

**X Jornadas Internacionales del Concreto Armado
Mérida, Yucatán, México**

Comportamiento de Estructuras de Acero y de Hormigón Frente al Fuego

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

Salón de la História del Palácio del Gobierno

12 de Noviembre de 2010

Yucatán

1

Concreto de Alta Resistencia

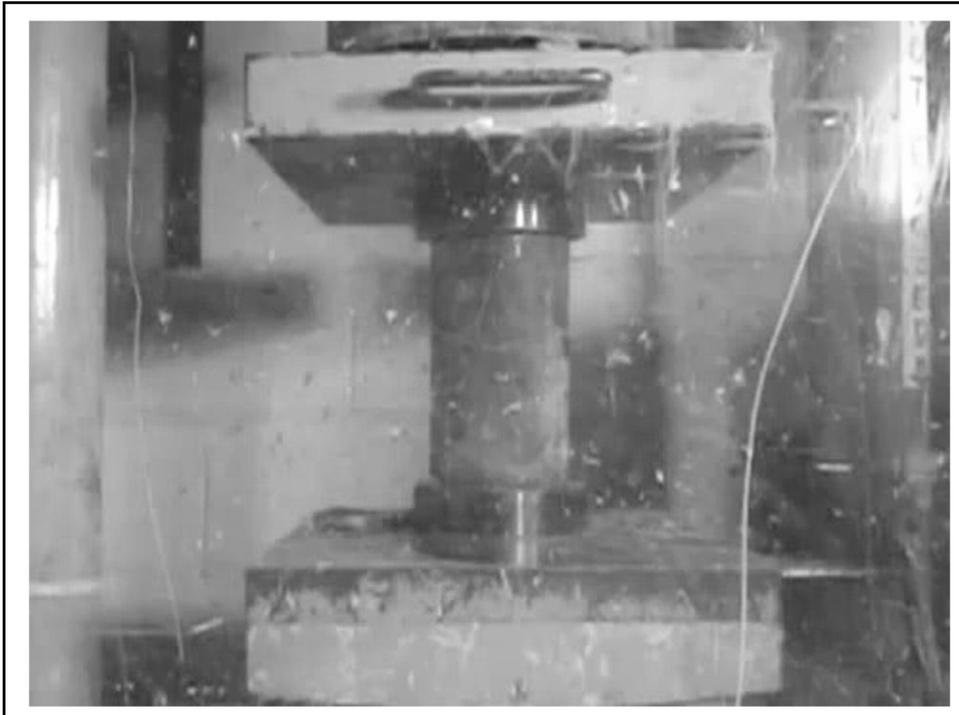
Mitos y Verdades

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



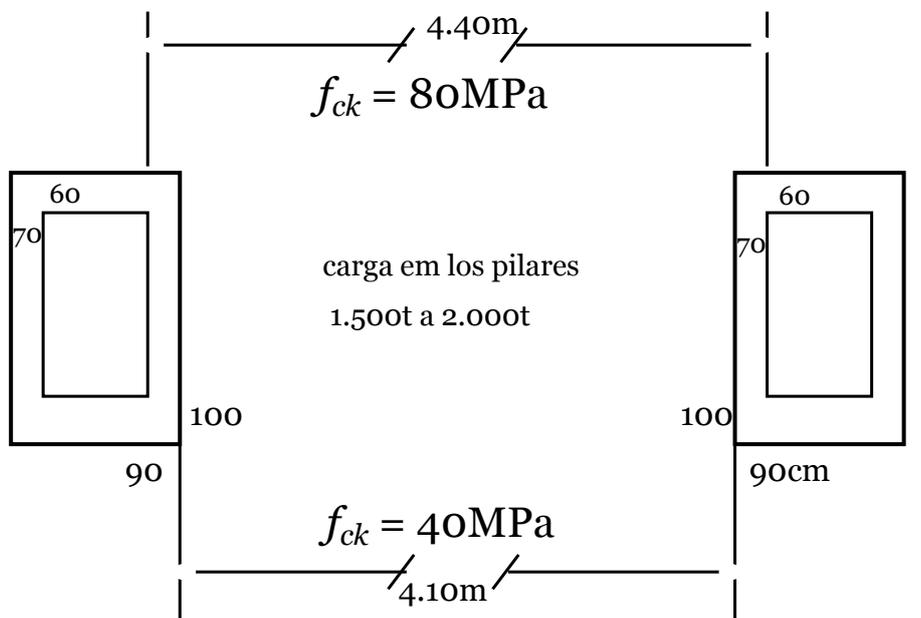
8

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



9

Proyecto estructural (*e-Tower*)



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

Pavimentos de hormigón en túneles

su influencia en la seguridad

frente al fuego

Carlos Jofré
Joaquín Romero
Rafael Rueda

IECA INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES

Editado por:
IECA
José Abascal, 53
28003 MADRID
2010

16

“La Federación de Bomberos de Francia opina que "la simple lógica debería imponer la sustitución de las mezclas bituminosas por un material totalmente neutro como es el hormigón” .

“Por su parte, el Comité Técnico Internacional para la Prevención y Extinción de Incendios (CTIF), una organización que representa a cinco millones de bomberos y que es la más importante a nivel mundial, indica que “los firmes de las carreteras deberían ser incombustibles, no emitir humos tóxicos y ser claros, lo que mejora la visibilidad. Por ello el hormigón debería preferirse siempre, a las mezclas bituminosas”.

17

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

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

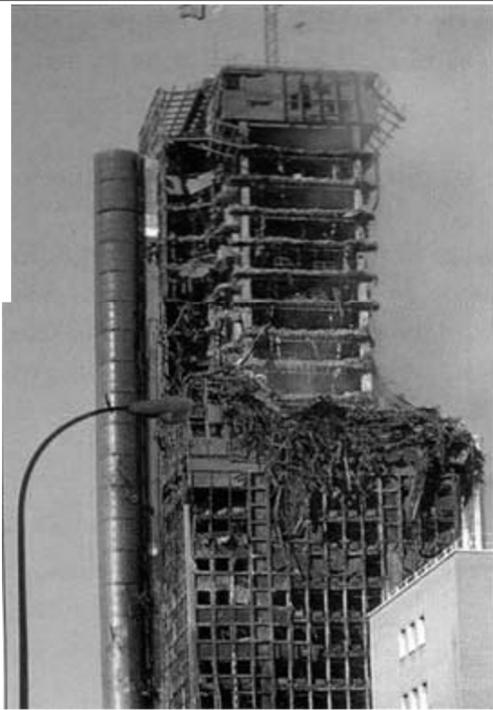
Incendio: 1 Febrero 1974

***duración: 6h30min
390min***

***Perfectas condiciones
Nada ha colapsado***

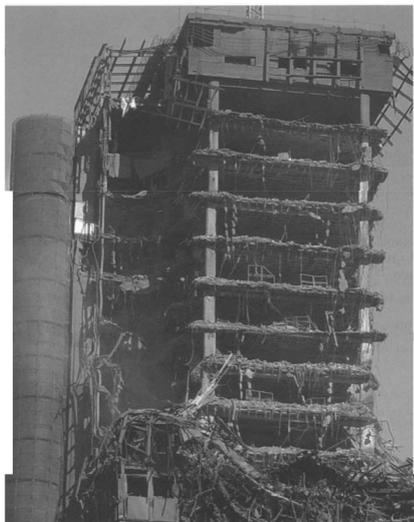
27

**Edificio WINDSOR
Madrid
España
2005**



28

**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***

29

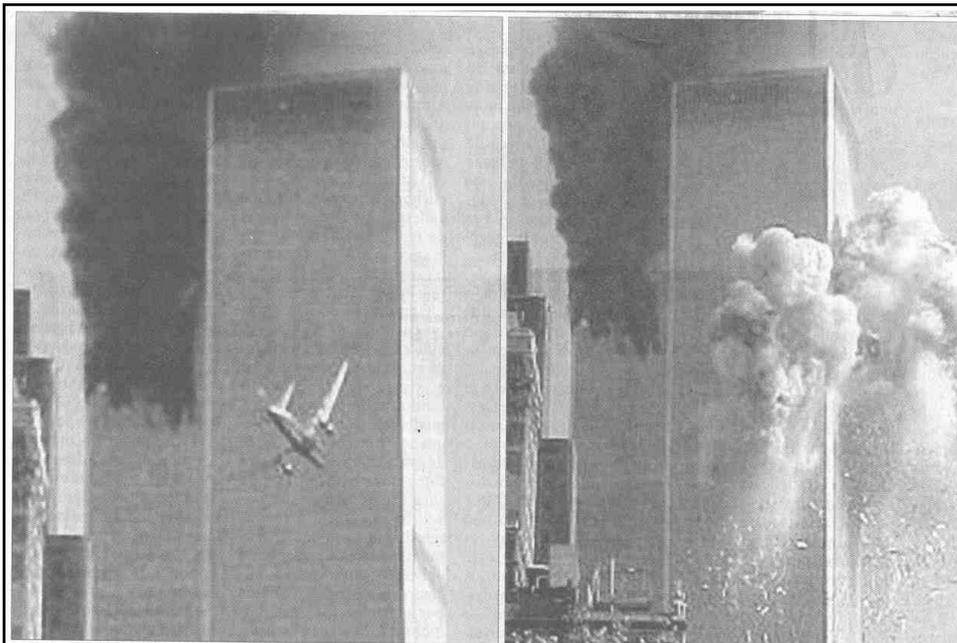


“the reinforced concrete structure, columns, beams and slabs under 16h severe fire condition , could perform well and no collapse”

... “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.

30

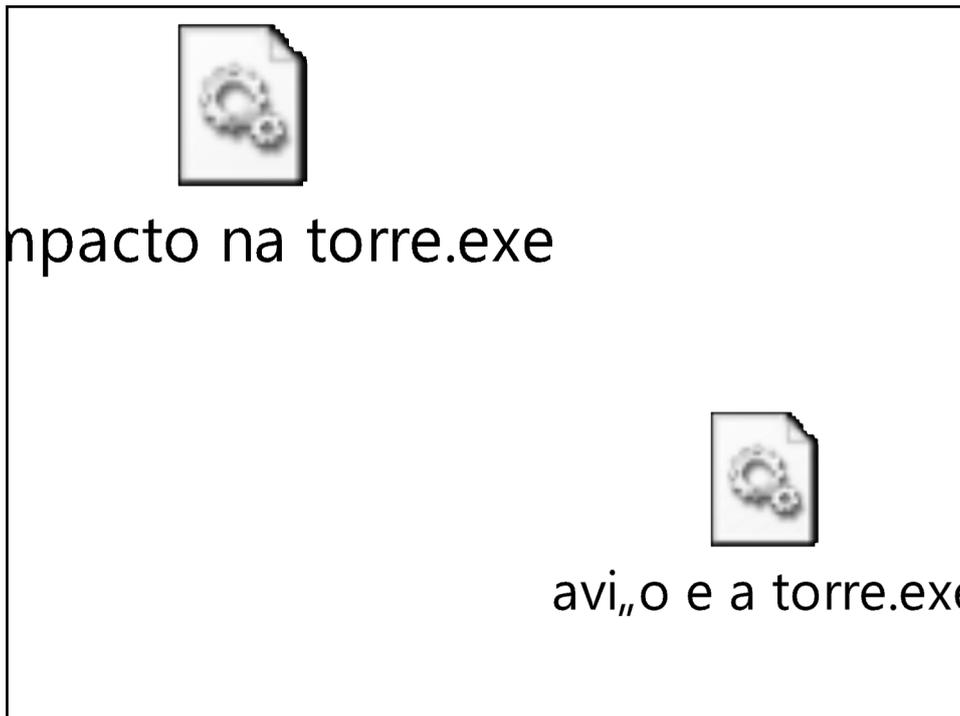


11 de Septiembre de 2001

31



32



33

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

34

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

35

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

36

Resistencia e Estabilidad

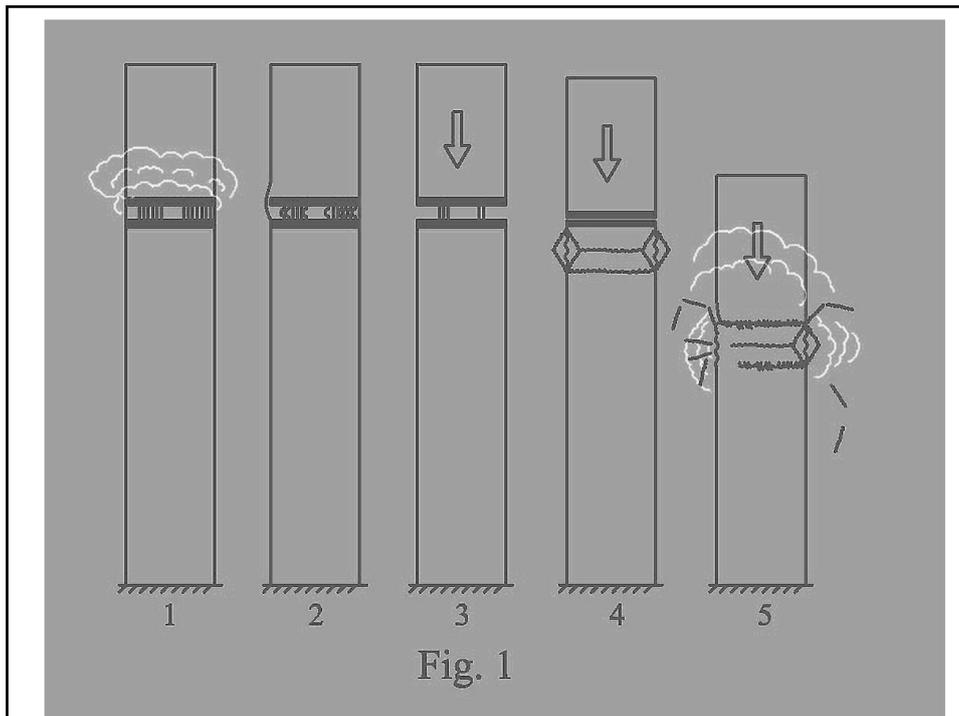
- **medidas indicaron que el impacto del Boeing 767-200ER sometió al edificio a vibraciones semejantes a las de un sismo de índice 2,4 escala Richter**
- **esa vibración inducida, ha tenido una amplitud del orden de la mitad de la máxima considerada por el efecto del viento**
- **período de oscilación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

37

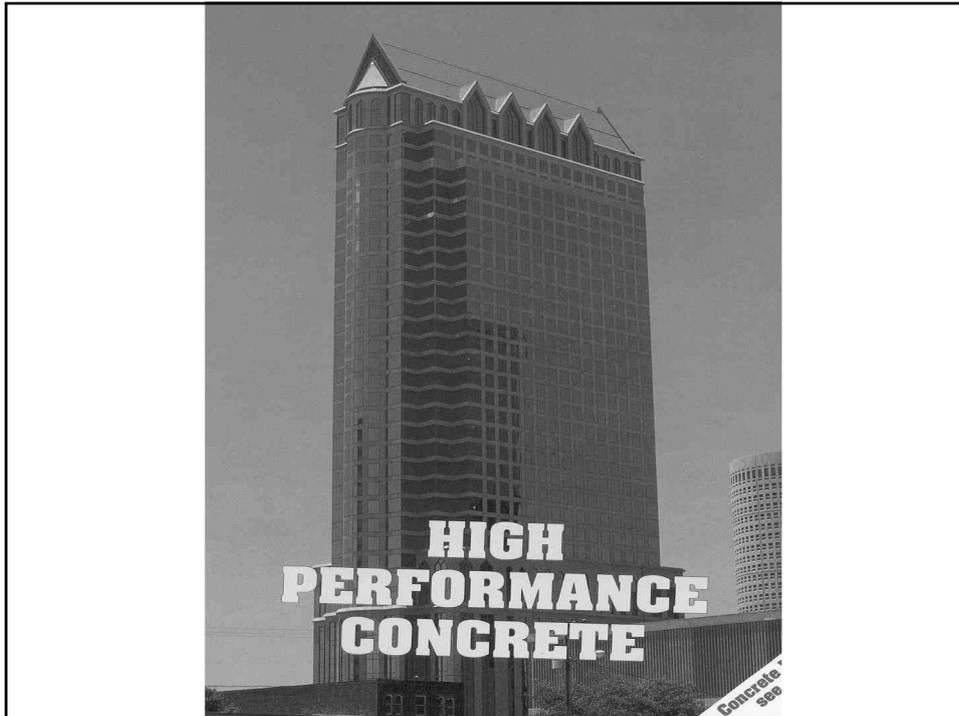
Las Peores Consecuencias del Impacto

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

38



39



40

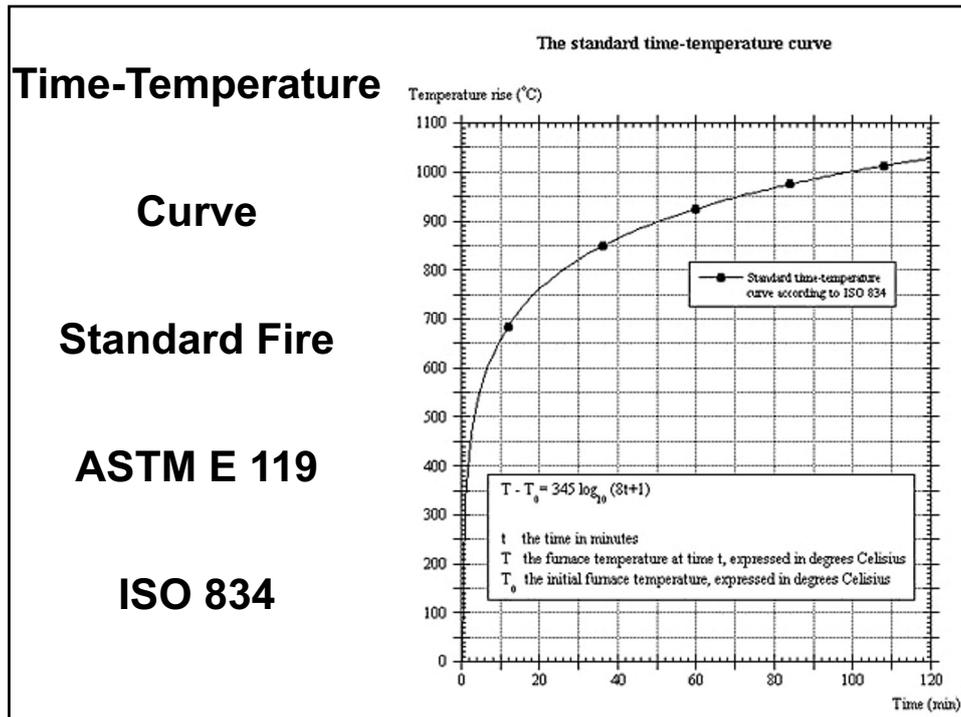
Concreto bajo fuego

- ✓ condiciones reales
- ✓ condiciones de laboratorio

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

es verdad !?!

41



42

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

43

Concreto bajo Fuego

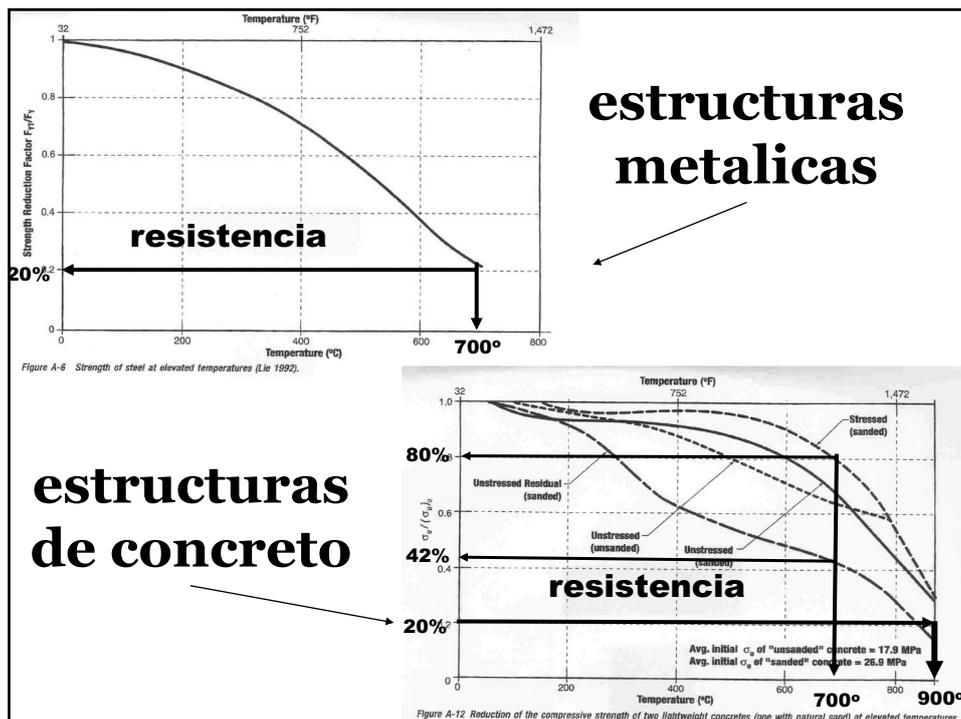
opciones de investigación

PROBETAS

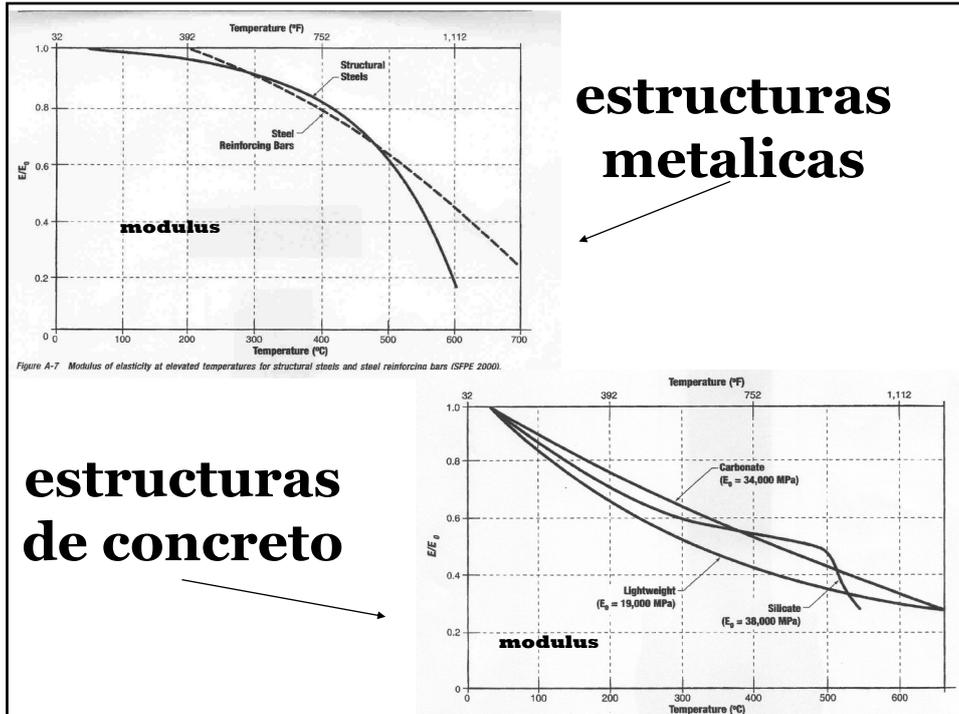
ELEMENTOS

ESTRUCTURA

44



45



46

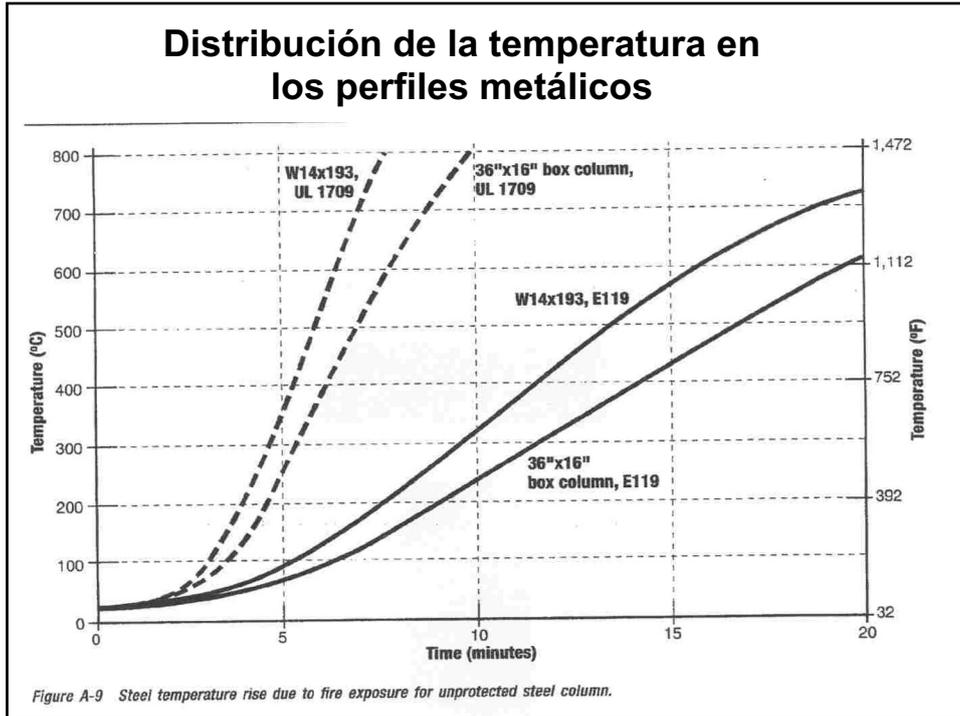
Concreto bajo Fuego
opciones de investigación

PROBETAS

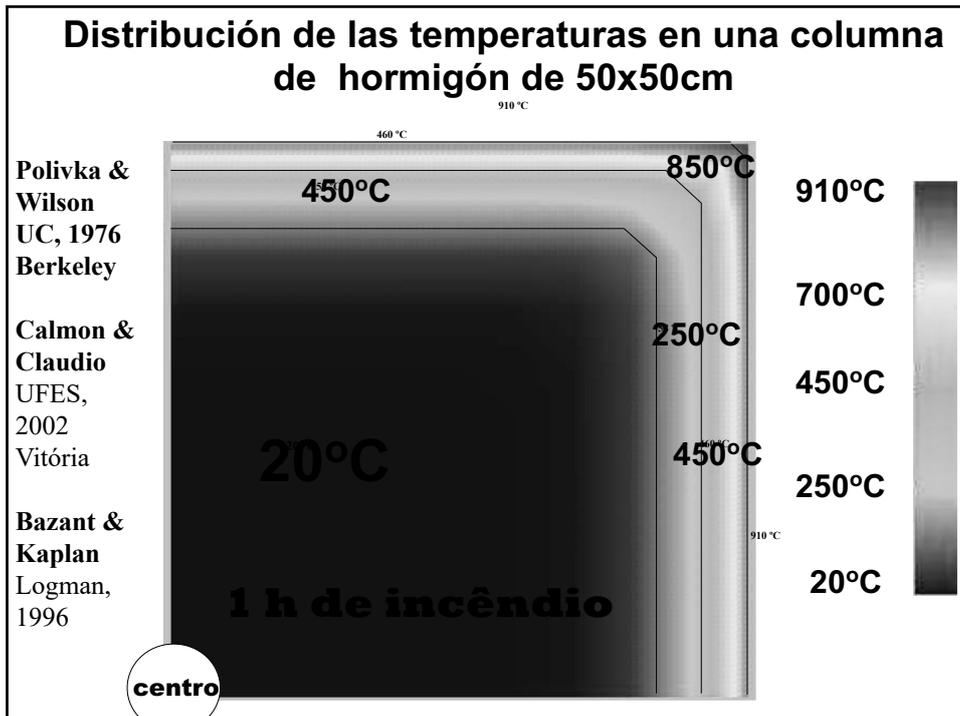
ELEMENTOS

ESTRUCTURA

47

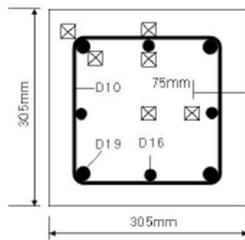


48

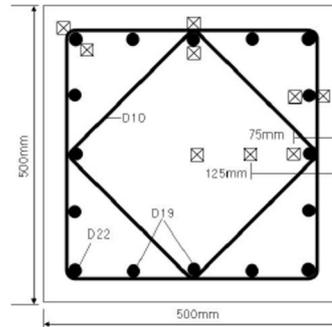


49

influencia de la sección transversal



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



50cm x 50cm x 3,4m

**120MPa
HSRC**

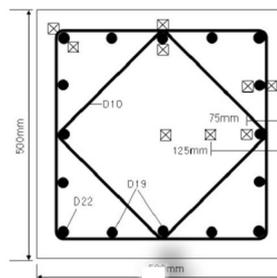
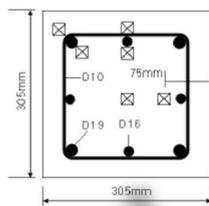
Park et al, 2007

50

influencia de la sección transversal

50cm x 50cm x 3,4m

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



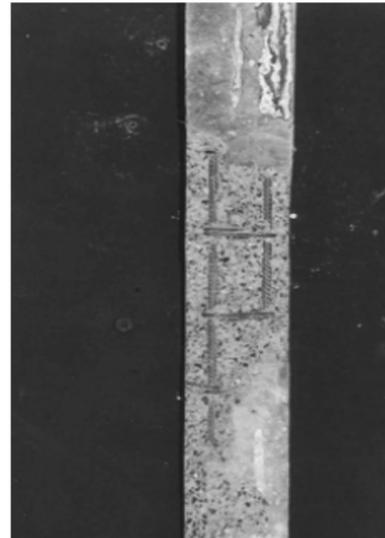
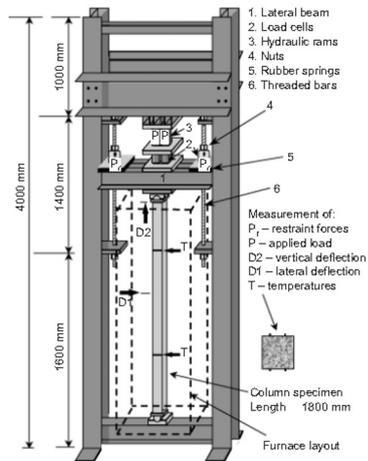
- ✓ **spalling: 13mm**
- ✓ **fire → 176min.**
- ✓ **collapsed**

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

Park et al, 2007

51

pilar !!??



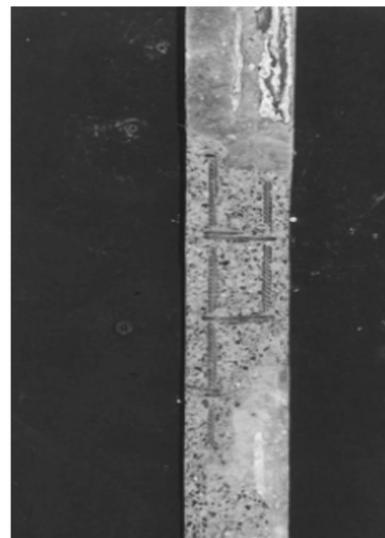
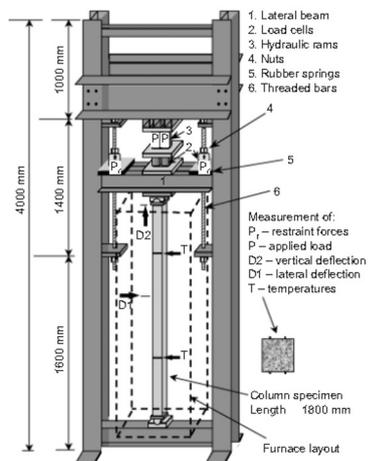
cross section 12,5cm x 12,5cm

Benmarce & Guenfoud, 2005

52

pilar !!??

> 40cm



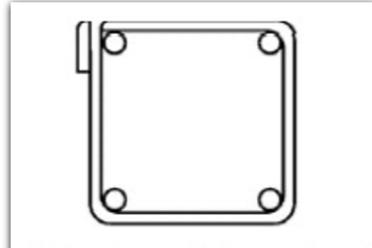
cross section 12,5cm x 12,5cm

Benmarce & Guenfoud, 2005

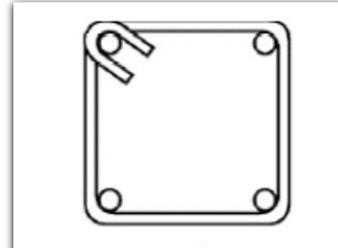
53

detalles de armadura

cerchos en pilares



incorrecto



correcto

Kodur, 2005

54

incorrecto



Configuração Convencional de Estribos

correcto



Configuração Modificada de Estribos

Kodur, 2005

55

recubrimiento

40mm

70mm

✓ spalling: 13mm to 18mm

✓ spalling: 15mm to 30mm

✓ fire: 4 h

✓ fire: 4 h

✓ no colapse

✓ no colapse

✓ 500°C → after 2h

✓ 500°C → after 3h

Park & Lee (2008)

56

resistencia del concreto

Referência	Amostra	Grau de restrição	Concreto normal (43MPa)		Concreto de alta resistência (106MPa)	
			Tipo de spalling	Grau de spalling	Tipo de spalling	Grau de spalling
1	A	0	secundário	16%	severo	39%
2	B		severo	34%	principal	11%
3	C		nenhum	0%	severo	26%
4	A	0,1	severo	27%	principal	1%
5	B		nenhum	0%	principal	1%
6	C		principal	18%	principal	2%
7	A	0,2	severo	35%	nenhum	0%
8	B		principal	29%	principal	4%
9	C		secundário	5%	nenhum	0%

Ali, 2002

57

Concreto bajo Fuego

opciones de investigación

PROBETAS

ELEMENTOS

ESTRUCTURA

58

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

59



60



61

**despues de
120min**

62



63

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;

64

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).

65

INVESTIGACIÓN
Universidad de São Paulo
BRASIL
2002 → 2010

PhD student: Carlos Britez
Supervisor: Paulo Helene

66

história



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

67



68

“ HPCC in Brazilian Office Tower”

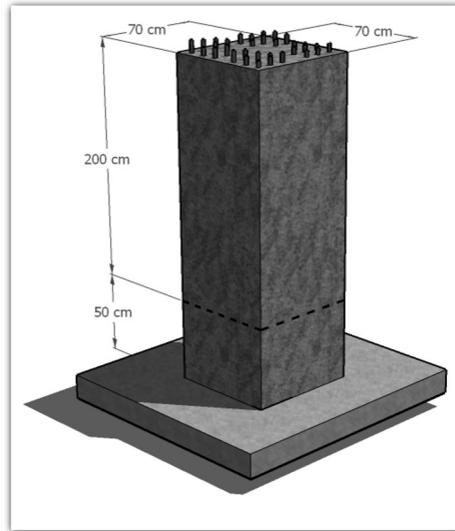
Concrete International. ACI, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003

HELENE, Paulo &
HARTMANN, Carine



69

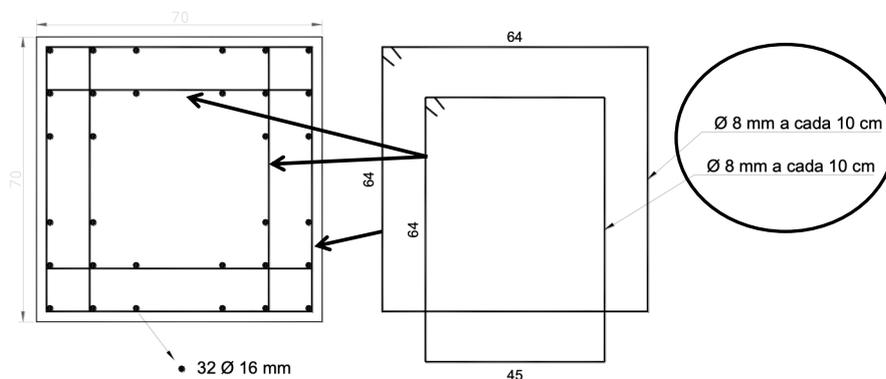
Pilar Ensayado



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

70

sección transversal



71

**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

72

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



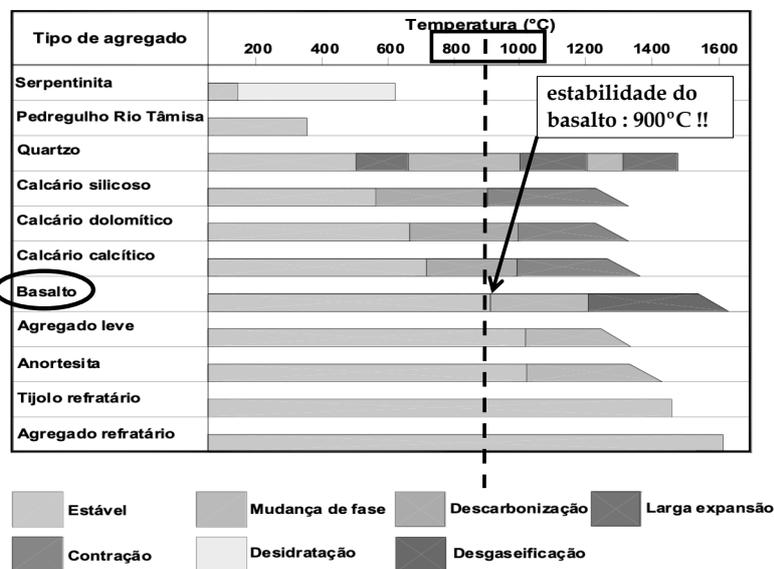
73

originalidad de la investigación

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

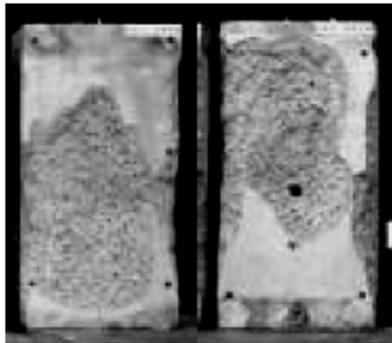
74

Áridos (*fib* bulletin 38, 2007)

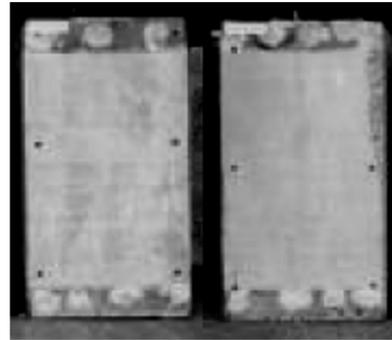


75

influencia de la edad ...



2 months



1 year

Morita et al, 2002

76

concreto colorido



77

pilar → corte y transporte



hilo de diamante



78

testigos extraídos

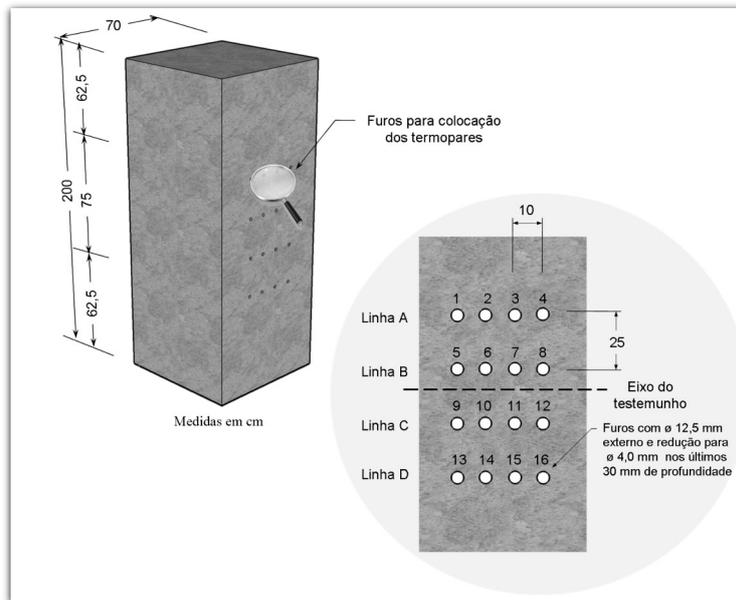


140 MPa



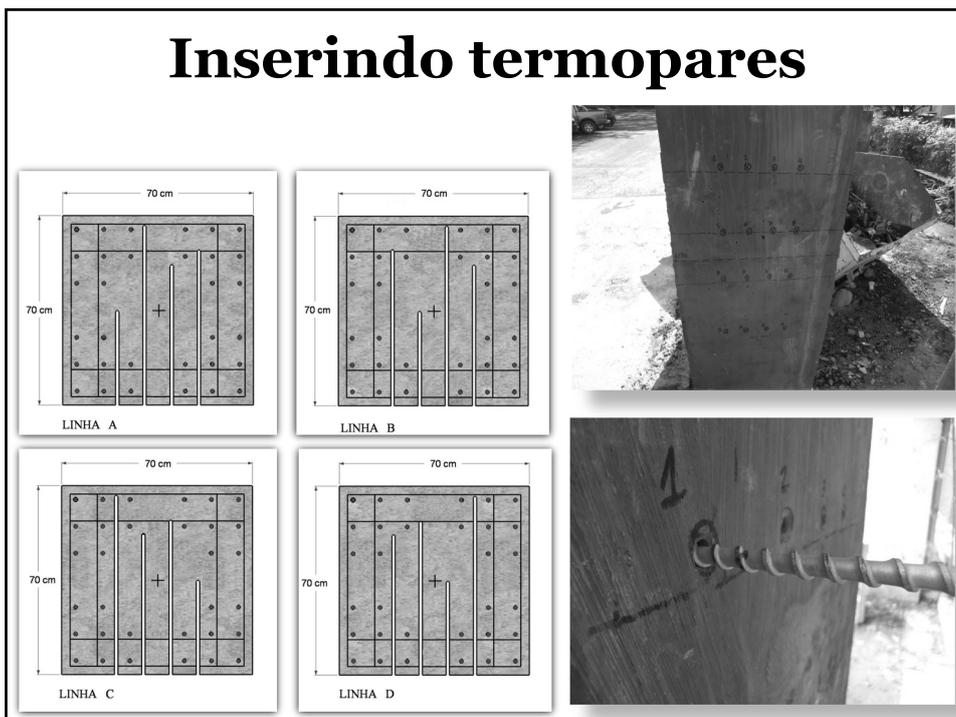
79

16 termopares



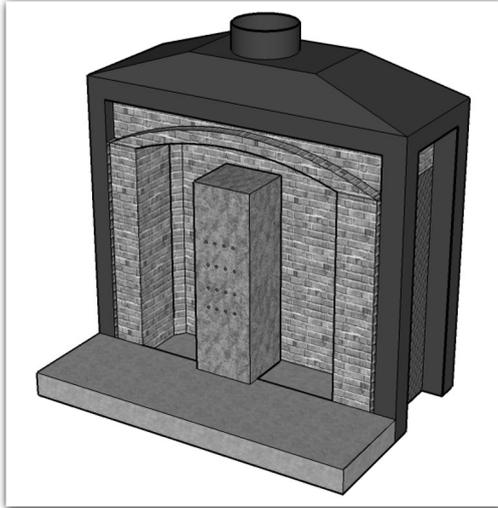
80

Inserindo termopares



81

Laboratório (horno)



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

82

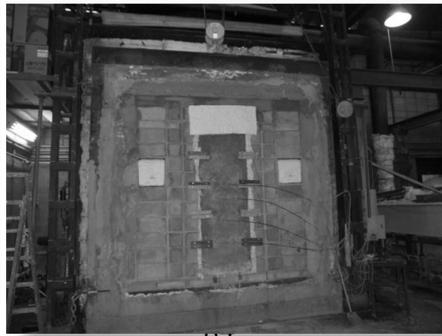
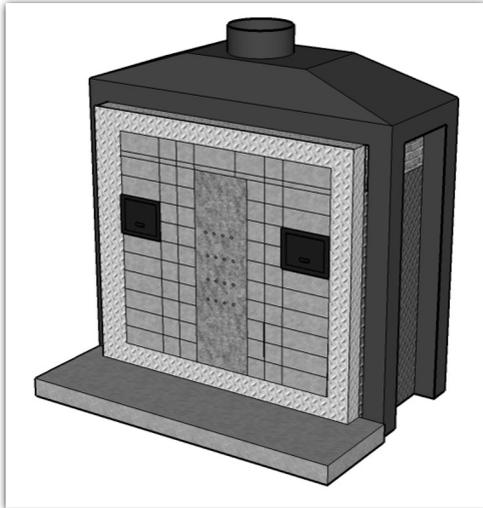
protección con fibras ceramicas



83

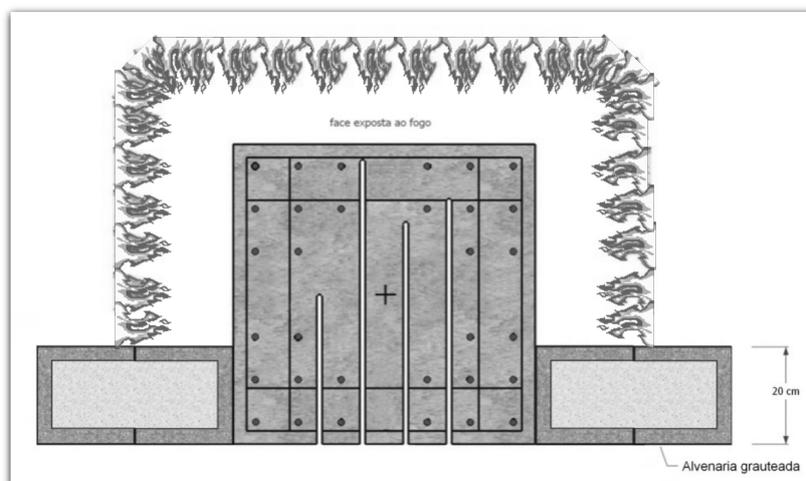
Laboratório

horno de alta temperatura



84

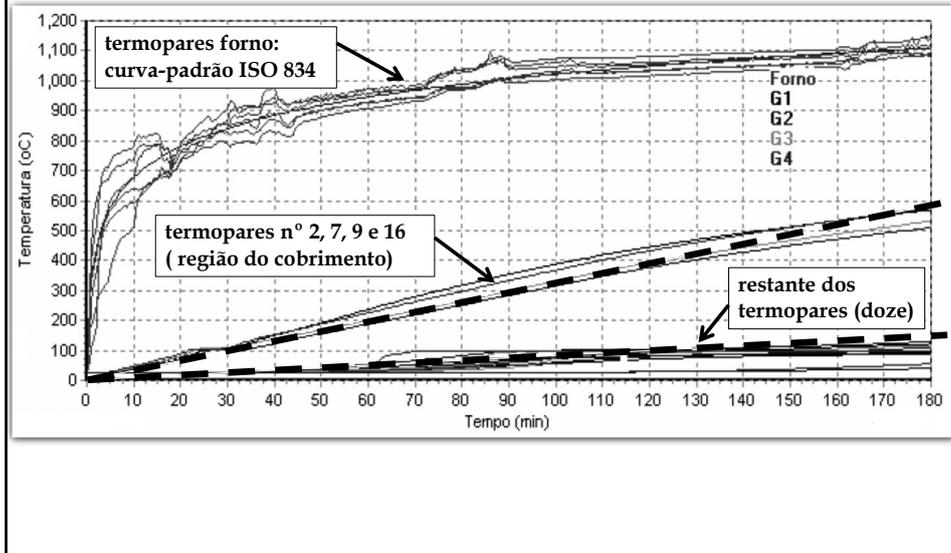
condiciones de ensayo (3 lados)



ISO 834 standard fire

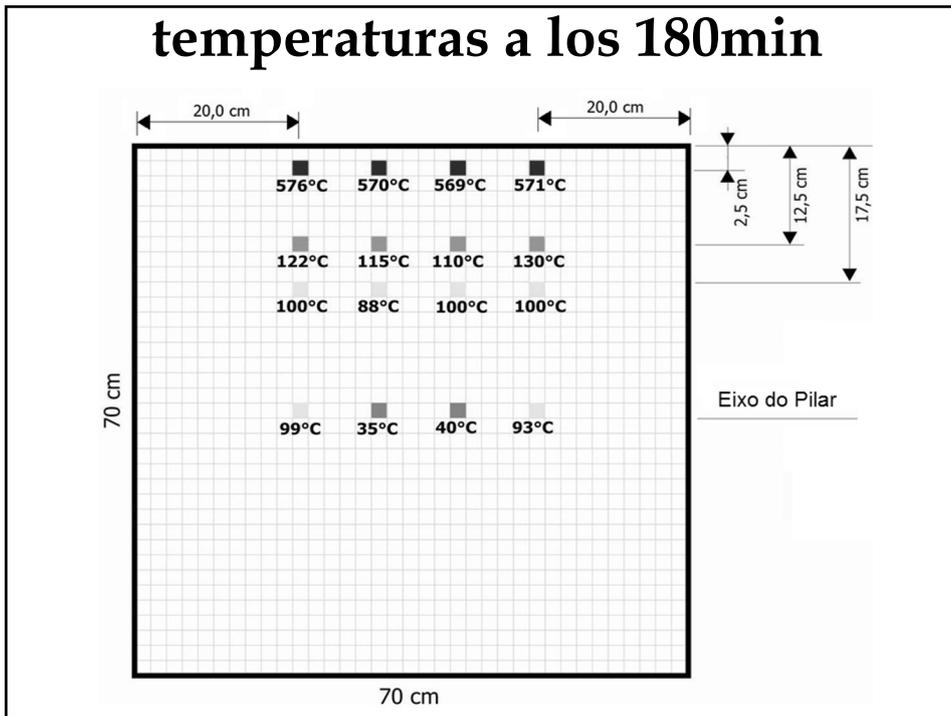
85

evolución de las temperaturas



86

temperaturas a los 180min



87

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



88

Integridad



aristas perfectas

89

Integridad después de 180min



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

90

Integridad



**área de acero
expuesta
< 5%**

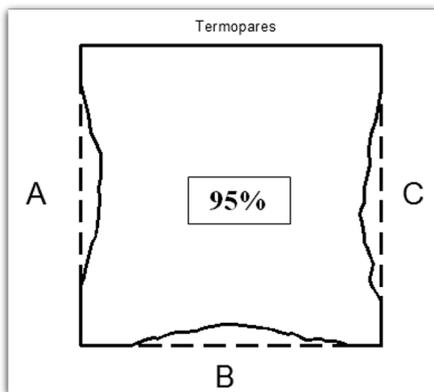
91

Integridad



92

Integridad



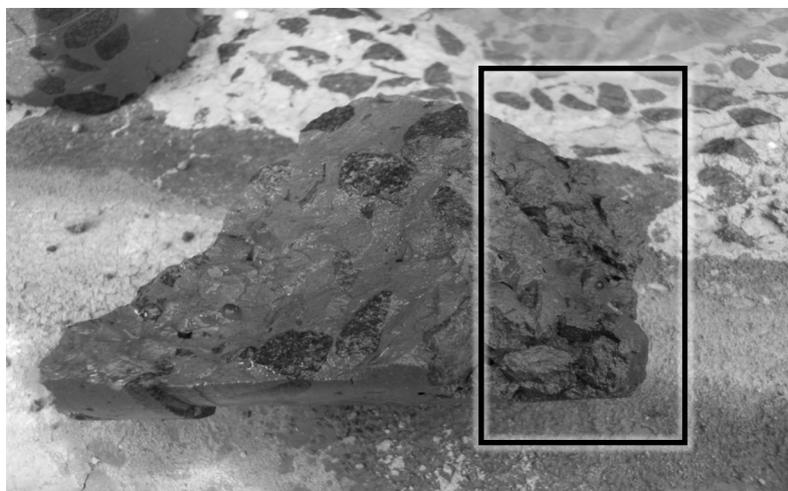
spalling medidos en 450 puntos (150 cada lado)

93



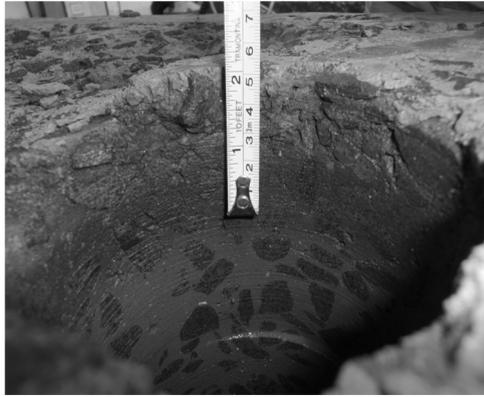
94

“pigmento como termometro natural”



95

“termómetro natural”



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

cerca de 600°C

96

análise numérica de la capacidad resistente residual del pilar EUROCODE II

97

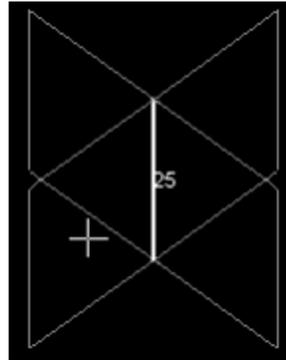
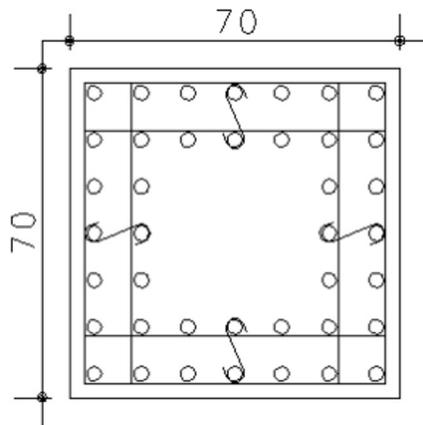
Condición Inicial

cross section = 70x70cm

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

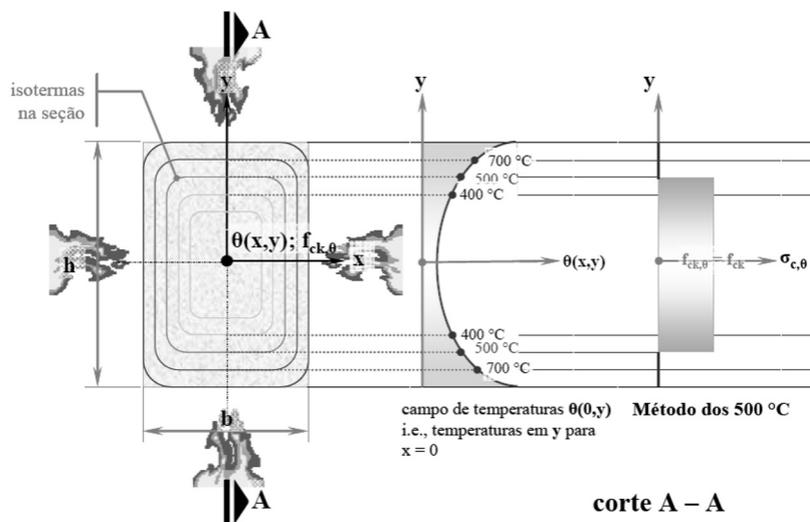
$A_s = 40 \text{ } \varnothing 32\text{mm} = 321,68\text{cm}^2$

$\rho = 7,03\%$



98

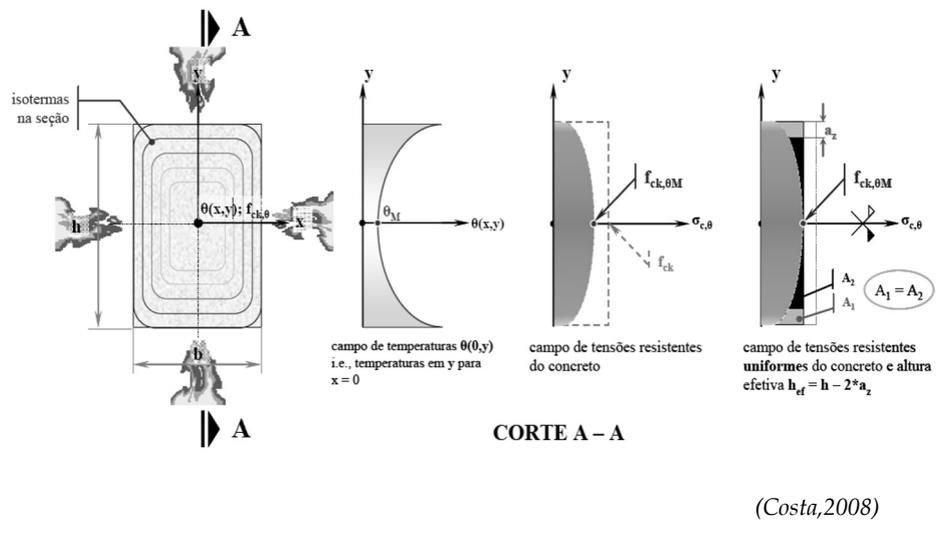
500°C Isotherm Method . EN 1992-1-2-2004 (EUROCODE II)



(Costa,2008)

100

**Zone Method . EN 1992-1-2-2004
EUROCODE II**



102

resumo para $M_x = M_y = 0$

Condição Inicial

cross section $\rightarrow 70 \times 70$

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

500°C Isotherm Method

cross section $\rightarrow 56 \times 56$

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

Zone Method

cross section $\rightarrow 52 \times 52$

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

105

Comportamiento en la Investigación

Condición Inicial

cross section → 70x70

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

**Condición real después
del fuego**

cross section → 59x59

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

107

resumo para $M_x = M_y = 0$

condición inicial

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

500°C Isotherm Method

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

Zone Method

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

condición real

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

108



**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

109

HSC > 50MPa

EXPLOTA

frente al fuego

(explosive spalling)

MITO o VERDAD ?

110

VERDAD

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

111

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**

112



113



114