 5h
Projeto WTC 1 e 2 → 1964
impacto Boeing 707 a 960 km/h
sem incêndio
1,25cm argamassa projetada → hoje é 5cm
inovador
NYC Building Code adotava 1h → hoje 3h

31

Resistencia e Estabilidade

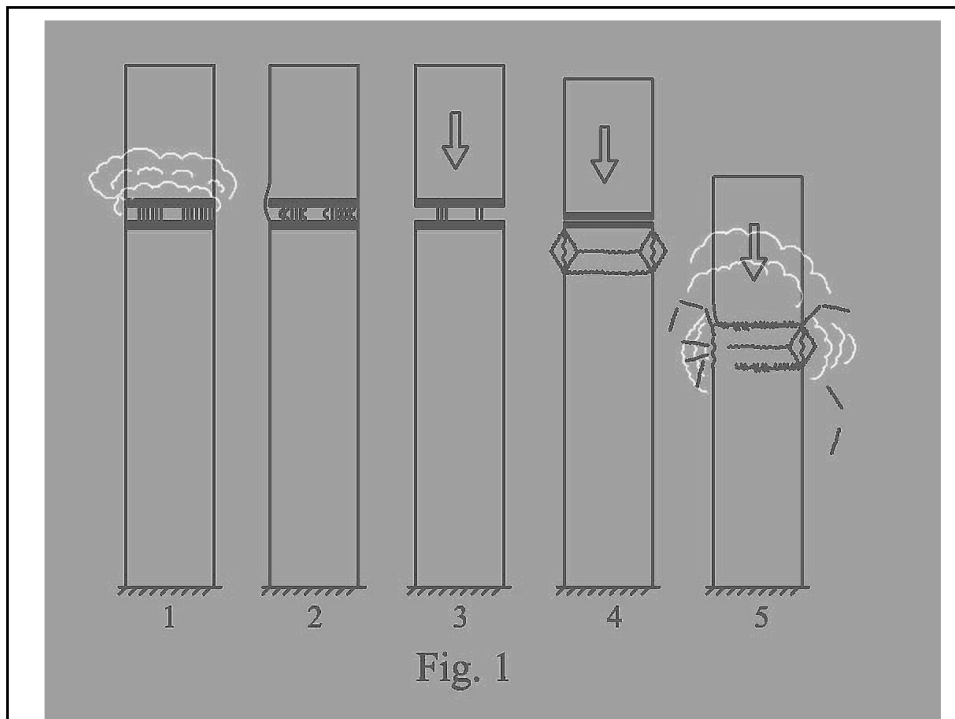
- **medidas indicaram que o impacto do Boeing 767-200 submeteu o edificio a vibrações semelhantes às de um sismo de índice 2,4 escala Richter**
- **essa vibração induzida, teve uma amplitude da ordem da metade da máxima considerada pelo efeito do vento**
- **o período de oscilação foi equivalente ao período de oscilação de todo o edificio**

32

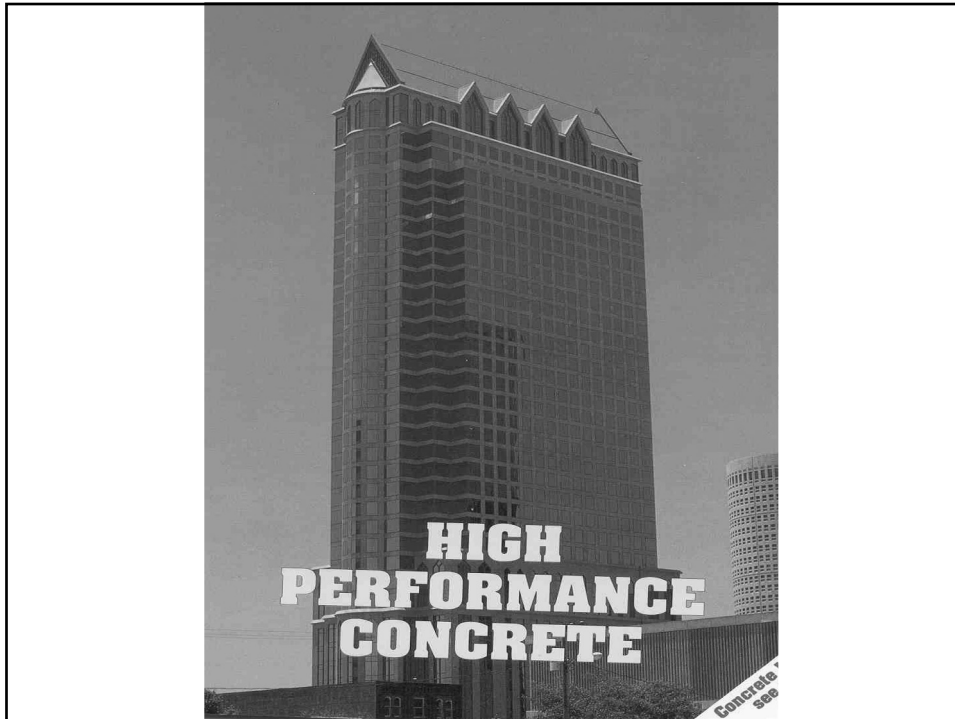
As Piores Consequencias do Impacto

- **soltou a proteção térmica**
- **comprometeu o sistema sprinkler**
- **comprometeu o abastecimento de água**
- **disseminou o combustível**
- **incrementou a ventilação**

33



34



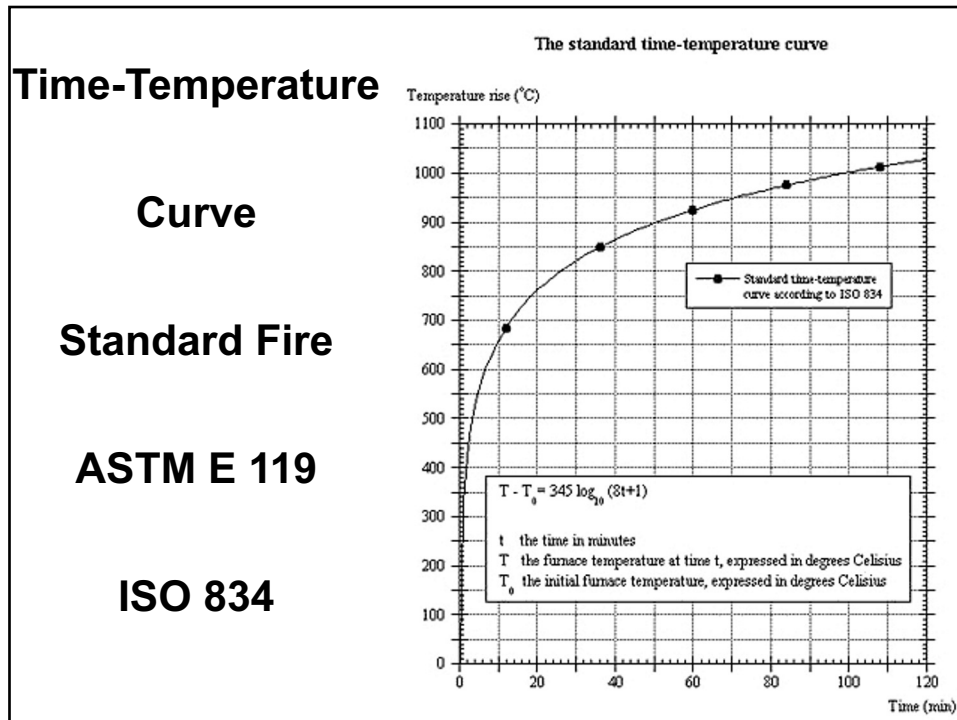
35

Concreto bajo fuego

- ✓ condiciones reales
- ✓ condiciones de laboratorio

- ❖ resistencia disminuye
- ❖ ocurre destacamento (spalling)
- ❖ concreto puede tener destacamento explosivo
- ❖ HSC puede tener fuerte destacamento explosivo

36



37

Concreto bajo Fuego
opciones de investigación

PROBETAS cilíndricas o cubicas
5cm a 15cm diámetro, 5cm a 20cm arista,
variar áridos, resistencia

ELEMENTOS estructurales aislados
pilares, vigas y losas
distintos recubrimientos, dimensiones, tasa de
acero, resistencia, áridos

ESTRUCTURA

38

Concreto bajo Fuego

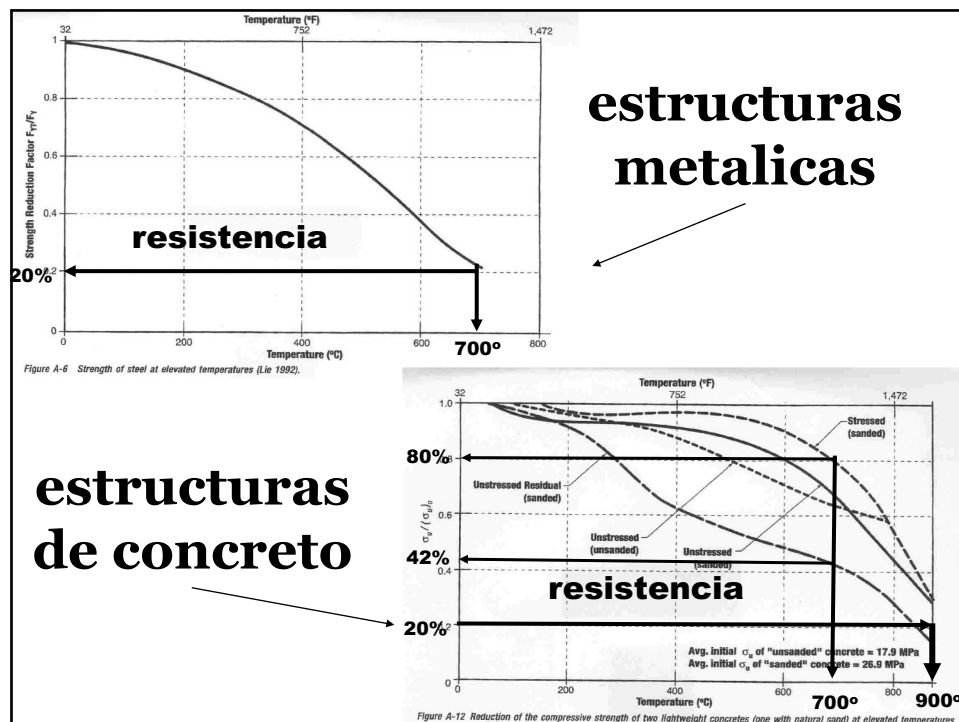
opciones de investigación

PROBETAS

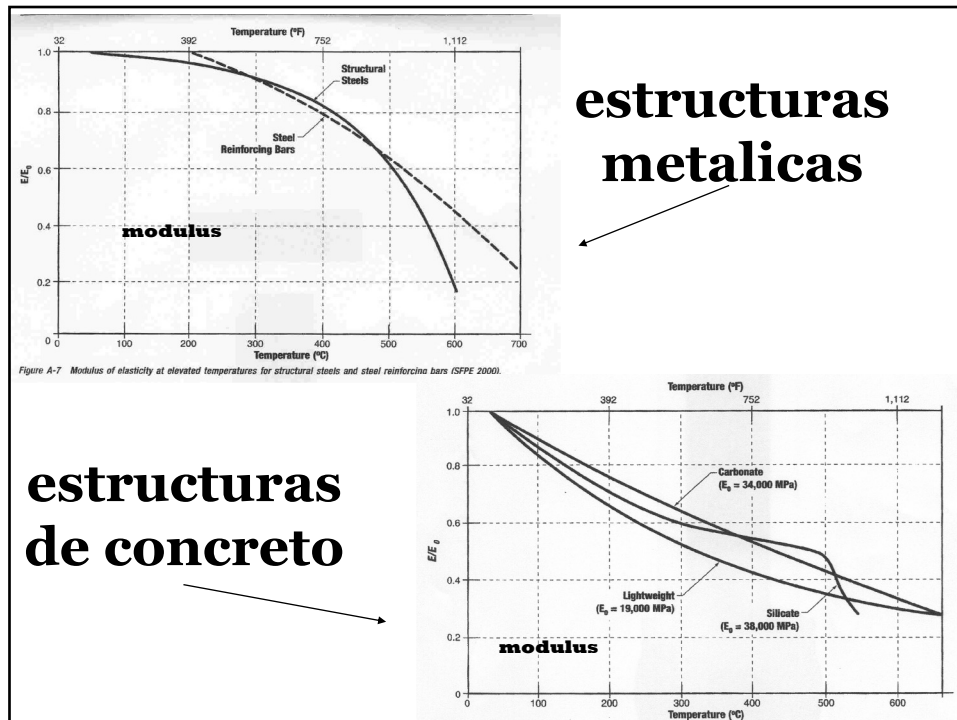
ELEMENTOS

ESTRUCTURA

39



40



**estructuras
metalicas**

**estructuras
de concreto**

41

Concreto bajo Fuego

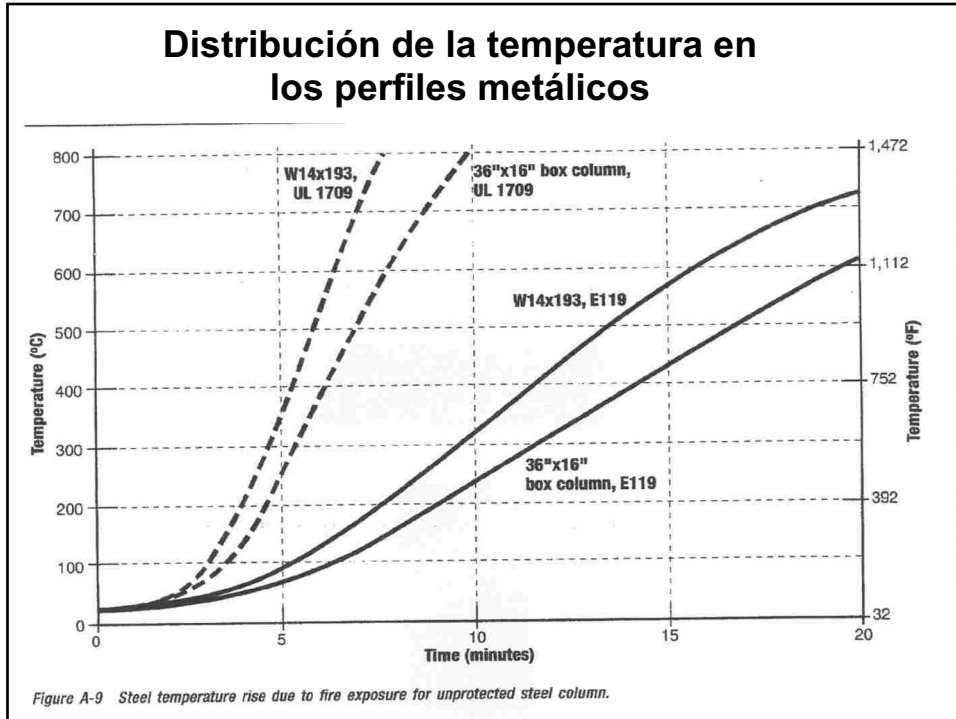
opciones de investigación

PROBETAS

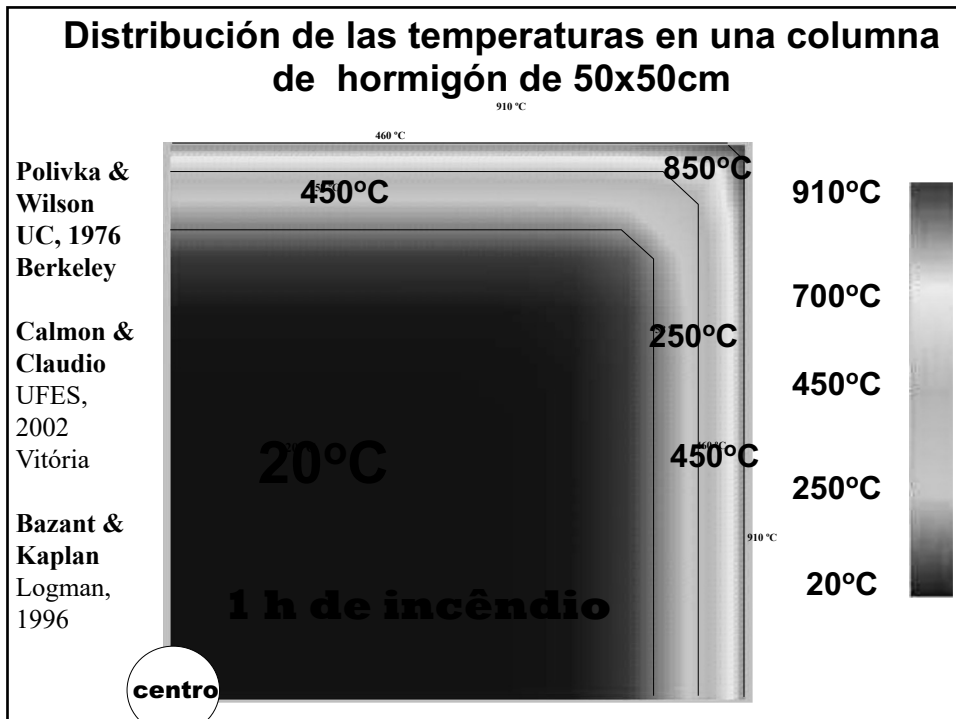
ELEMENTOS

ESTRUCTURA

42

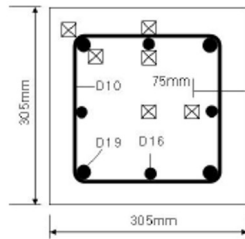


43

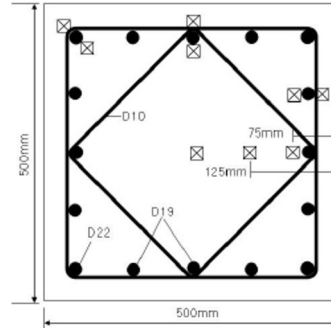


44

influencia de la sección transversal



30,5cm x 30,5cm x 3,4m



50cm x 50cm x 3,4m

**120MPa
HSRC**

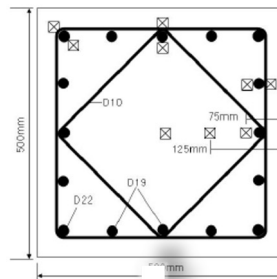
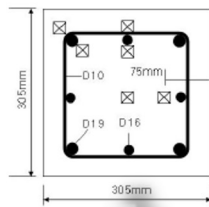
Park et al, 2007

45

influencia de la sección transversal

50cm x 50cm x 3,4m

30,5cm x 30,5cm x 3,4m



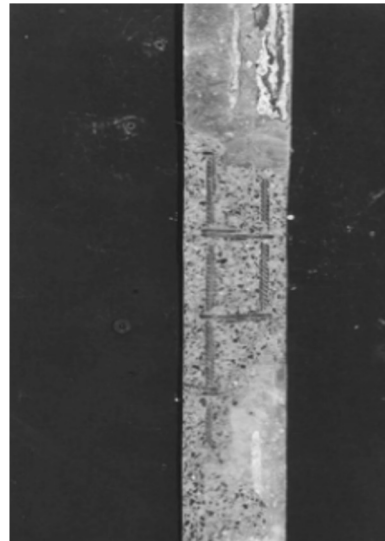
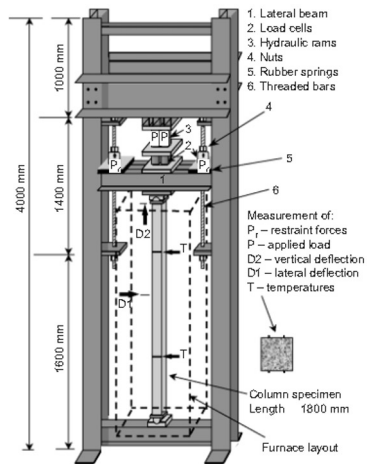
- ✓ **spalling: 13mm**
- ✓ **fire → 176min.**
- ✓ **collapsed**

- ✓ **spalling: 0mm to 5mm**
- ✓ **fire: 240min.**
- ✓ **no collapse**

Park et al, 2007

46

pilar !!??



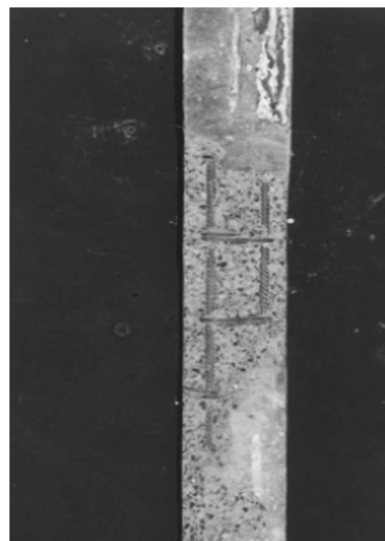
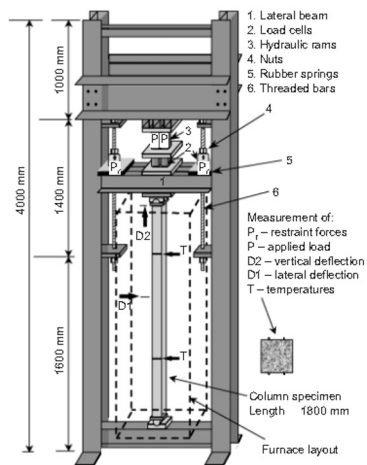
cross section 12,5cm x 12,5cm

Benmarce & Guenfoud, 2005

47

pilar !!??

> 40cm



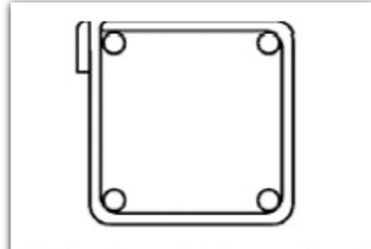
cross section 12,5cm x 12,5cm

Benmarce & Guenfoud, 2005

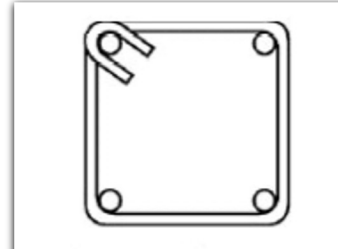
48

detalles de armadura

cerchos en pilares



incorrecto



correcto

Kodur, 2005

49

incorrecto



correcto



Kodur, 2005

50

recubrimiento

40mm

✓ spalling: 13mm to 18mm

✓ fire: 4 h

✓ no colapse

✓ 500°C → after 2h

70mm

✓ spalling: 15mm to 30mm

✓ fire: 4 h

✓ no colapse

✓ 500°C → after 3h

Park & Lee (2008)

51

Concreto bajo Fuego

opciones de investigación

PROBETAS

ELEMENTOS

ESTRUCTURA

52

estructura de concreto

The Cardington Fire Test

By Pal Chana and Bill Price, British Cement Association
Jul 15, 2003, 09:00

- ✓ 7 stories
- ✓ 25m high
- ✓ slab → 15cm $f_{ck} = 37\text{MPa}$
- ✓ beam → 2cm $f_{ck} = 74\text{MPa}$
- ✓ column → 4cm $f_{ck} = 100\text{MPa}$
- ✓ calcáreo and granite
- ✓ RH > 80%



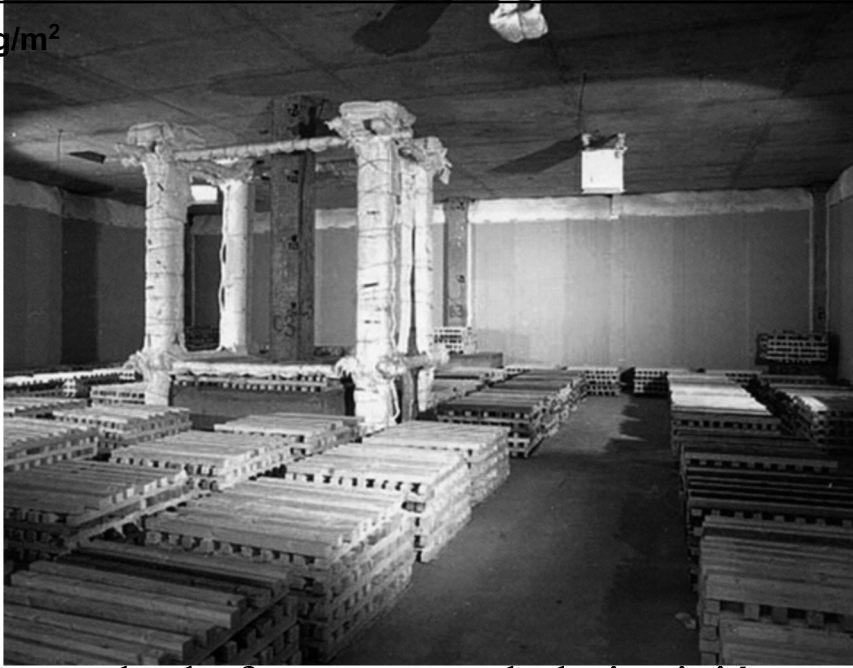
Cardington Concrete Building Frame

53



54

40kg/m²



sala de fuego antes de la ignición

55

**despues de
120min**

56



57

Cardigan conclusion:

1. The concrete structure survived an intensive fire without collapse;
2. The building satisfied the relevant performance criteria of load bearing function (R), insulation (I) and integrity (E), when subjected to a realistic fire;
3. Extensive spalling of the first floor slab was observed but did not compromise the structural integrity of the floors under the imposed loads;

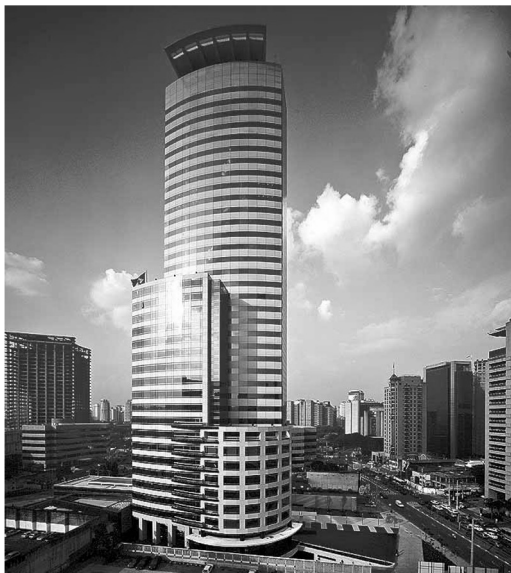
58

INVESTIGACIÓN
Universidad de São Paulo
BRASIL
2002 → 2010

PhD student: Carlos Britez
Supervisor: Paulo Helene

59

história



Edifício e-Tower
São Paulo Brasil
2002
 $f_c = 125\text{MPa}$
world record
6 pilares en 7 pisos

60



concreto

61



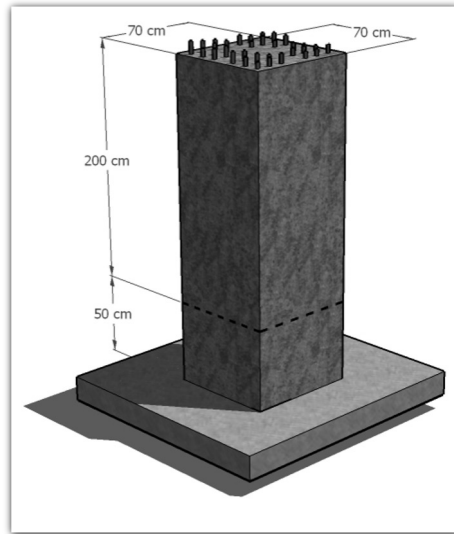
“ HPCC in Brazilian Office Tower”

Concrete International. ACI, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003

HELENE, Paulo &
HARTMANN, Carine

62

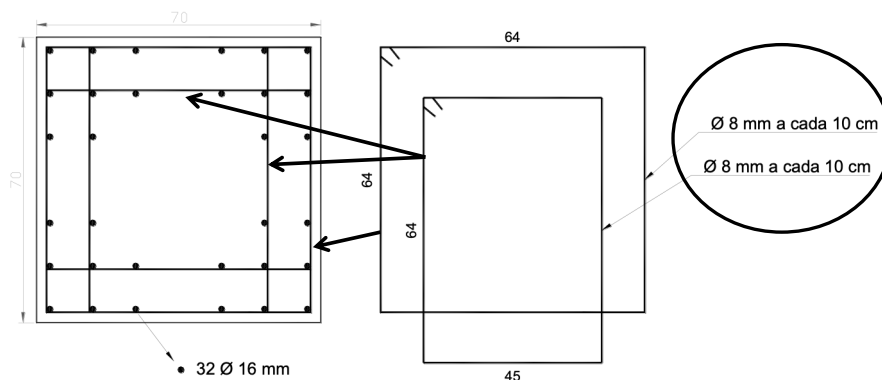
Pilar Ensayado



- ✓ 70cm x 70cm
- ✓ altura: 2m
- ✓ peso: 2500kg
- ✓ edad: 8 años
- ✓ $f_c = 140\text{MPa}$
- ✓ recubrimiento: 25mm

63

sección transversal



64

**pilar similar a los reales
mantenido en ambiente
externo**



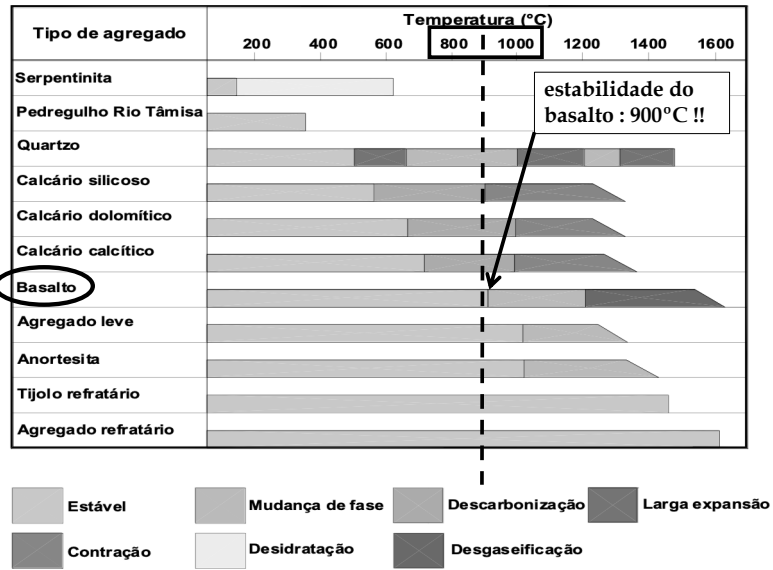
65

originalidad de la investigación

- ✓ **petrografia de los áridos (basalto)**
- ✓ **envejecimiento natural**
- ✓ **concreto colorido (pigmentado)**
- ✓ **concreto de alta resistencia**

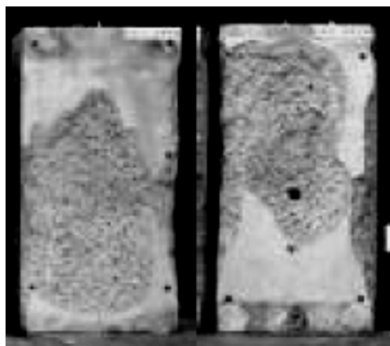
66

Áridos (*fib* bulletin 38, 2007)

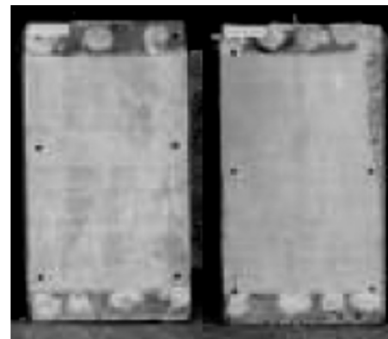


67

influencia de la edad ...



2 months



1 year

Morita et al, 2002

68

concreto colorido



69

pilar → corte y transporte



hilo de diamante



70

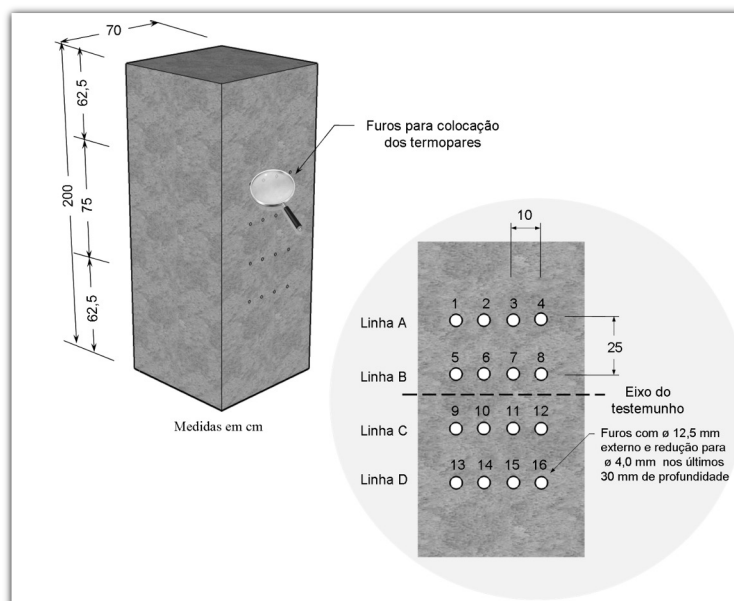
testigos extraídos



140 MPa

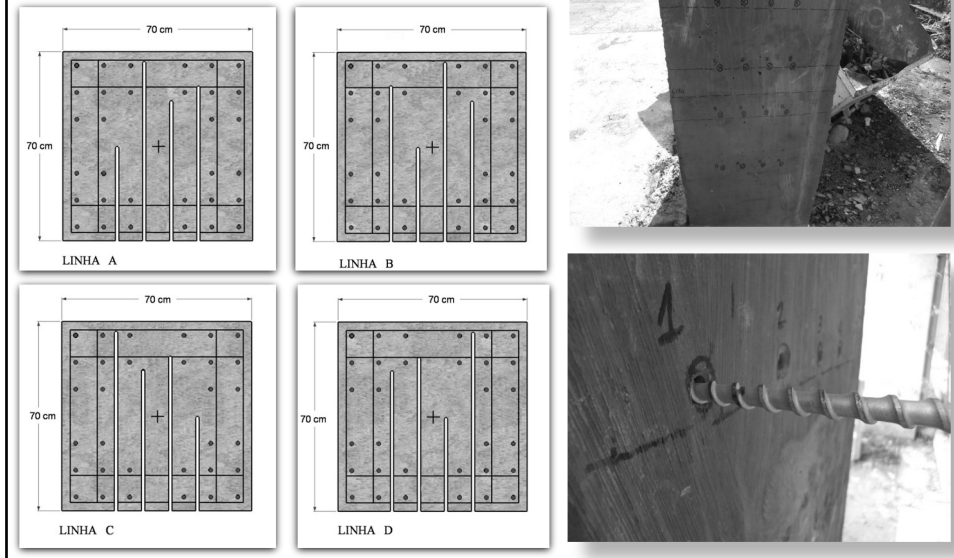
71

16 termopares



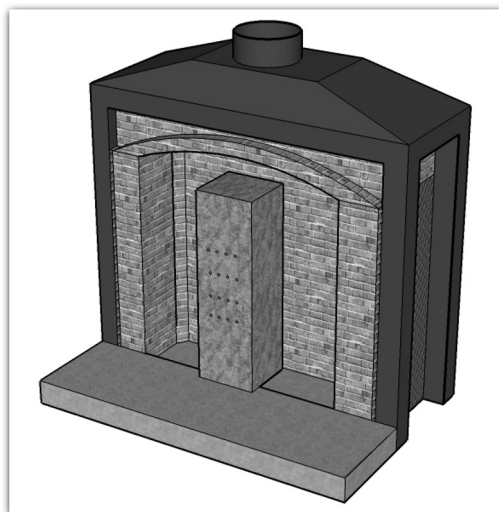
72

Inserindo termopares



73

Laboratório (horno)



- ✓ **sin carga**
- ✓ **3 lados (faces)**
- ✓ **ISO 834**
- ✓ **180 min**

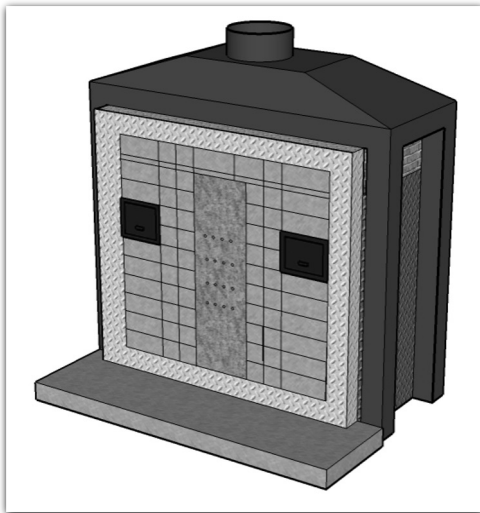
74

protección con fibras ceramicas



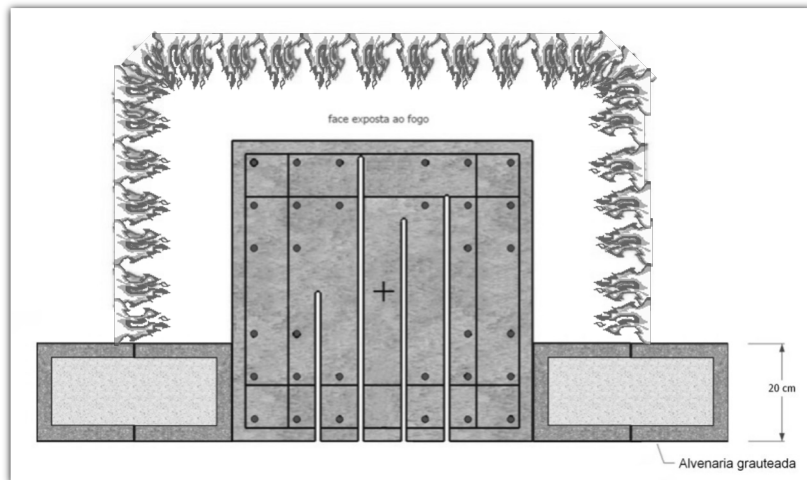
75

Laboratório horno de alta temperatura



76

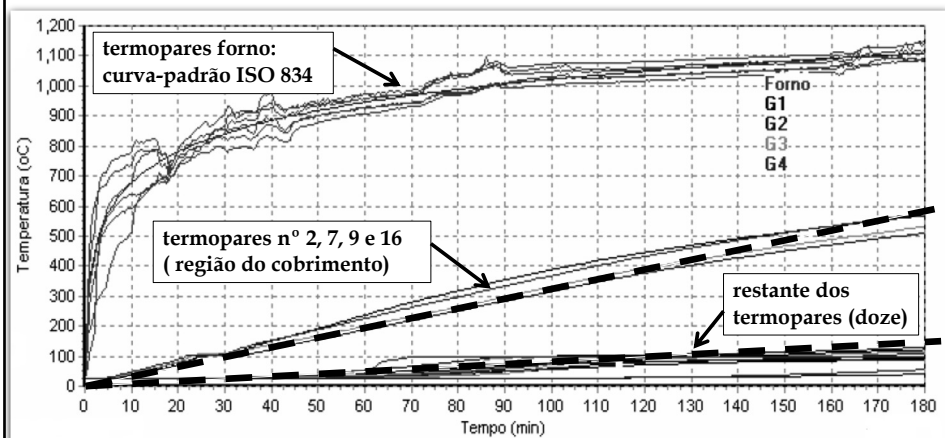
condiciones de ensayo (3 lados)



ISO 834 standard fire

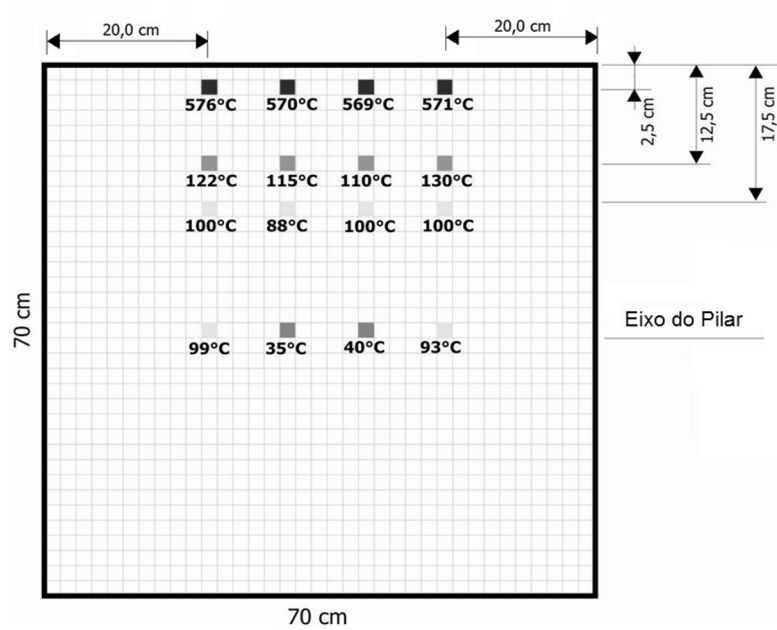
77

evolución de las temperaturas



78

temperaturas a los 180min



79

después del ensayo 180min fuego + 3 días



80

Integridad



aristas perfectas

81

Integridad después de 180min



- ✓ sonidos pop corn < 36min
- ✓ distribución uniforme
- ✓ < 48mm (profundidad)
- ✓ no explosivo *spalling*

82

Integridad



**área de acero
expuesta
< 5%**

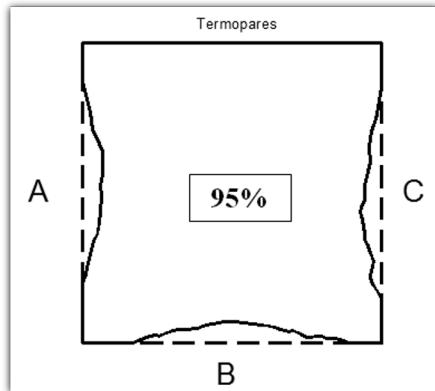
83

Integridad



84

Integridad



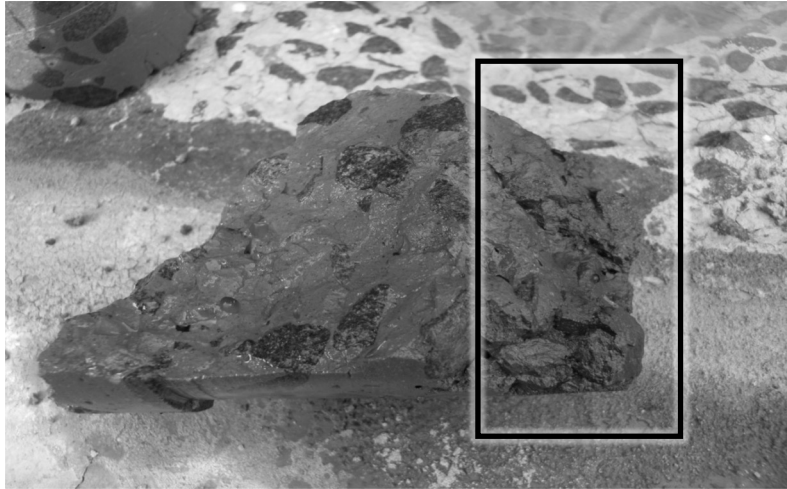
spalling medidos en 450 puntos (150 cada lado)

85



86

“pigmento como termometro natural”



87

“termometro natural”



- ✓ pigmento rojo
- ✓ profundidad $\approx 55\text{mm}$
- ✓ Fe_2O_3 to Fe_3O_4
- ✓ hematita a magnetita

cerca de 600°C

88



**WINDSOR Building
Steel-Concrete Structure**

**Madrid
Spain
2005**

“ the behavior of reinforced concrete structure under severe fire condition, 16h, was extremely positive and much better than standard (EUROCODE II) prediction under fire conditions”

Jose Calavera Ruiz
Ingeniería Estructural. AIE n.37, 2006

89

HSC > 50MPa

**EXPLODE frente
a incêndio**

(explosive spalling)

MITO ou VERDADE ?

90

VERDADE

**HSC > 50MPa
pode explodir o corpo-de-
prova no ensaio, mas
“difícilmente” o pilar, viga
ou lage armados com um
critério adequado de
projeto estrutural**

91

Conclusões

- 1. Investigação baseada somente no comportamento dos materiais, não é suficiente para explicar o efetivo comportamento das estruturas sob incêndio**
- 2. Ainda desconhecemos todos os fatores intervenientes e necessita mais estudos experimentais adequados e consistentes**
- 3. Ainda não é possível controlar e prever com segurança o comportamento sob incêndio**

92

*baseadas no CTBUH → Council on Tall Buildings
and Urban Habitat*

93

Em 1.997 as torres gêmeas
Petronas, em Kuala
Lumpur, toda de concreto,
superou em altura a torre
Sears em Chicago
(metálica)

94

Passados somente
13 anos, 7 novos
edifícios mais altos
que o Petronas
foram construídos

95

Hoje há **57** edifícios em
construção com altura
superior a **300m**, para
serem inaugurados até
2013...

96

Desse total de 57

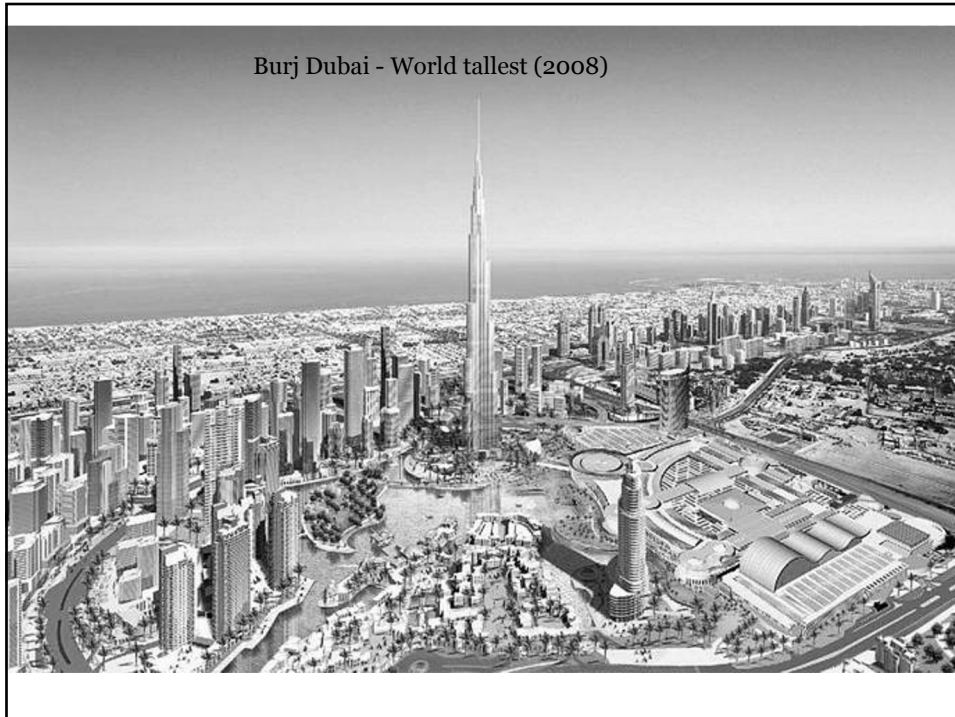
“arranha-céus”:

- 37 são em concreto
- 19 são mistos concreto / aço
- apenas 1 é metálico

97

Inclusive o mais alto edifício do mundo, hoje, a Burj Khalifa, em Dubai, tem estrutura em concreto

98



99

Em 100anos, o concreto
superou todos os limites
e fronteiras do
conhecimento em
Arquitetura e
Engenharia de projeto e
de construção!

100

e... ainda continua em franco progresso e evolução não sendo possível prever seus limites, nem seu substituto !

101



102