



Comportamiento del Concreto y del Acero bajo Incendio

Paulo Helene

Presidente ALCONPAT

Diretor PhD Engenharia

Diretor Conselheiro IBRACON

Prof. Titular Universidade de São Paulo USP

fib (CEB-FIP) member of Model Code for Service Life

Hotel Vista Real

15 de Marzo de 2011

Guatemala

1

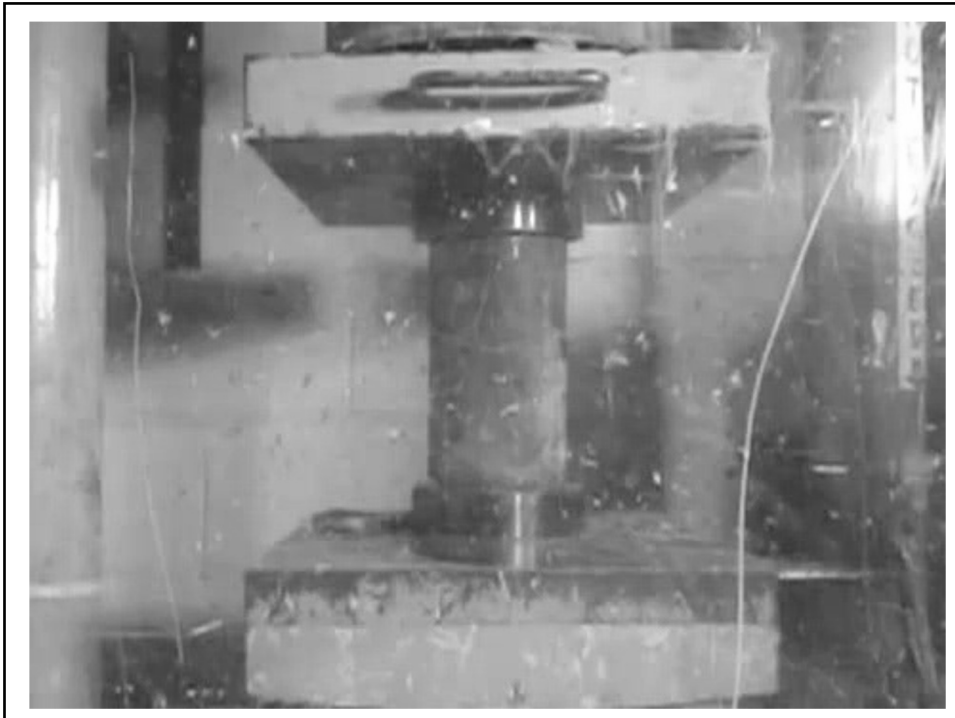
Concreto de Alta Resistencia *Mitos y Verdades*

2

HSC > 50MPa

**EXPLOTA en
rotura**

3



4

VERDAD

**HSC > 50MPa
puede explotar la probeta
en ensayo, pero nunca el
pilar, viga o losa, pues la
ductilidad es uno de los
criterios de diseño
estructural**

5

**HSC > 50MPa
consume mucho
cemento y no es
SOSTENIBLE**

6

VERDAD

**puede consumir más
cemento por m³, pero
la cantidad de CO₂ y
de Energía y de H₂O
disminuye con MPa**

CO₂ / MPa

7

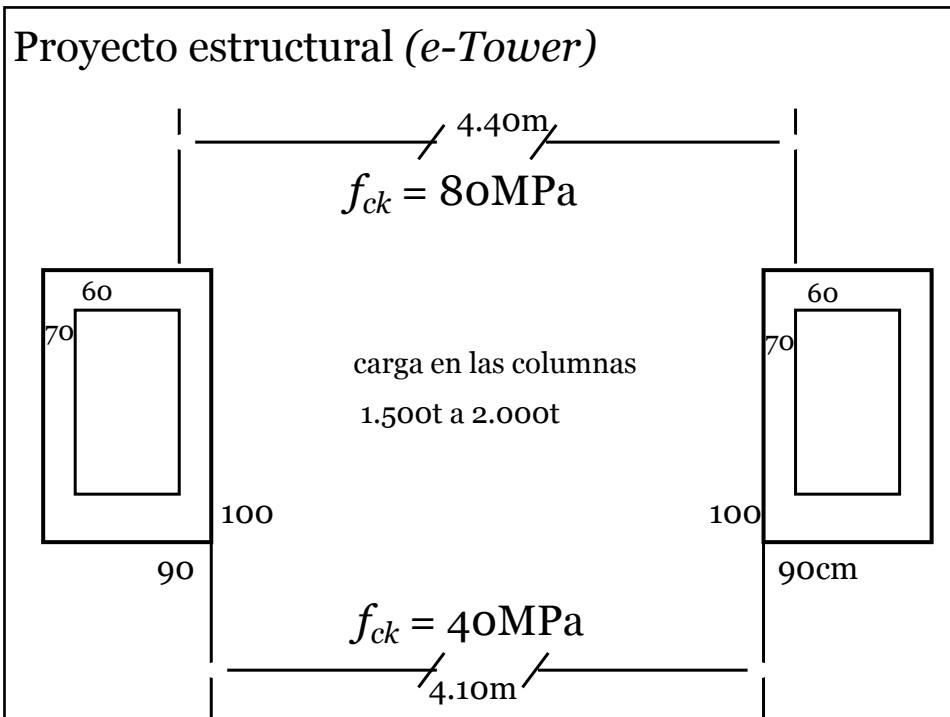


8

- ▼ Edificio e-Tower SP
- ▼ 42 pisos
- ▼ Heliponto
- ▼ Pileta semi-olímpica
- ▼ Academia de gimnástica
- ▼ 2 restaurantes
- ▼ Concreto colorido
- ▼ f_{ck} pilares = 80MPa



9



10



11



12

Economía de recursos naturales

Original:

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

sección transversal \rightarrow 90cm x 100cm

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

HPC / HSC:

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

sección transversal \rightarrow 60cm x 70cm

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

13

Economía de recursos naturales

- **70% menos arena**
- **70% menos grava**
- **53% menos concreto**
- **53% menos agua**
- **20% menos cemento**

14

HSC > 50MPa

**EXPLOTA
frente al fuego
(*explosive spalling*)
*MITO o VERDAD ?***

15

Comprehensive fire
protection and safety
with concrete



**European
Concrete Platform**

April 2007

**European
Concrete Platform
ASB**



**BRITISH
PRECAST**



16

Piores incêndios do mundo nos últimos anos

Filipinas - 18 de março de 1996: 152 mortos em um incêndio numa boate de Manila.

Índia - 23 de fevereiro de 1997: 200 mortos em um incêndio durante uma cerimônia religiosa no Estado de Orissa.

Arábia Saudita - 15 de abril de 1997: 343 mortos e 1.537 feridos no incêndio que atingiu 7.000 barracas de campanha de peregrinos perto de Meca.

Indonésia - 23 de maio de 1997: 136 mortos no incêndio de um centro comercial em Banjarmasin (ilha de Bornéu).

Camarões - 14 de fevereiro de 1998: 220 mortos no descarrilamento e explosão de um trem em Iaundê.

Indonésia - 15 de maio de 1998: 200 mortos no incêndio de um centro comercial em Jacarta.

Nigéria - 18 de outubro de 1998: Mais de mil mortos e centenas de feridos na explosão de um oleoduto e posterior incêndio em Warri, sudeste do país.

Congo - 14 de abril de 2000: 104 mortos em um incêndio num depósito de munições no aeroporto de Ndjili, em Kinshasa.

17

China - 26 de dezembro de 2000: 309 mortos em um incêndio numa boate de Luoyang (centro).

Peru - 29 de dezembro de 2001: 274 mortos e 173 desaparecidos em um incêndio num centro comercial no centro de Lima.

Egito - 20 de fevereiro de 2002: 361 mortos em um incêndio num trem da linha Cairo-Assuan.

Coréia do Sul - 19 de fevereiro de 2003: 198 mortos em um incêndio de origem criminosa no metrô de Daegu.

Estados Unidos - 20 de fevereiro de 2003: cem mortos e 200 feridos em um incêndio numa boate de West Warwick (Rhode Island, nordeste).

Filipinas - 27 de fevereiro de 2004: Mais de cem desaparecidos em um incêndio numa embarcação no litoral de Manila.

Honduras - 17 de maio de 2004: 104 presos morrem em um incêndio na prisão de San Pedro Sula (norte do país).

Paraguai - 1º de agosto de 2004: 400 mortos em um incêndio num centro comercial de Assunção.

Argentina - 31 de dezembro de 2004: 194 mortos e mais de 600 feridos em um incêndio numa boate de Buenos Aires.

18

FUEGO

- 1. Asfixia / toxidez**
- 2. Pânico / pisoteamento**
- 3. Quemadura**
- 4. Colapso (bomberos)**

19

Edifício ANDRAUS
São Paulo
Brasil
1972



21



Edificio ANDRAUS
Estructura de Concreto Armado

32 pisos de oficinas

Construcción: 1962

Incendio: 24 Febrero 1972

*duración: 4h
240min*

*perfectas condiciones
nada ha colapsado*

22



**aspecto
tipico de
los pilares
pos
incendio**

23



aspecto tipico de las vigas

24



aspecto tipico das losas

25

**Edificio JOELMA
São Paulo
Brasil
1974**



26



**Edificio JOELMA
Estructura de Concreto Armado**

**26 pisos
10 pisos de garage
+ 15 pisos de oficinas**

Construcción: 1971

Incendio: 1 Febrero 1974

***duración: 6h30min
390min***

***Perfectas condiciones
Nada ha colapsado***

27



28

El día domingo 17 de octubre de 2004 a las 00:05 am., se inicio un incendio en el piso 34 de la Torre "Este" de Parque Central, Caracas, Venezuela, el incendio se extinguió por si solo al final del día domingo sobre las 20h de la noche.

Los bomberos de Caracas trabajaron arduamente para sofocar dicho incendio, múltiples irregularidades en los sistemas de prevención e extinción (rociadores automáticos de incendio, falta de agua y presión en las tuberías para subir agua a mas de 34 pisos entre otras cosas), motivaron que se perdió el control de la situación mas que todo por la falta de agua.

El incendio traspasó una macro losa de refugio contra incendios construida en concreto pretensado del piso 39 y siguió sin control hasta el piso 56, es de hacer resaltar que no fue sino hasta que se agoto en todo el material combustible que finalizó la conflagración por si sola.

29



30



31



32



33



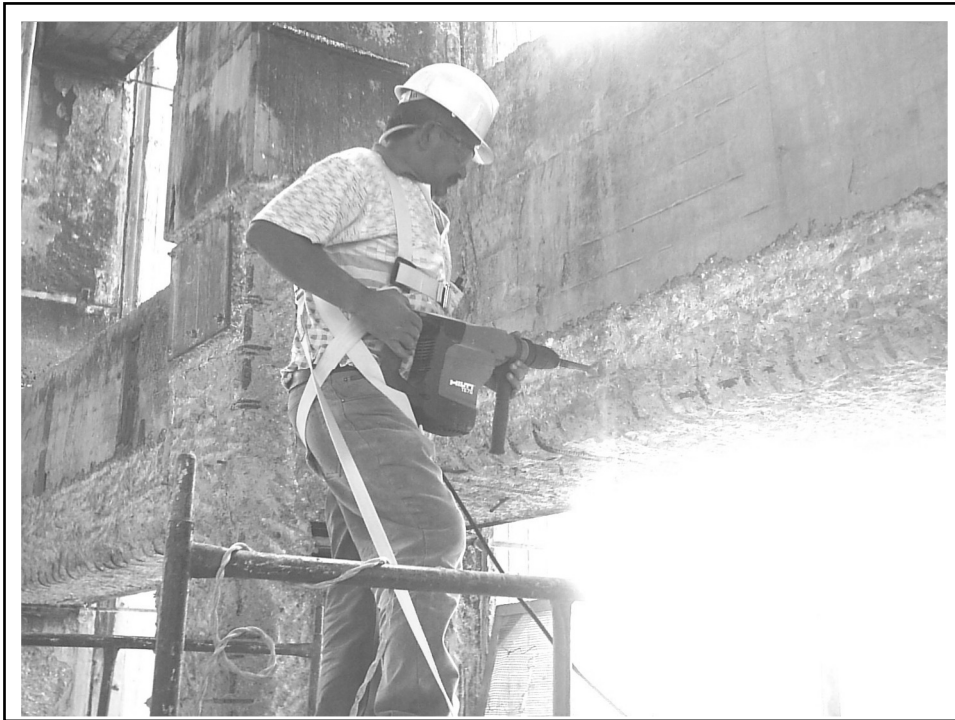
34



35

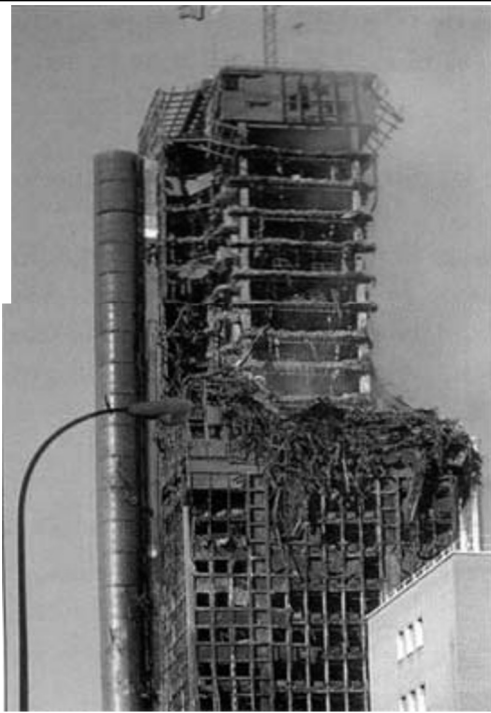


36



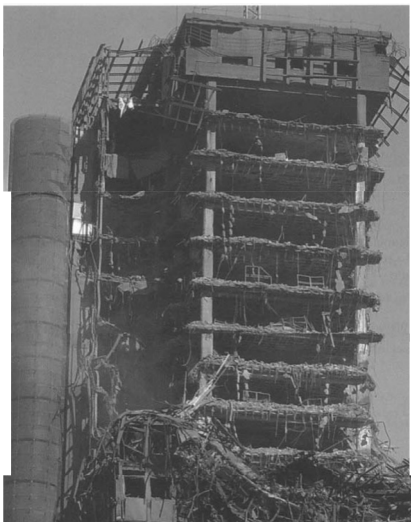
37

**Edificio WINDSOR
Madrid
España
2005**



38

**Edificio WINDSOR
Estructura mixta acero-concreto**



**37 pisos
5 pisos de garage
+ 31 pisos de oficinas**

Construcción: 1991

Incendio: 12 Febrero 2005

***Duración: 16h
960min***

***→ solamente las partes de
acero han colapsado
→ totalmente demolido***

39

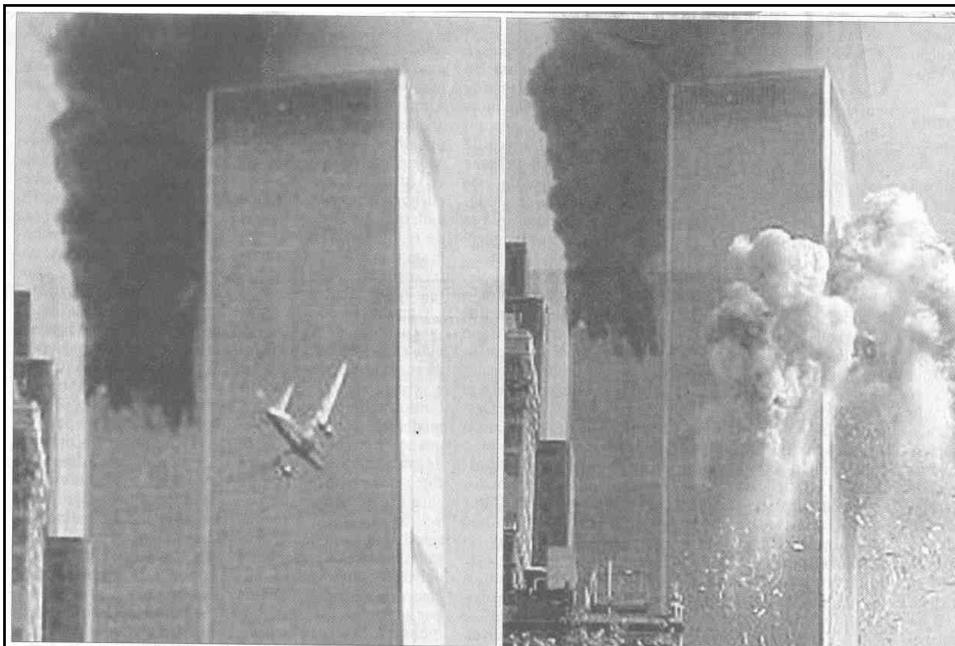


“the reinforced concrete structure, columns, beams and slabs under 16h severe fire condition , could perform well and no collapse”

... “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.

40



11 de Septiembre de 2001

41

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

44

6.000 fotos
185 fotógrafos
150h de video
15.000 p. entrevistas
17.000 ocupantes
8.500 cada (99% salieron de pisos inferiores)
93% nunca usaron escalera
WTC 1 → 1560; WTC 2 → 599
bomberos → 433

45

WTC 1 → 103 min
WTC 2 → 56 min
WTC 7 → 5h
Proyecto WTC 1 e 2 → 1964
impacto boeing 707 a 960 km/h
sin incendio
1,25cm revoque proyectado → hoy es 5cm
inovador sin ensayos
NYC Building Code adoptaba 1h → hoy 3h

46

Resistencia e Estabilidad

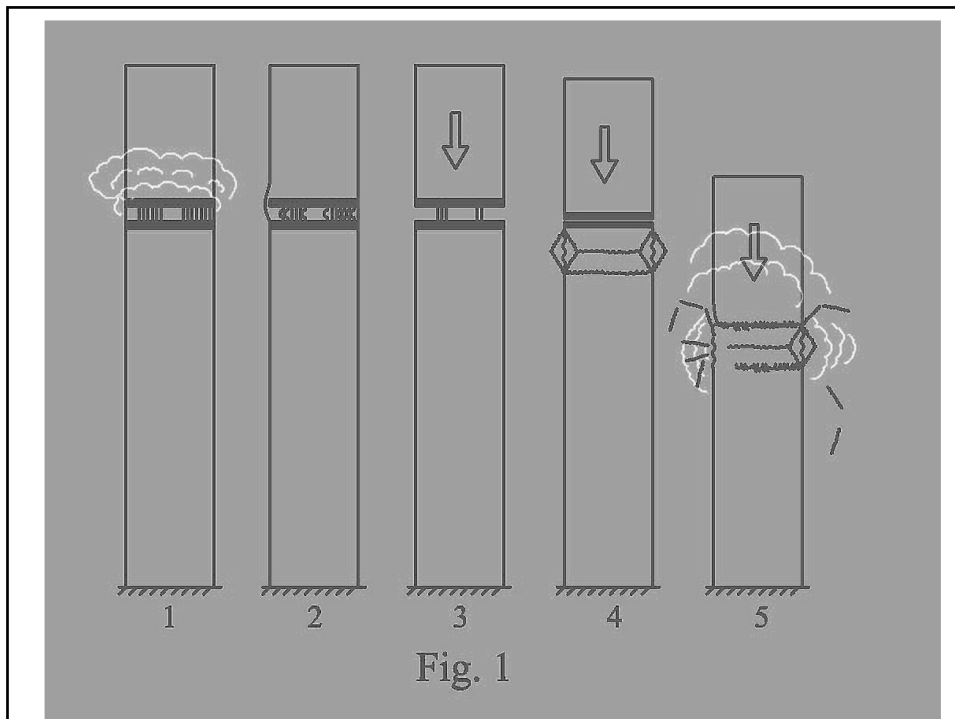
- **medidas indicaron que el impacto del Boeing 767-200ER sometió al edificio a vibraciones semejantes a las de un sismo de índice 2,4 escala Richter**
- **esa vibración inducida, ha tenido una amplitud del orden de la mitad de la máxima considerada por el efecto del viento**
- **período de oscilación fue equivalente al período de oscilación de todo el edificio**

47

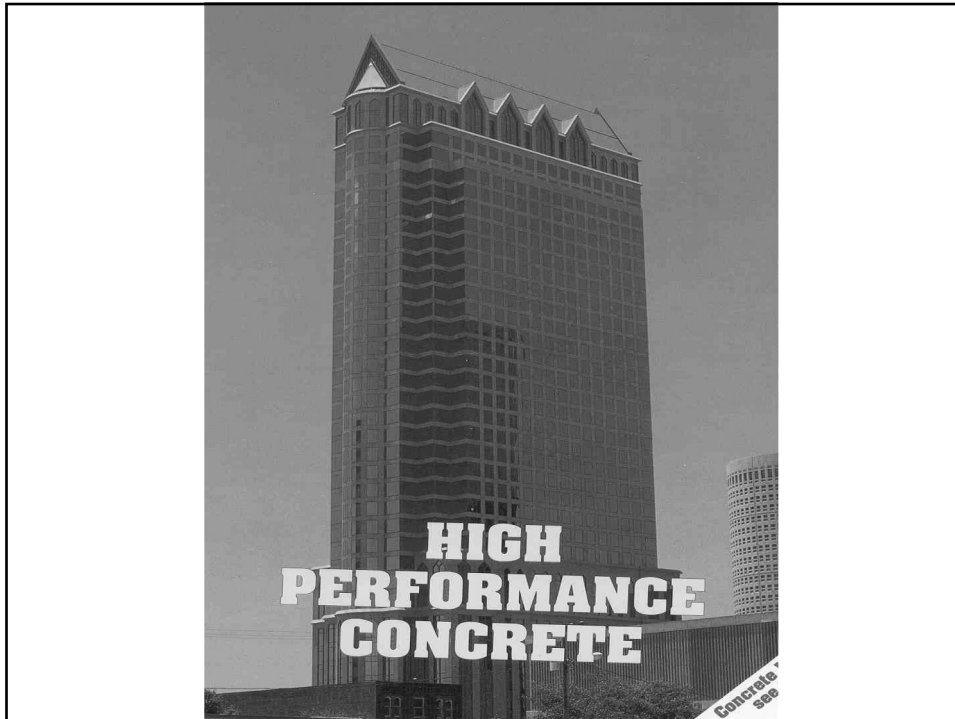
Las Peores Consecuencias del Impacto

- **despegue protección térmica**
 - **comprometió el sprinkler**
- **comprometió el abastecimiento de agua**
- **diseminación de combustible**
- **incremento de la ventilación**

48



49



50

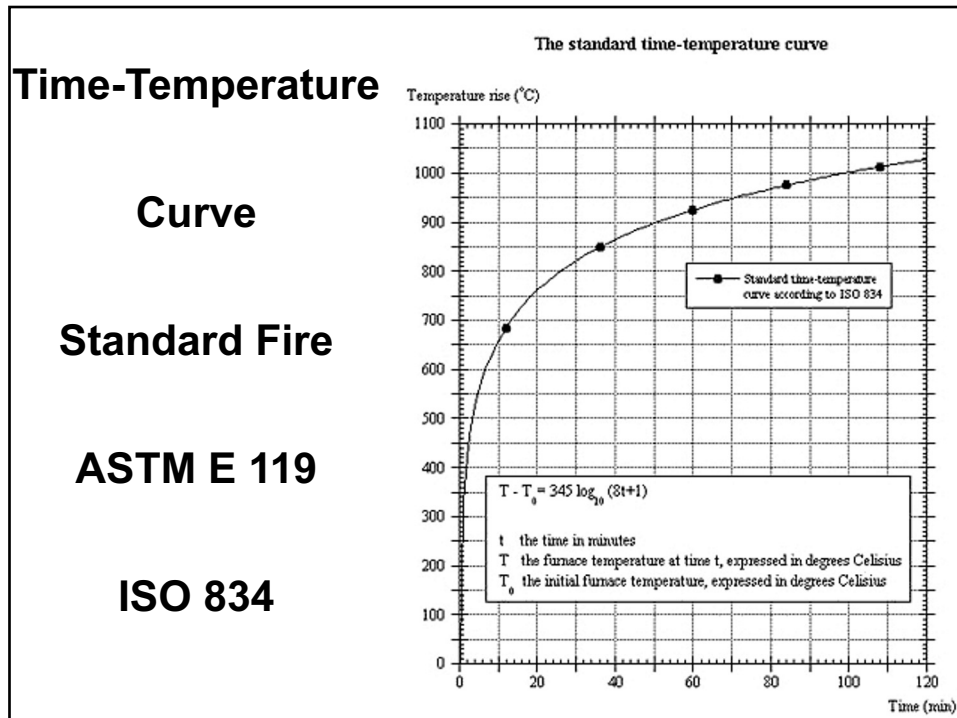
Concreto bajo fuego

- ✓ condiciones reales
- ✓ condiciones de laboratorio

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

es verdad !?!

51



52

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

53

Concreto bajo Fuego

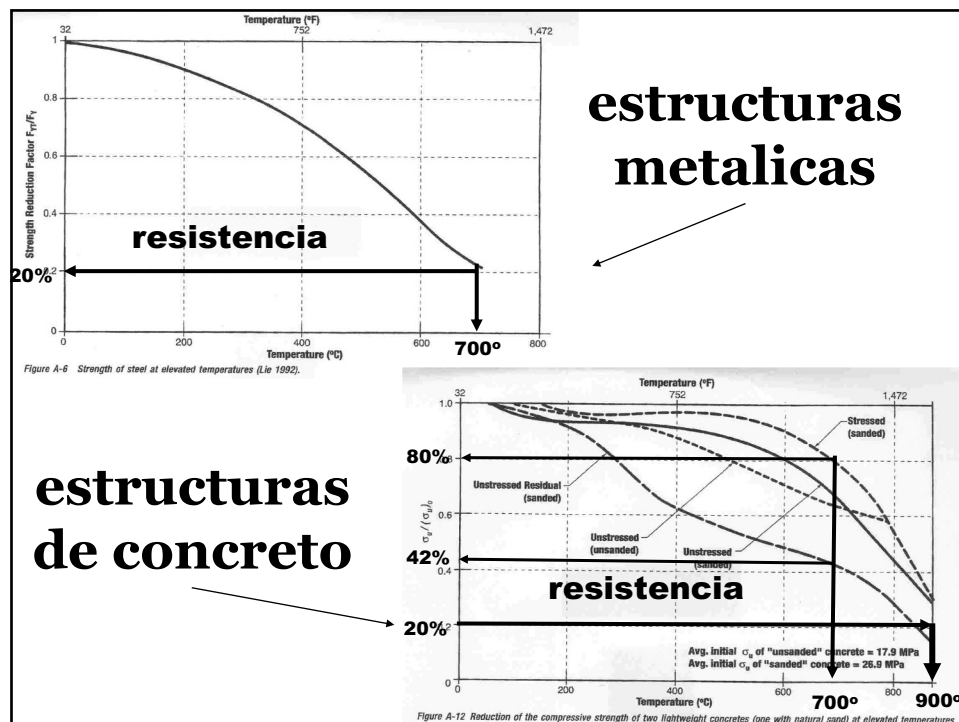
opciones de investigación

PROBETAS

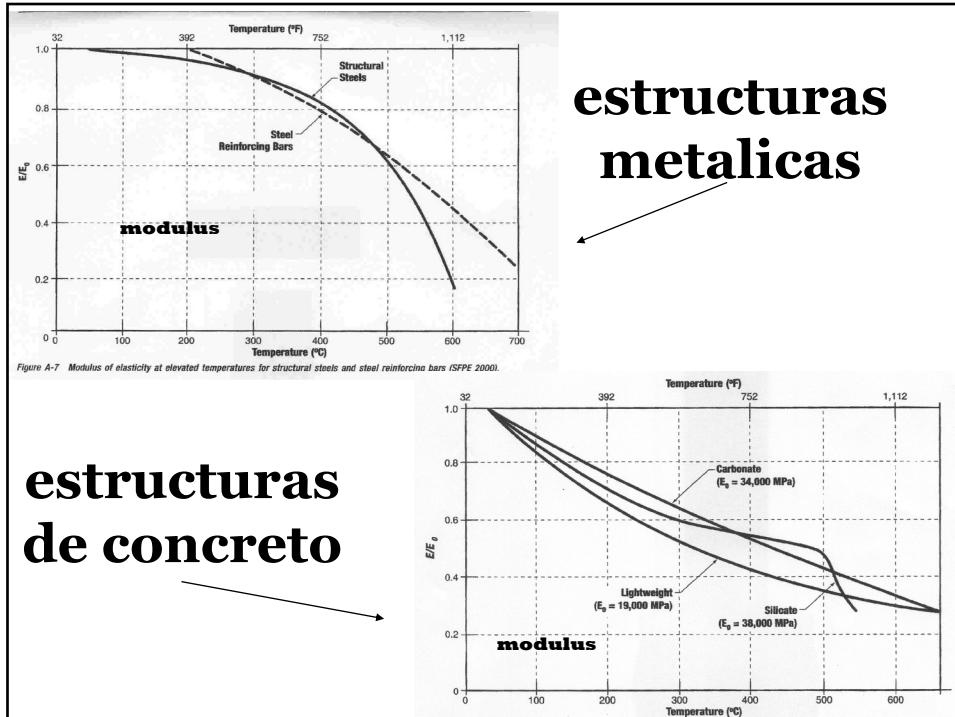
ELEMENTOS

ESTRUCTURA

54



55



56

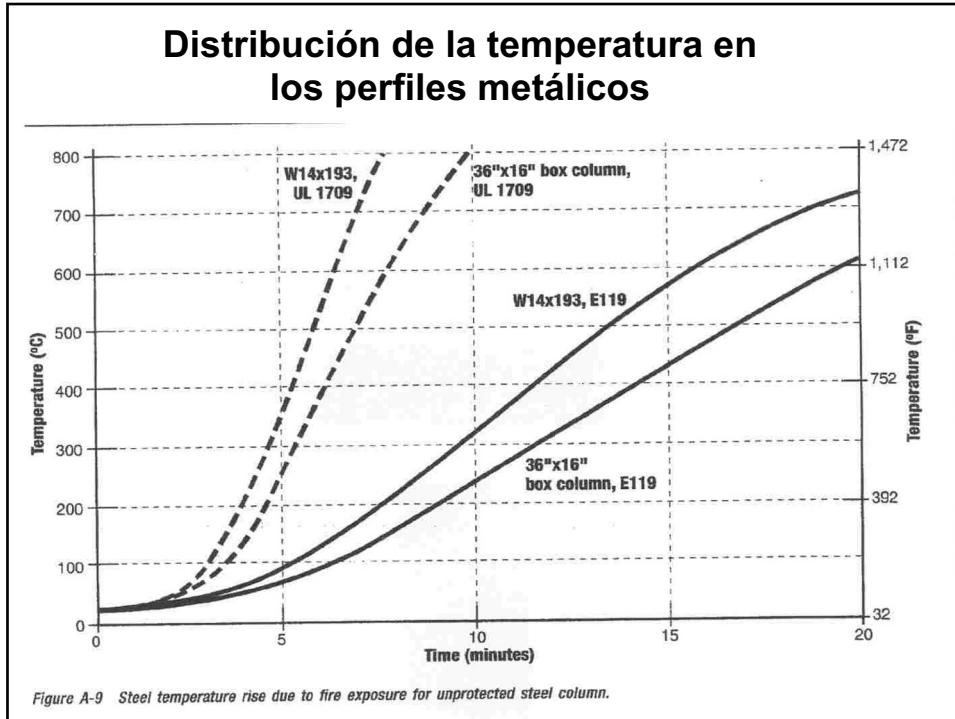
Concreto bajo Fuego
opciones de investigación

PROBETAS

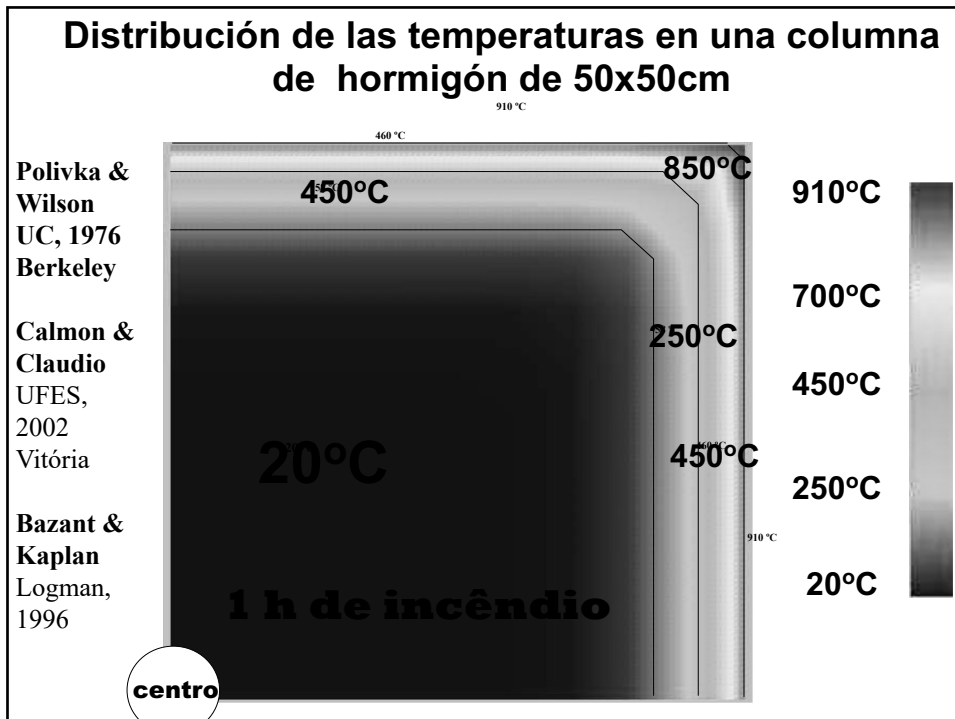
ELEMENTOS

ESTRUCTURA

57



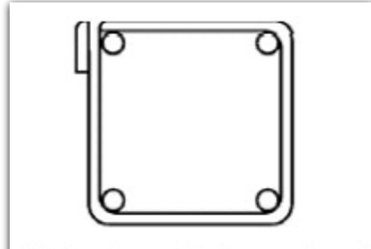
58



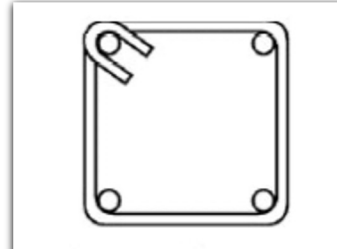
59

detalles de armadura

cerchos en pilares



incorrecto



correcto

Kodur, 2005

60

incorrecto



Configuração Convencional de Estribos

correcto



Configuração Modificada de Estribos

Kodur, 2005

61

Concreto bajo Fuego

opciones de investigación

PROBETAS

ELEMENTOS

ESTRUCTURA

62

estructura de concreto

The Cardington Fire Test

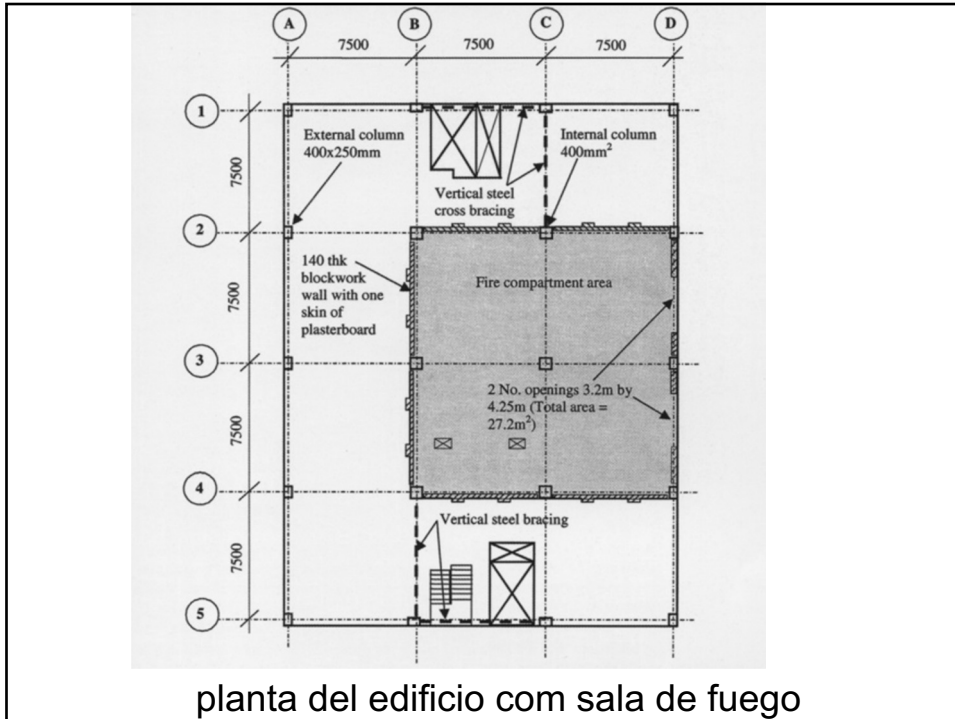
By Pal Chana and Bill Price, British Cement Association
Jul 15, 2003, 09:00

- ✓ 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

63



64



65

**despues de
120min**

66



67

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;

68

4. The maximum horizontal displacements of the floor slab was 6cm;
5. The high strength concrete columns (103MPa), which contained polypropylene fibers, performed very well;
6. The slab was able to carry the imposed loads with residual vertical displacements (7cm).

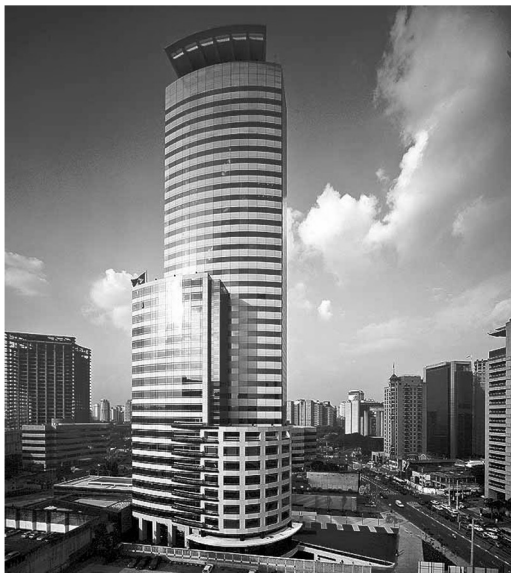
69

INVESTIGACIÓN
Universidad de São Paulo
BRASIL
2002 → 2010

PhD student: Carlos Britez
Supervisor: Paulo Helene

70

história



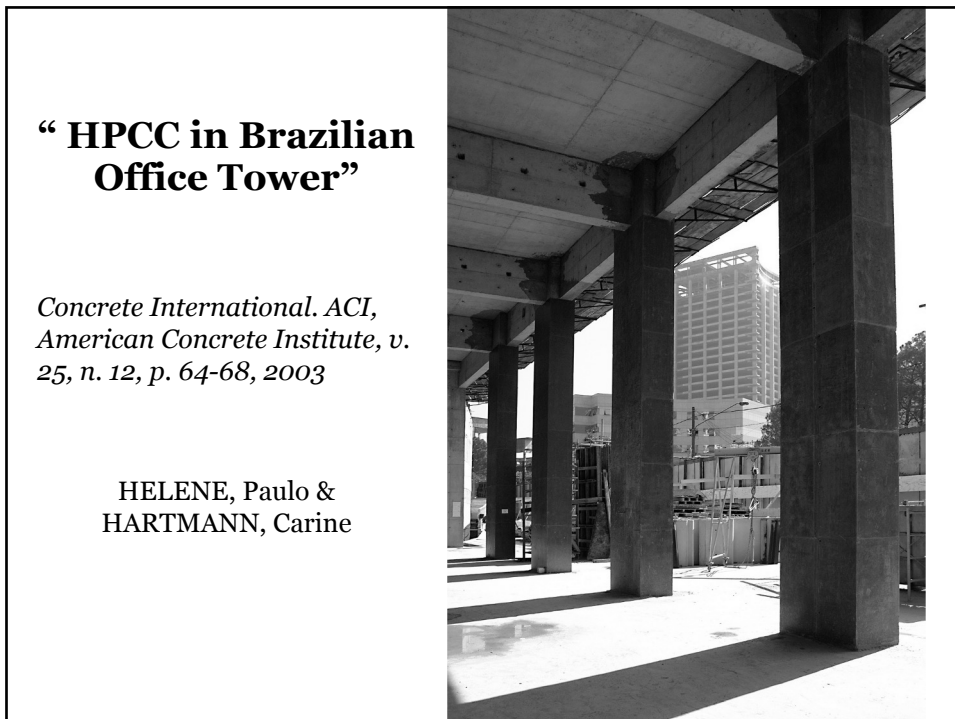
Edifício e-Tower
São Paulo Brasil
2002
 $f_c = 125\text{MPa}$
world record
6 pilares en 7 pisos

71



concreto

72



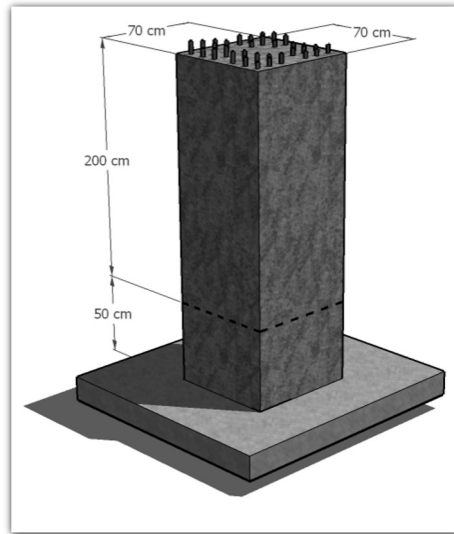
“ HPCC in Brazilian Office Tower”

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

HELENE, Paulo &
HARTMANN, Carine

73

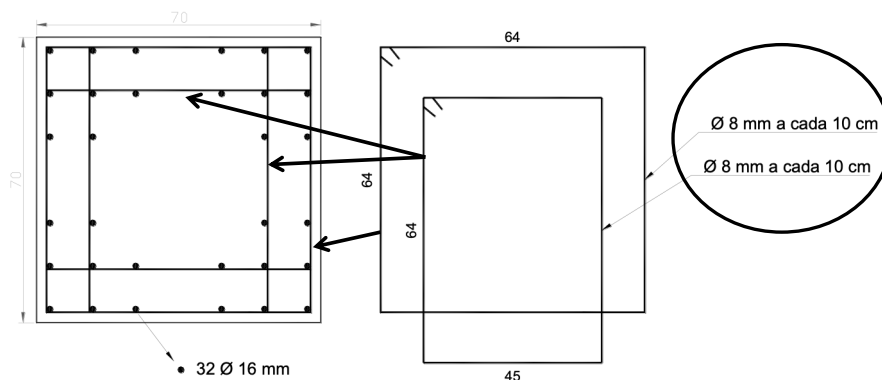
Pilar Ensayado



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

74

sección transversal



75

**Concreto bajo condiciones muy
severas de exposición**

HSCRC
High Strength Colored Reinforced
Concrete Column

8 años de edad
mantenido bajo condiciones ambientales
125MPa → 8 años atrás
ahora → 140MPa *testigos*

pigmento rojo a base de oxido de hierro (inorganico)

3h (180min) fuego estándar en horno

76

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



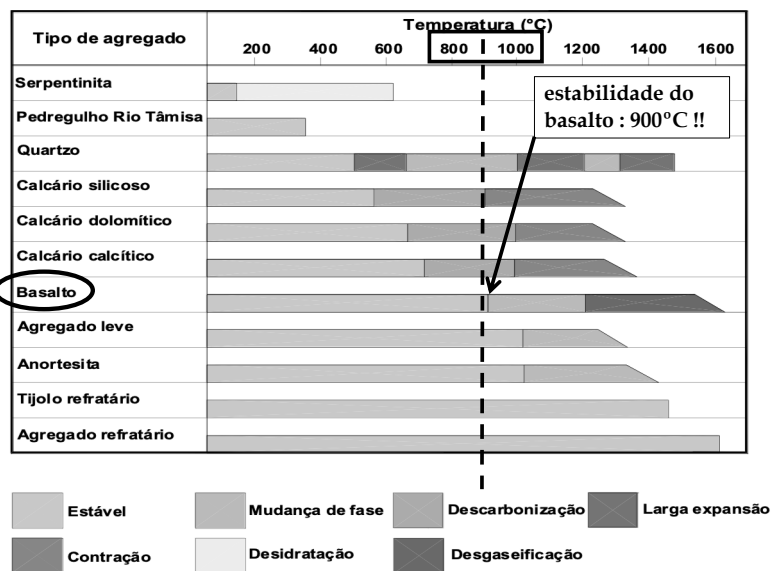
77

originalidad de la investigación

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

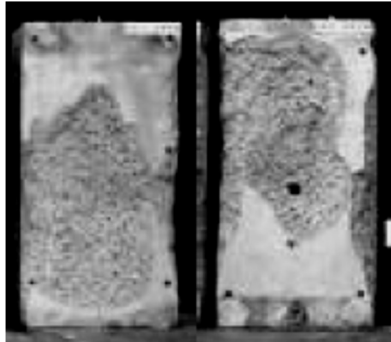
78

Áridos (*fib* bulletin 38, 2007)

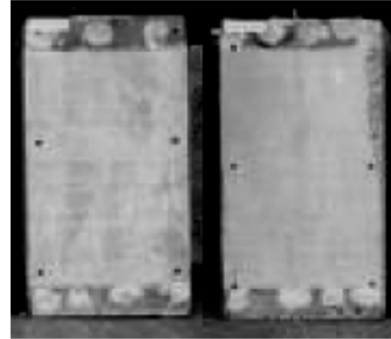


79

influencia de la edad ...



2 months



1 year

Morita et al, 2002

80

concreto colorido



81

pilar → corte y transporte



hilo de diamante



82

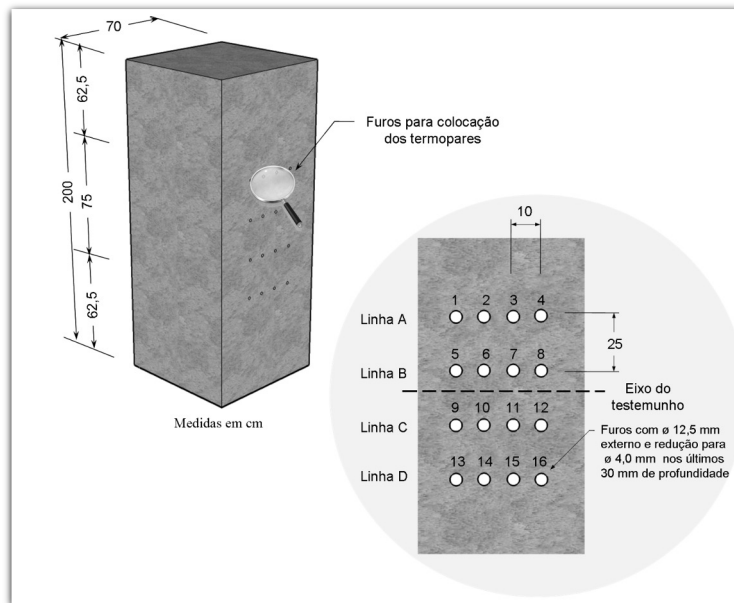
testigos extraídos



140 MPa

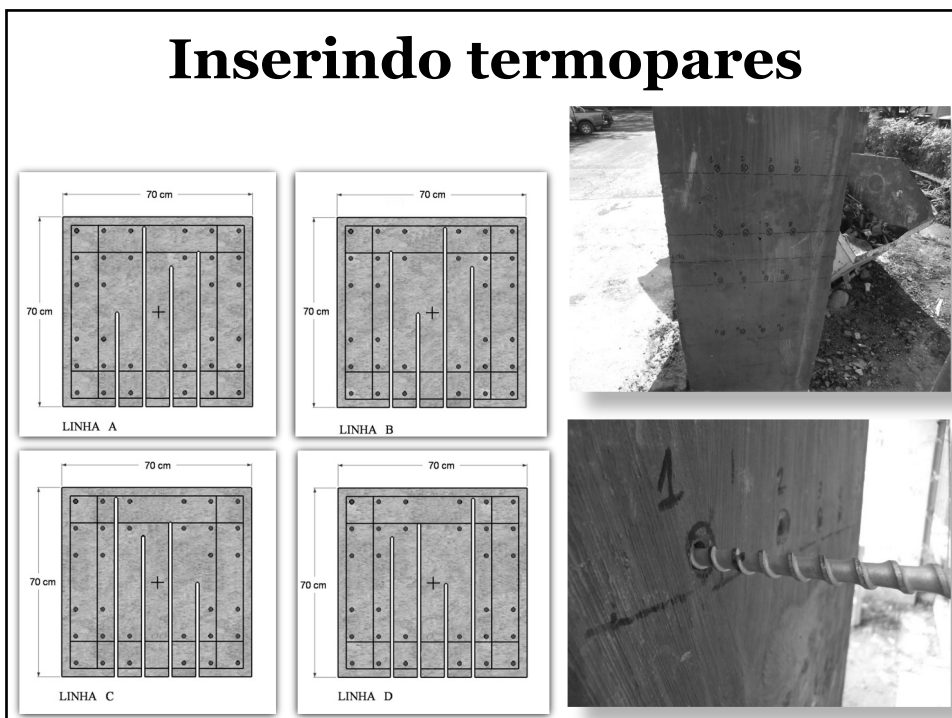
83

16 termopares



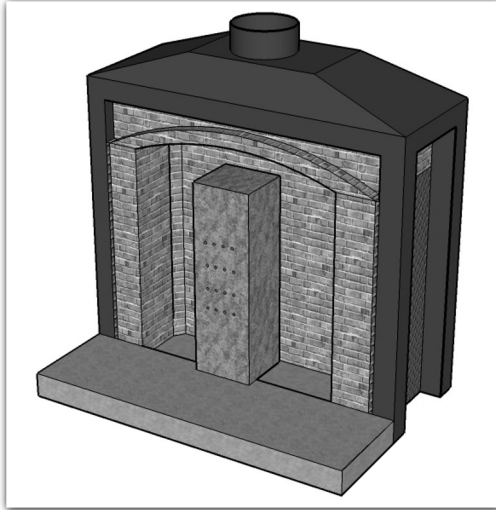
84

Inserindo termopares



85

Laboratório (horno)



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

86

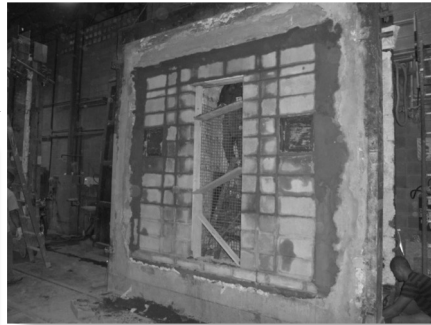
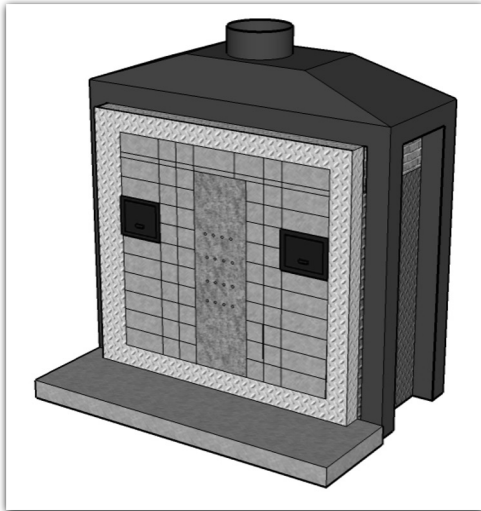
protección con fibras ceramicas



87

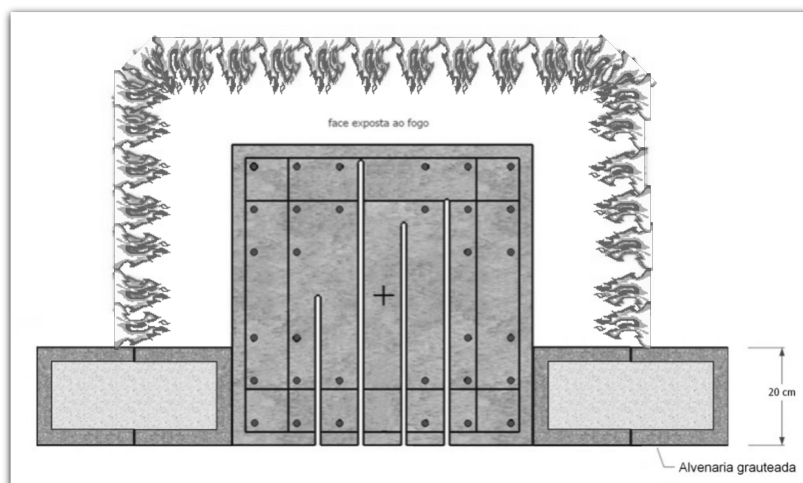
Laboratório

horno de alta temperatura



88

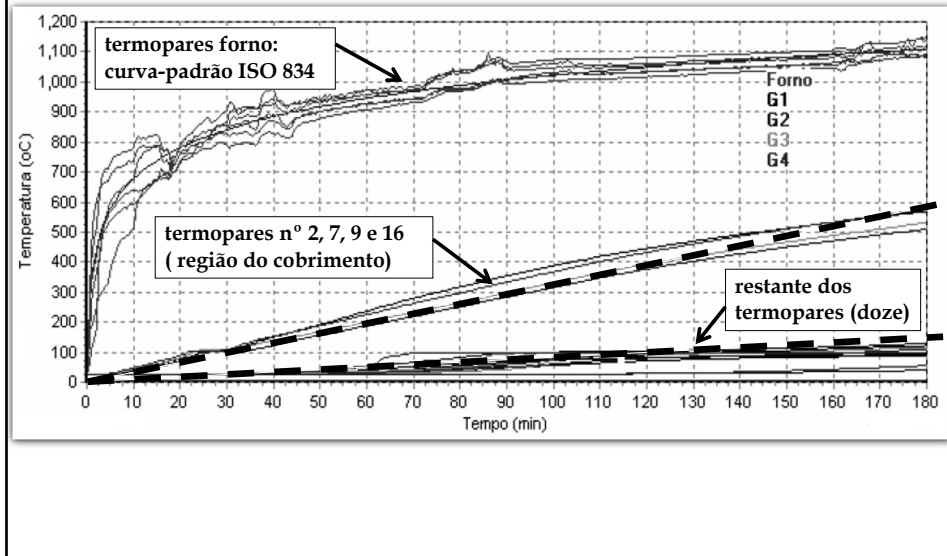
condiciones de ensayo (3 lados)



ISO 834 standard fire

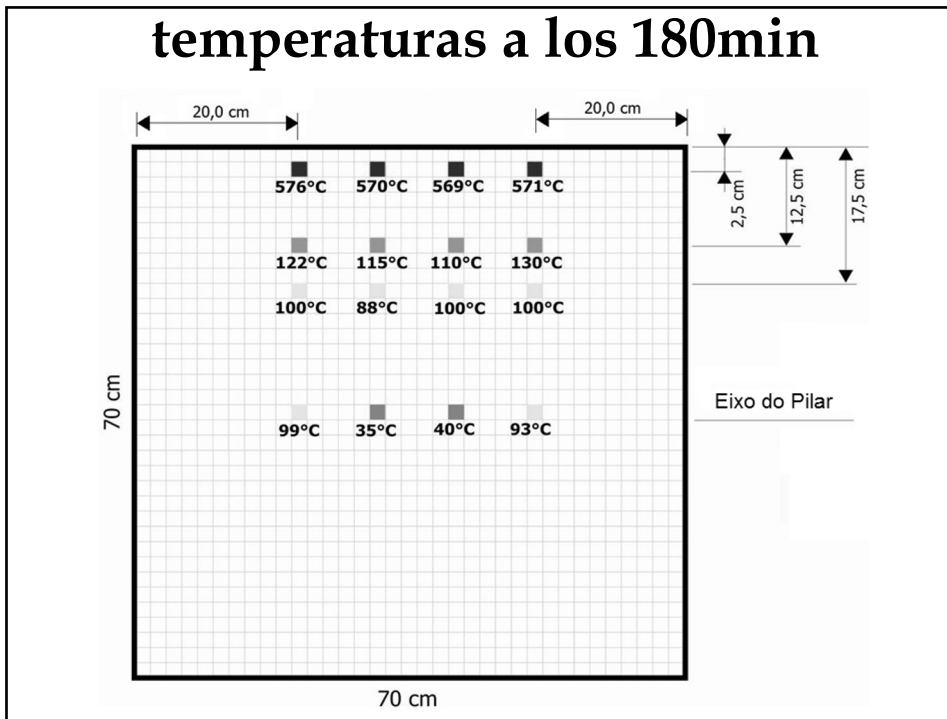
89

evolución de las temperaturas



90

temperaturas a los 180min



91

**después del ensayo
180min fuego + 3 días**



92

Integridad



aristas perfectas

93

Integridad después de 180min



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

94

Integridad



**área de acero
expuesta
< 5%**

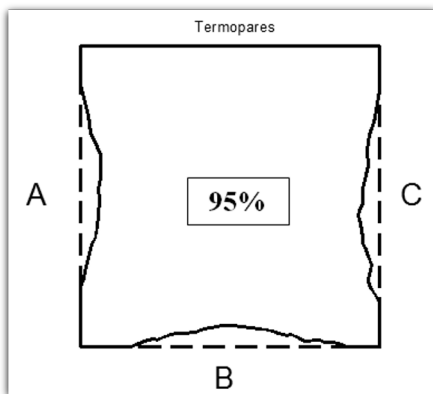
95

Integridad



96

Integridad



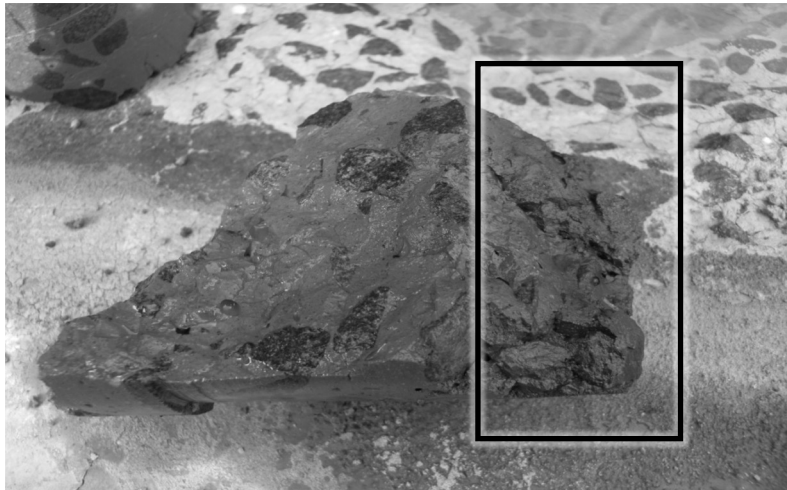
spalling medidos en 450 puntos (150 cada lado)

97



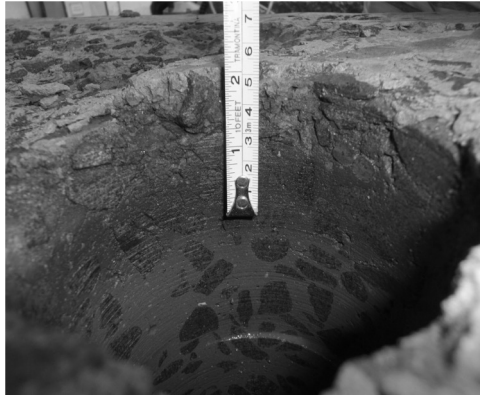
98

“pigmento como termometro natural”



99

“termómetro natural”



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

cerca de 600°C

100

análise numérica de la capacidad resistente residual del pilar EUROCODE II

101

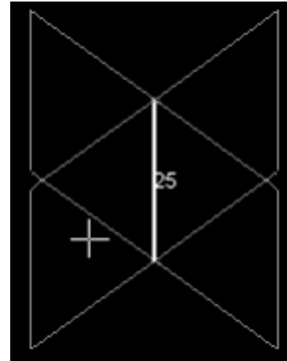
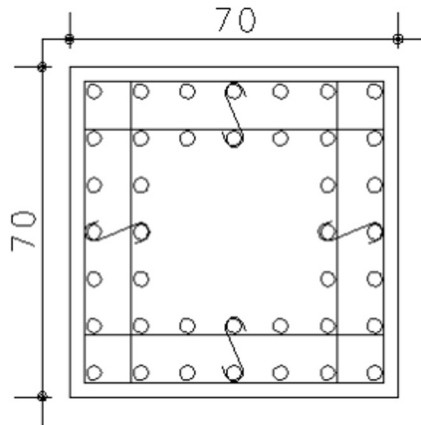
Condición Inicial

cross section = 70x70cm

$A_c = 4578,32\text{cm}^2$

$A_s = 40 \text{ } \varnothing 32\text{mm} = 321,68\text{cm}^2$

$\rho = 7,03\%$



102

resumo para $M_x = M_y = 0$

condición inicial

$P_{max} = 4.828 \text{ tf (100\%)}$

500°C Isotherm Method

$P_{max} = 2.774 \text{ tf (57\%)}$

Zone Method

$P_{max} = 2.444 \text{ tf (50\%)}$

condición real

$P_{max} = 3.429 \text{ tf (71\%)}$

103



**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

104

HSC > 50MPa

EXPLOTA

frente al fuego

(explosive spalling)

MITO o VERDAD ?

105

VERDAD

**HSC > 50MPa
puede explotar la probeta
en ensayo, pero nunca el
pilar, viga o losa armada
con un criterio adecuado
de diseño estructural**

106

Conclusión

- 1. Investigación basada solamente en el comportamiento de los materiales, no es suficiente para explicar el efectivo comportamiento de las estructuras bajo fuego**
- 2. Otros factores como dimensiones de los elementos, distribución de los aceros, espesor de recubrimiento, edad del concreto, son muy significantes**
- 3. El ideal es adoptar un enfoque basado en prestaciones para lograr un buen diseño, tomando en cuenta los escenarios de fuego y cargas, los parâmetros de los materiais, e una buen análisis de toda la estructura**

107



108



109