

ALCONPAT
2010
PARAGUAY

**Primer Congreso ALCONPAT
Paraguay 2010**

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

Concreto de Alta Resistencia

Mitos y Verdades

HSC > 50MPa

**EXPLOTA en
rotura**



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**

HSC > 50MPa

**consume mucho
cemento y no es
SOSTENIBLE**

VERDAD

puede consumir más
cemento por m^3 , pero
la cantidad de CO_2 y
de Energía y de H_2O
disminuye con MPa

CO_2 / MPa

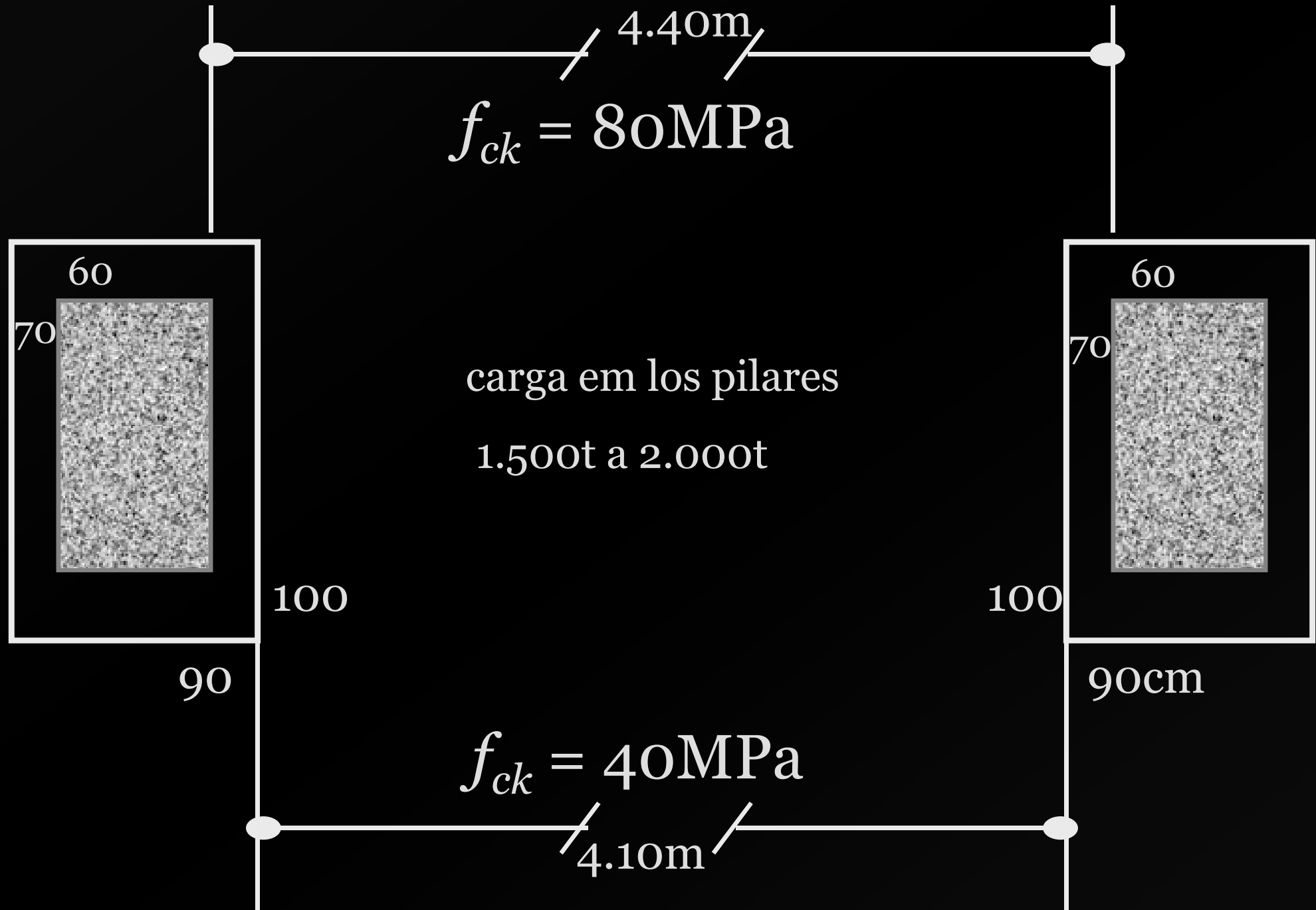
e-Tower



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



Proyecto estructural (*e-Tower*)







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

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

Economía de recursos naturales

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

HSC > 50MPa

EXPLOTA

frente al fuego

(explosive spalling)

MITO o VERDAD ?

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

“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” .

Comprehensive fire protection and safety with concrete



**European
Concrete Platform**

April 2007

**European
Concrete Platform
ASB**



FUEGO

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

Edifício ANDRAUS
São Paulo
Brasil
1972





Edificio ANDRAUS
Estructura de Concreto Armado

32 pisos de oficinas

Construcción: 1962

Incendio: 24 Febrero 1972

*duración: 4h
240min*

*perfectas condiciones
nada ha colapsado*



**aspecto
tipico de
los pilares
pos
incendio**



aspecto tipico de las vigas



aspecto tipico das losas

Edifício JOELMA
São Paulo
Brasil
1974





Edificio JOELMA
Estructura de Concreto Armado

26 pisos
10 pisos de garage
+ 15 pisos de oficinas

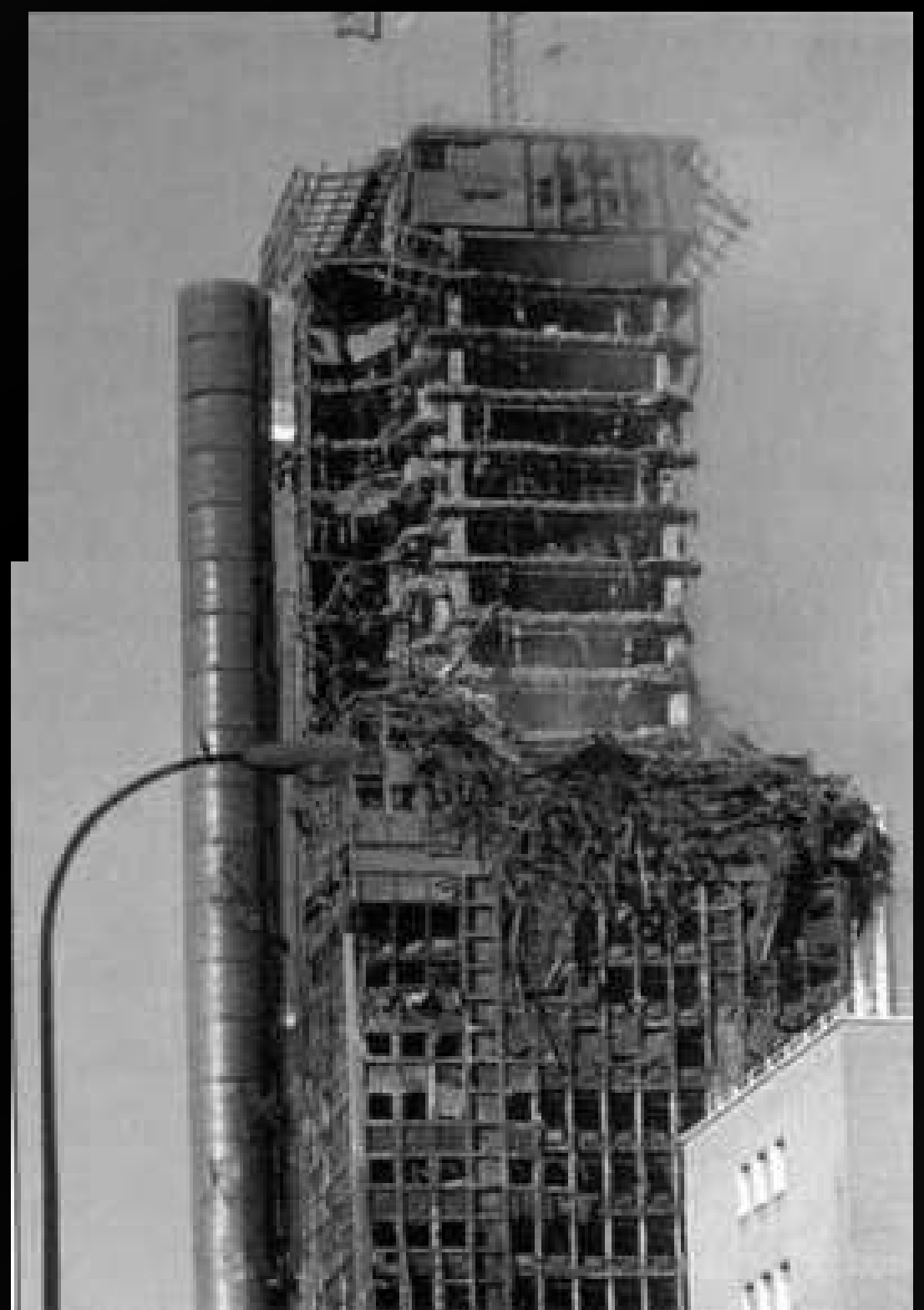
Construcción: 1971

Incendio: 1 Febrero 1974

duración: 6h30min
390min

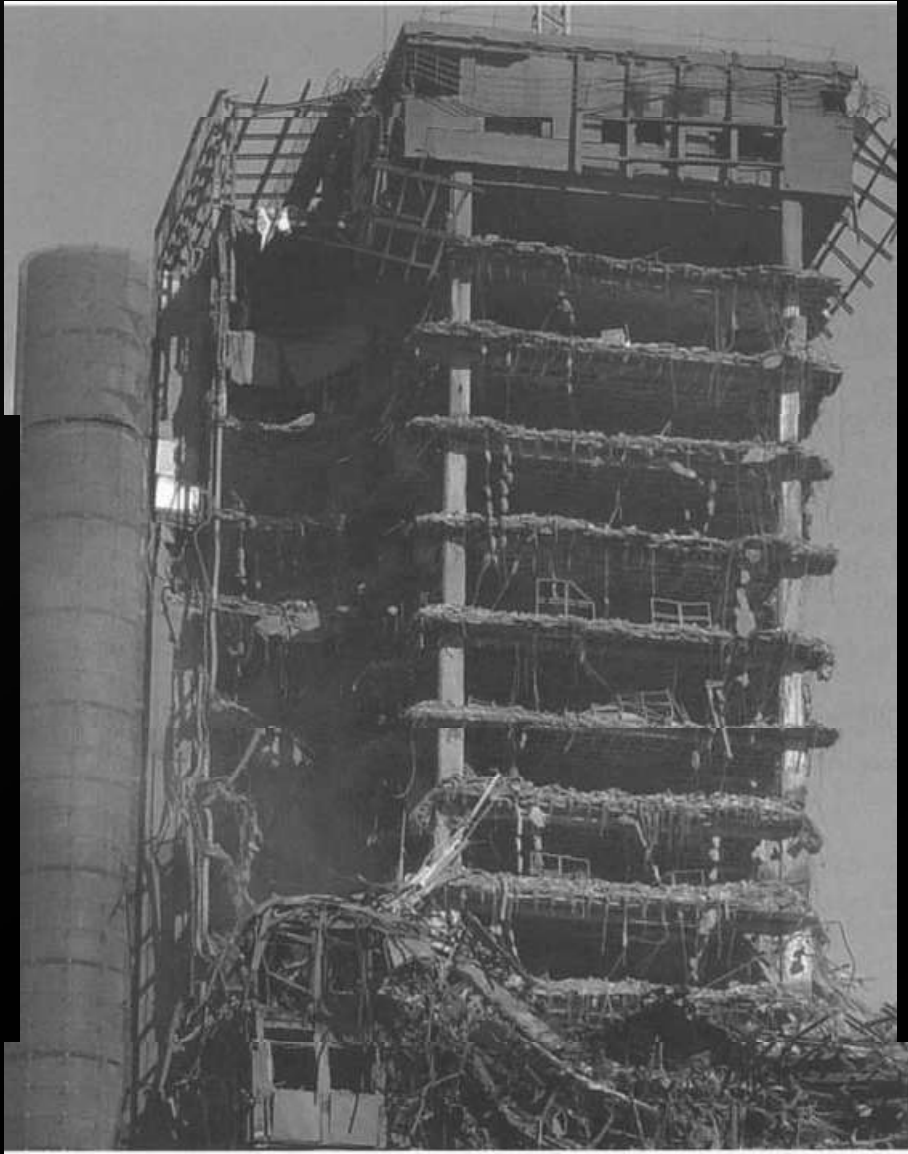
Perfectas condiciones
Nada ha colapsado

Edificio WINDSOR
Madrid
España
2005



Edificio WINDSOR

Estructura mixta acero-concreto



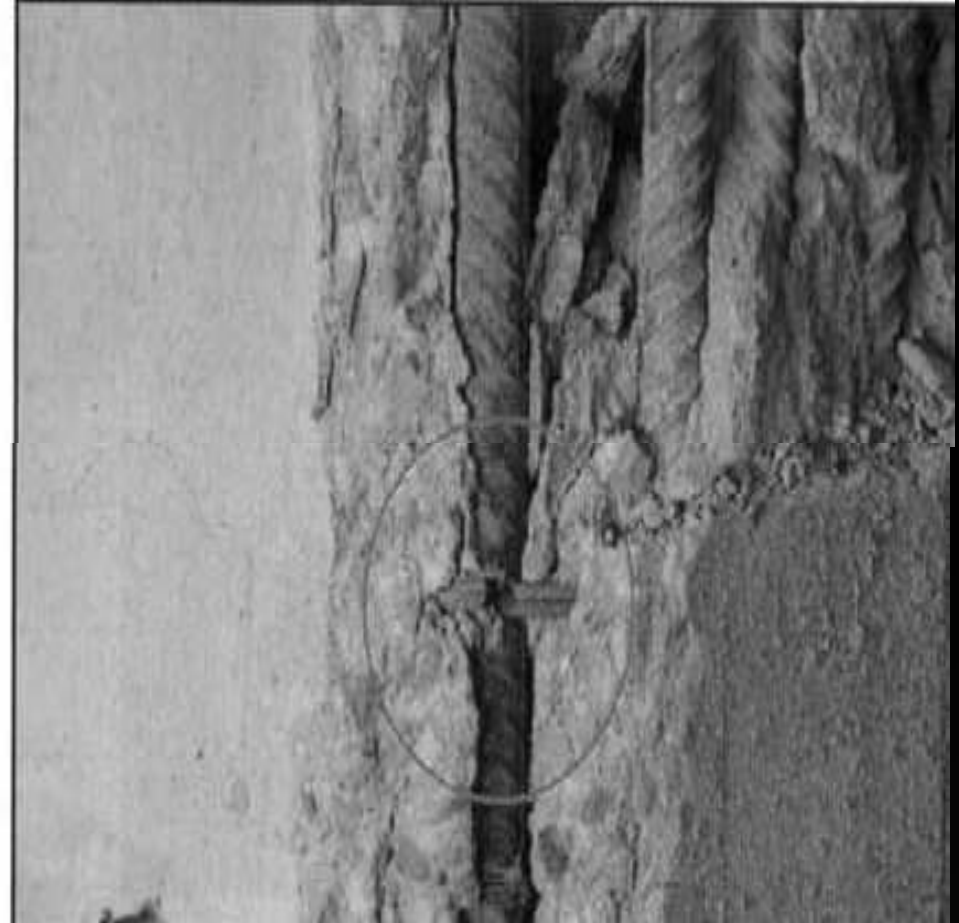
37 pisos
5 pisos de garage
+ 31 pisos de oficinas

Construcción: 1991

Incendio: 12 Febrero 2005

Duración: 16h
960min

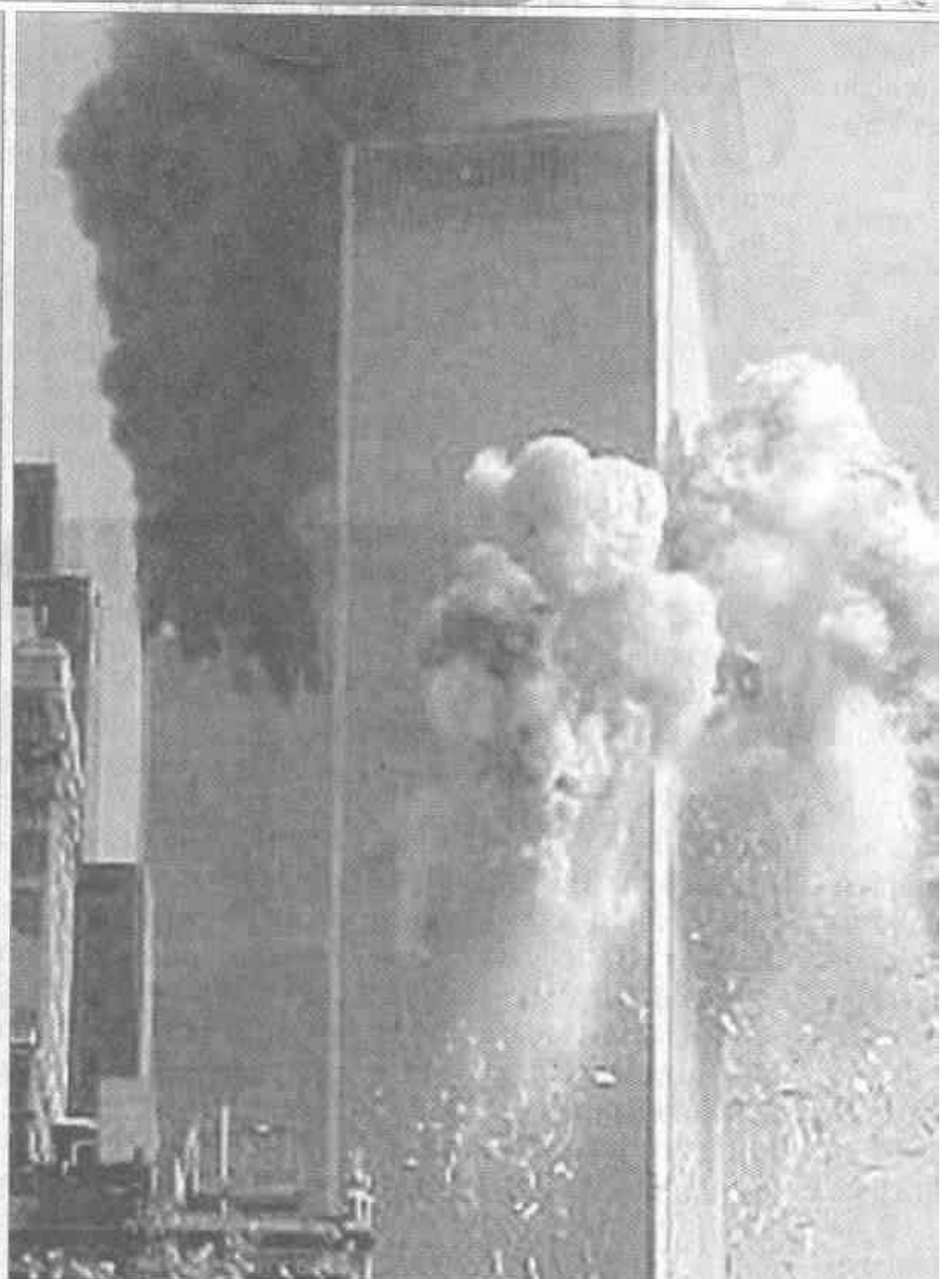
→ solamente las partes de
acero han colapsado
→ totalmente demolido



“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.



11 de Septiembre de 2001

Y AL CUMPLIRSE EL 35 ANIVERSARIO DE MORTADELO Y FILEMÓN, LOS DE EDICIONES B DECIDIERON REGALARLE AL FRECLARO AUTOR, (PRECLARO SOBRE TODO POR EL LADO DEL CRÁNEO), UNA ESTATUILLA CON SU ESQUEMA EFÍGIE. LÁSTIMA QUE EL EDUCULTOR CONFUNDIÓ LAS MEDIDAS, TOMÓ POR METROS LO QUE ERAN CENTÍMETROS, Y EL AUTOR, ESE NO PUDO COLOCARLO EN LA MUELLA DE SU ESTUDIO, POR LO QUE SE LE BUSCO OTRA UBICACION PARA MOYA Y PITORREO DE LAS GENERACIONES VENIDERAS... ¡Y QUE USTED TAMBIÉN LO VEA!

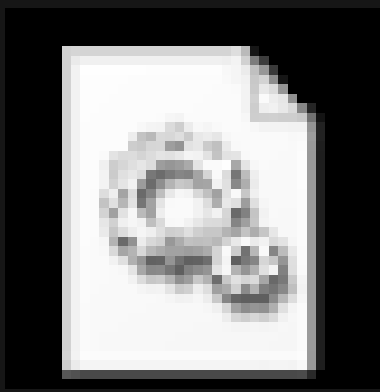


PUES USTED DIRÁ LO QUE QUIERA, PERO YO CREO QUE NO DEBÍ EMPERRARME EN SOLTAR SU DISCURSILLO DE AGRADECIMIENTO SUBIDO EN LO ALTO DE LA SÁLCHICHA... ¡Y MENOS CON EL VENTARRÓN QUE CORRÍA POR ALLÁ, OIGA!

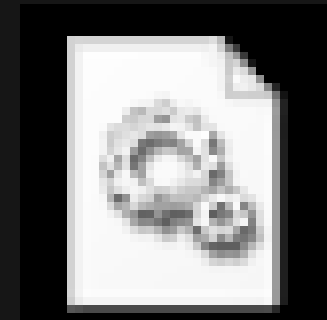
F. Ibáñez '72

F&N
 (POR AHORA ¿EH?
 ¿CONTINUARA EN EL 30º ANIVERSARIO?)

F. Ibáñez: "Mortadelo y Filemón: El 35 aniversario" (1993)



compacto na torre.exe



avião e a torre.exe

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

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

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 projectado → hoy es 5cm

inovador sin ensayos

NYC Building Code adoptaba 1h → hoy 3h

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**

Las Peores Consecuencias del Impacto

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

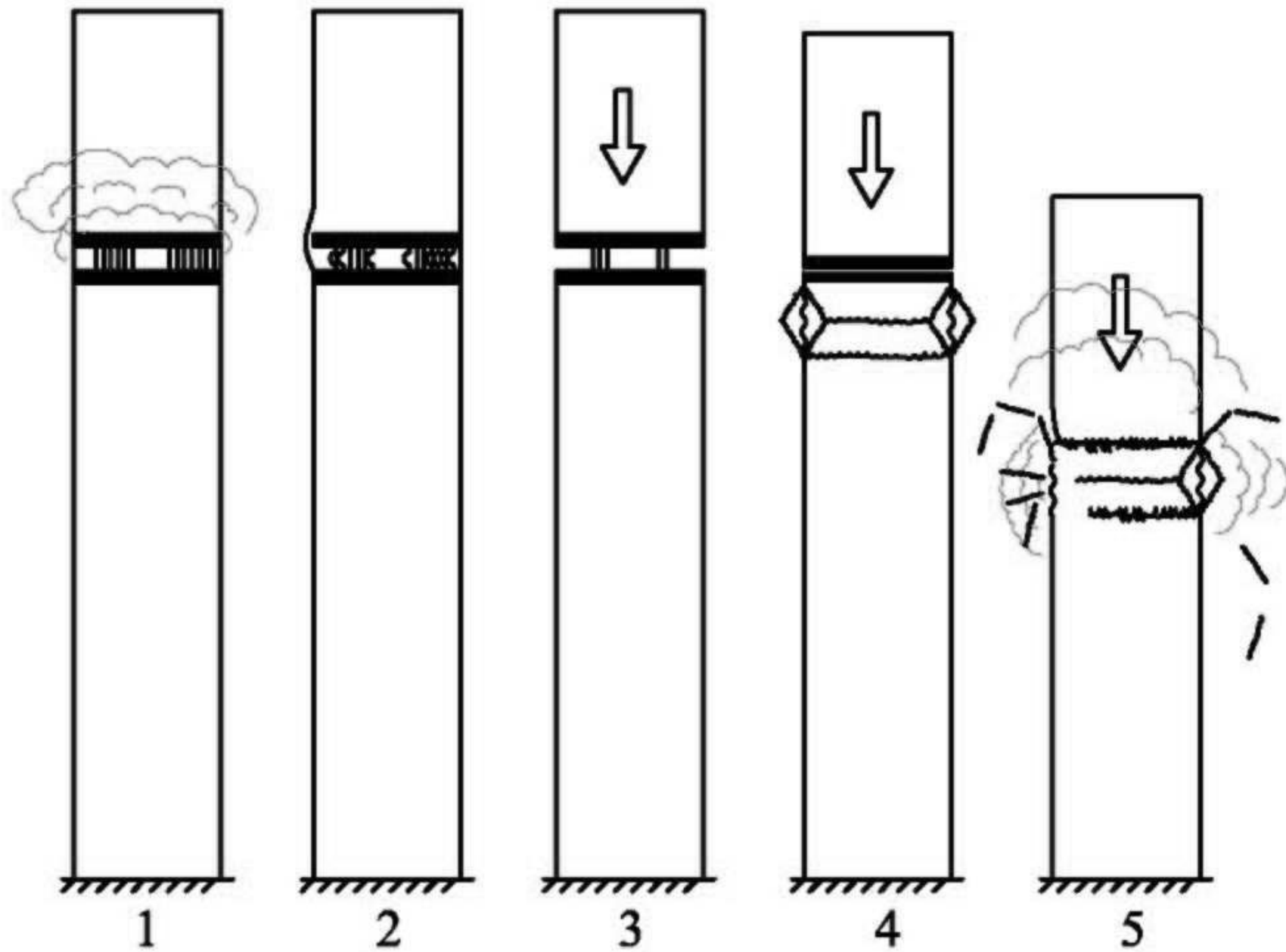


Fig. 1



**HIGH
PERFORMANCE
CONCRETE**

Concrete
see

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 !?!

Time-Temperature

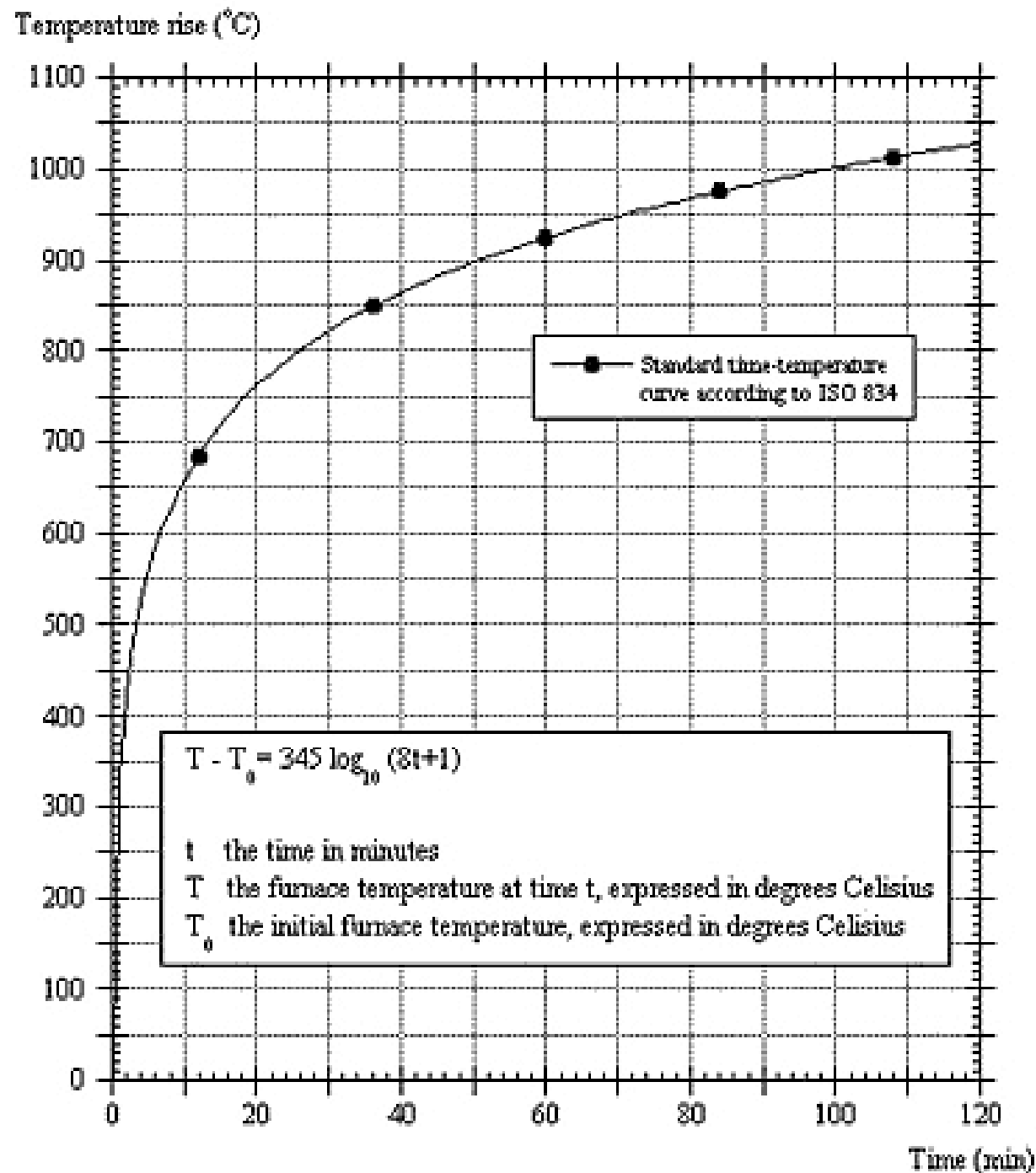
Curve

Standard Fire

ASTM E 119

ISO 834

The standard time-temperature curve



Concreto bajo Fuego *opciones de investigación*

PROBETAS cilíndricas o cúbicas
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

Concreto bajo Fuego

opciones de investigación

PROBETAS

ELEMENTOS

ESTRUCTURA

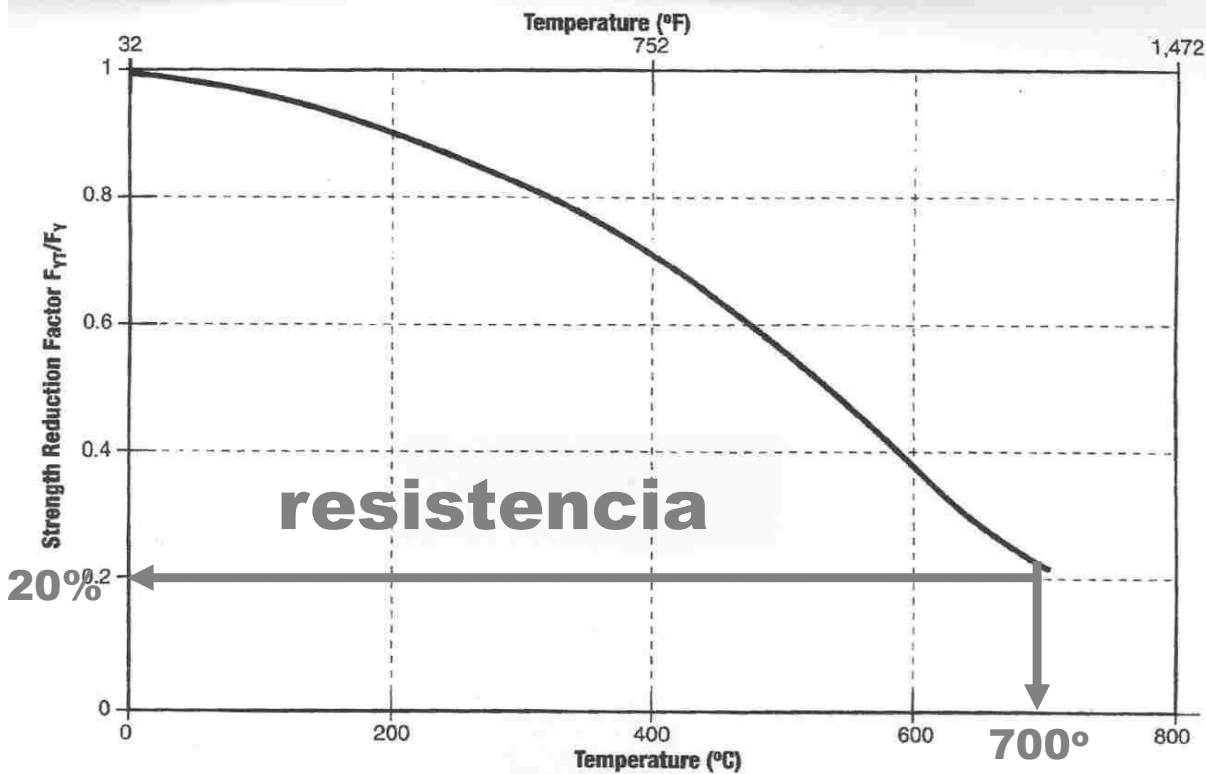


Figure A-6 Strength of steel at elevated temperatures (Lie 1992).

estructuras
metálicas

estructuras
de concreto

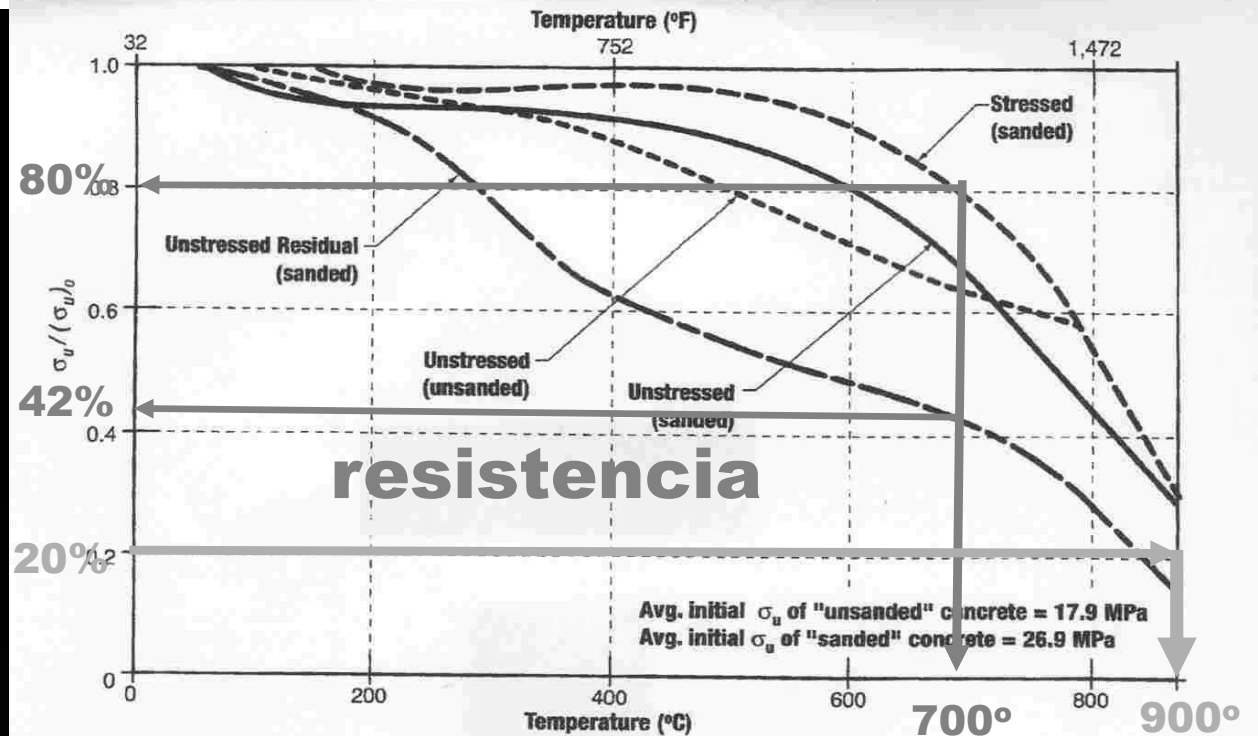


Figure A-12 Reduction of the compressive strength of two lightweight concretes (one with natural sand) at elevated temperatures (Kodur and Harnathy 2002)

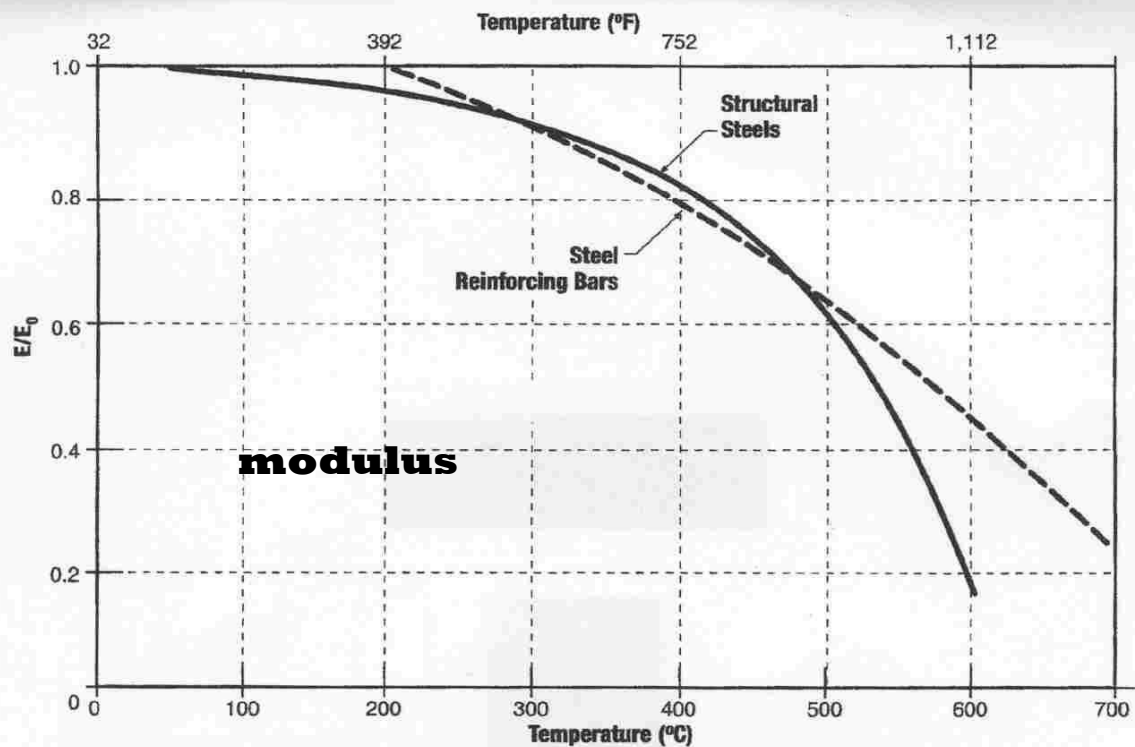
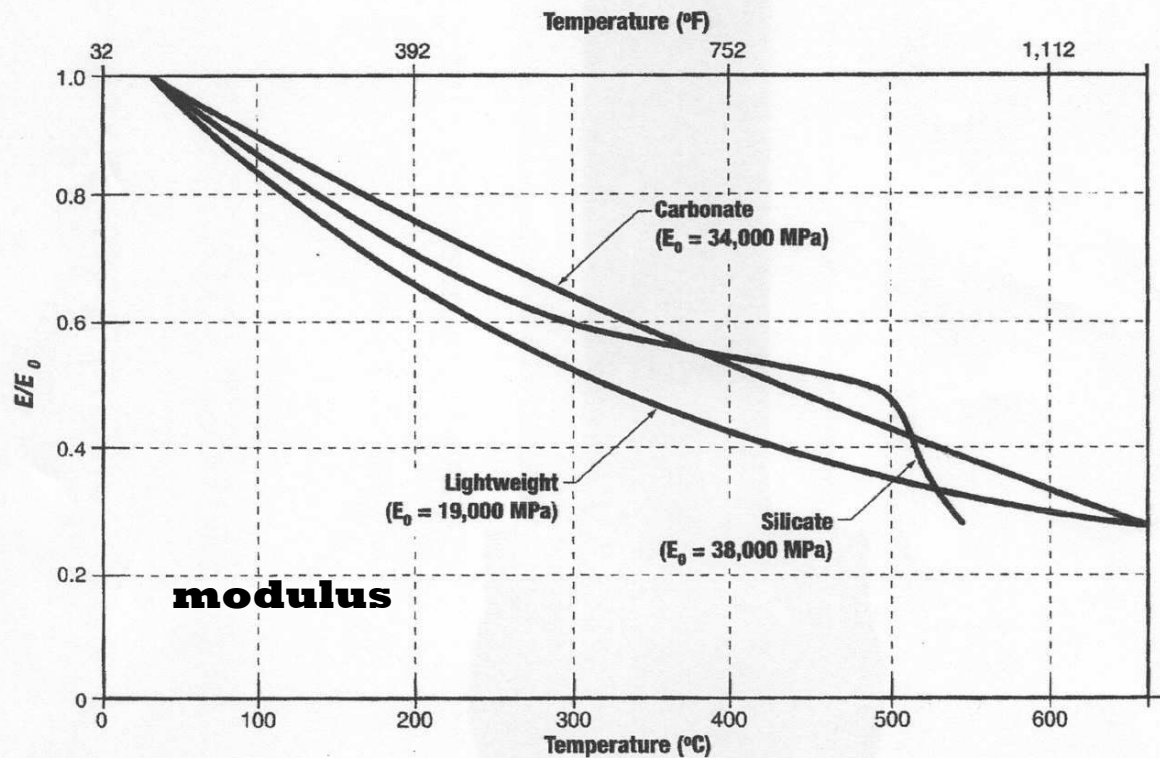


Figure A-7 Modulus of elasticity at elevated temperatures for structural steels and steel reinforcing bars (SFPE 2000).

**estructuras
metalicas**



**estructuras
de concreto**



Concreto bajo Fuego

opciones de investigación

PROBETAS

ELEMENTOS

ESTRUCTURA

Distribución de la temperatura en los perfiles metálicos

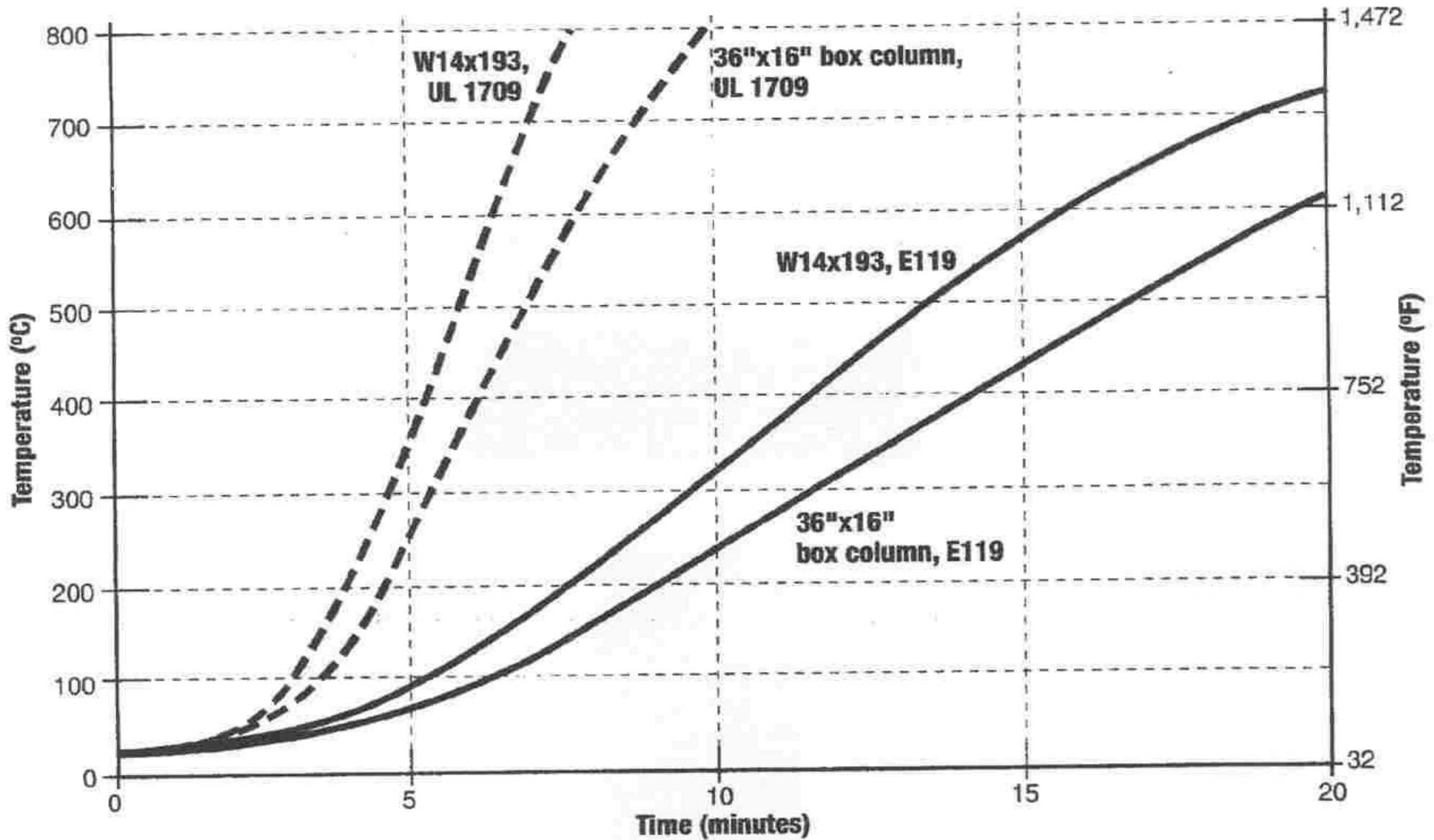


Figure A-9 Steel temperature rise due to fire exposure for unprotected steel column.

Distribución de las temperaturas en una columna de hormigón de 50x50cm

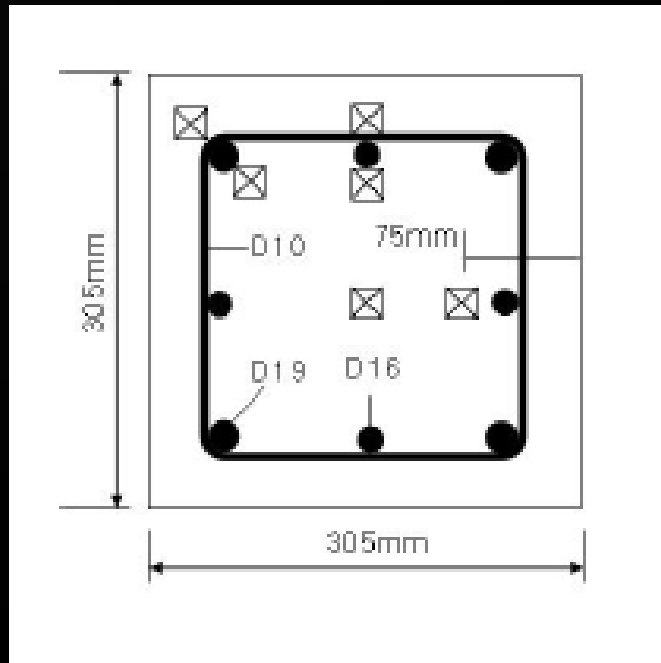
Polivka &
Wilson
UC, 1976
Berkeley

Calmon &
Claudio
UFES,
2002
Vitória

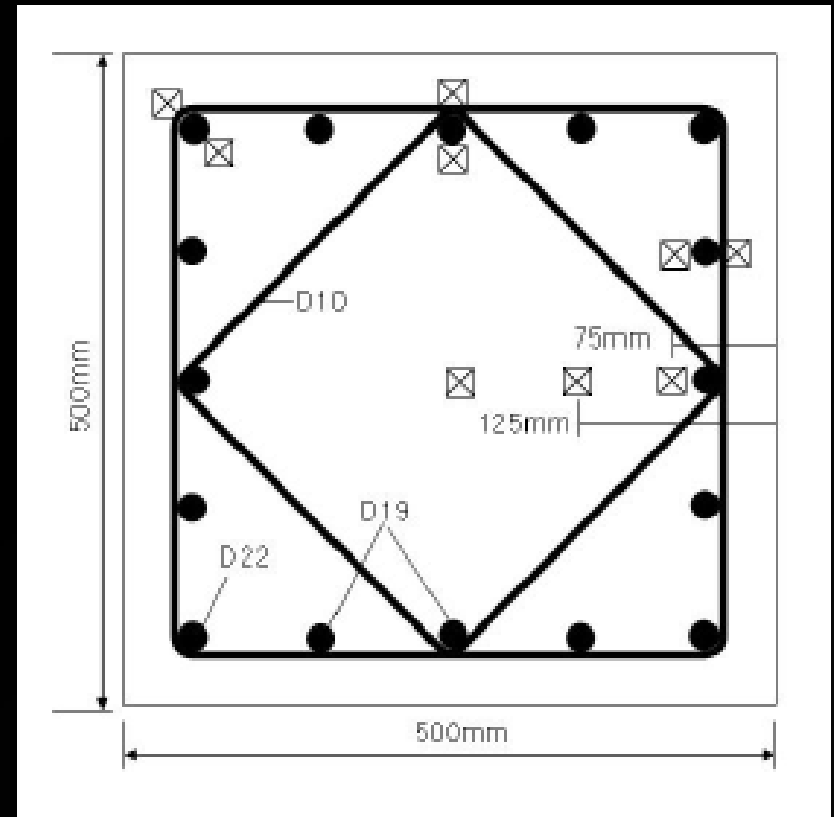
Bazant &
Kaplan
Logman,
1996



influencia de la sección transversal



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



50cm x 50cm x 3,4m

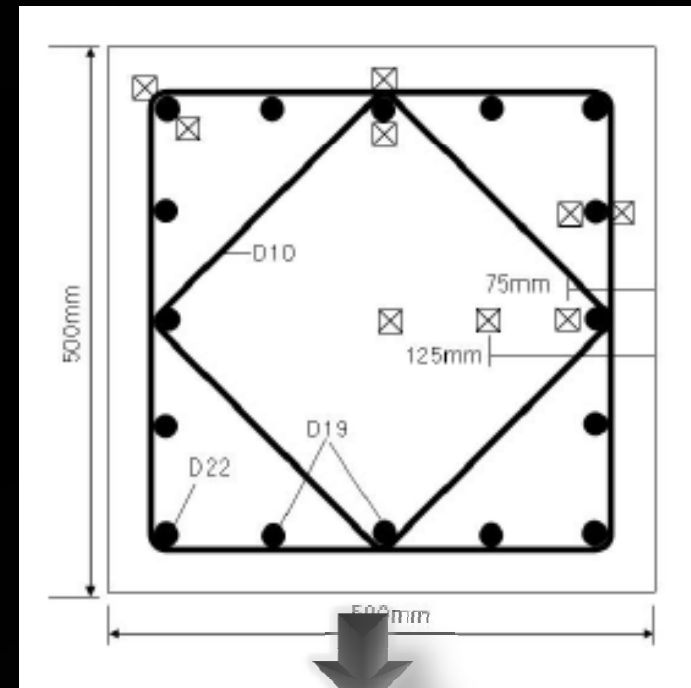
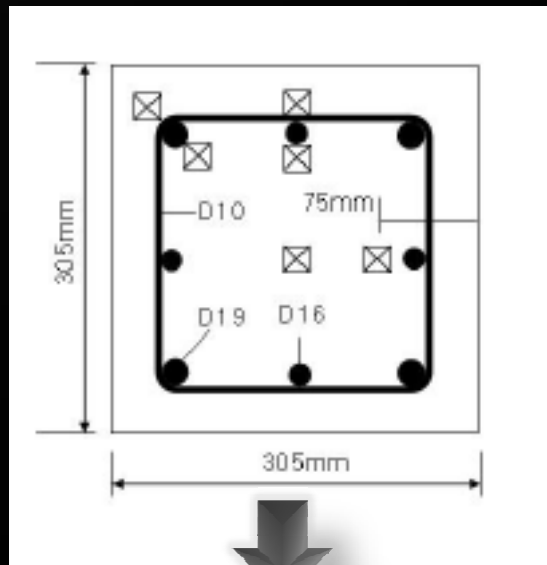
120MPa
HSRC

Park et al, 2007

influencia de la sección transversal

50cm x 50cm x 3,4m

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



✓ *spalling*: 13mm

✓ fire → 176min.

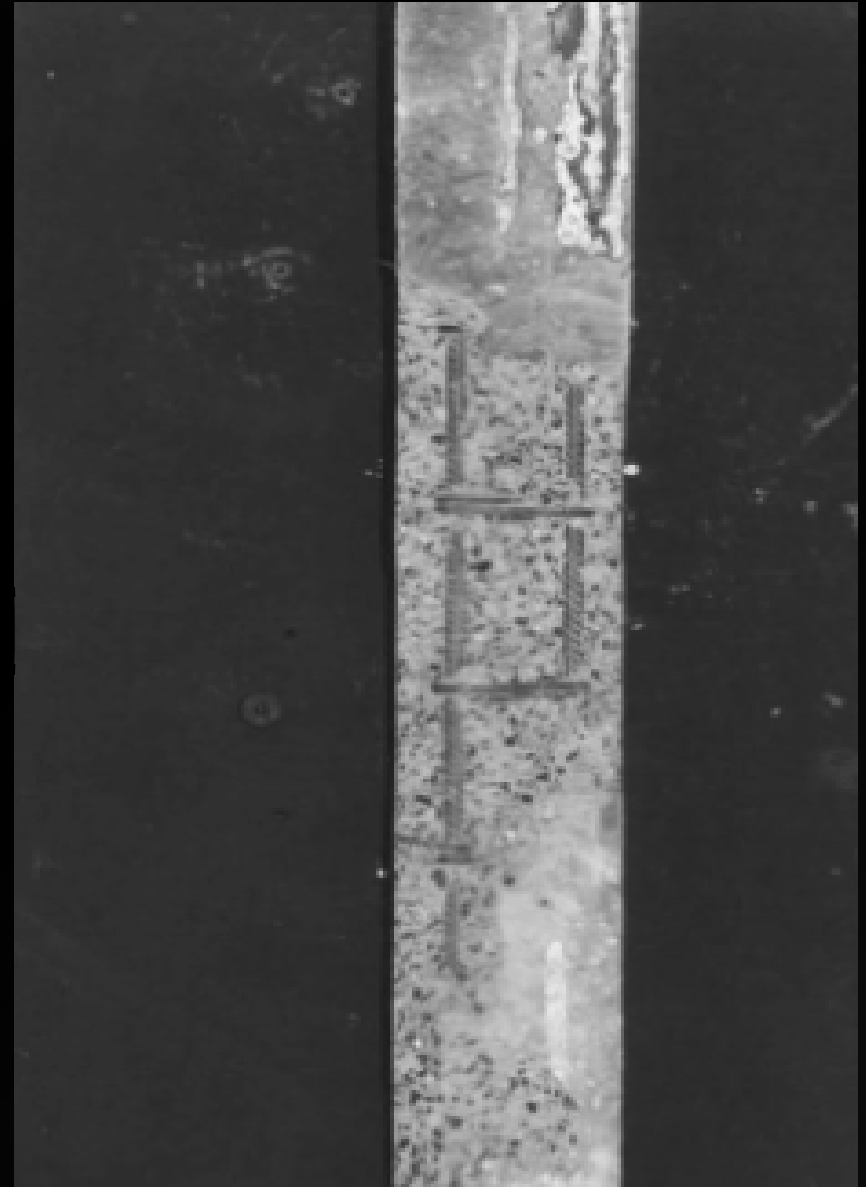
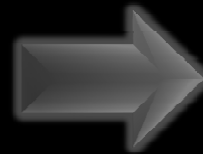
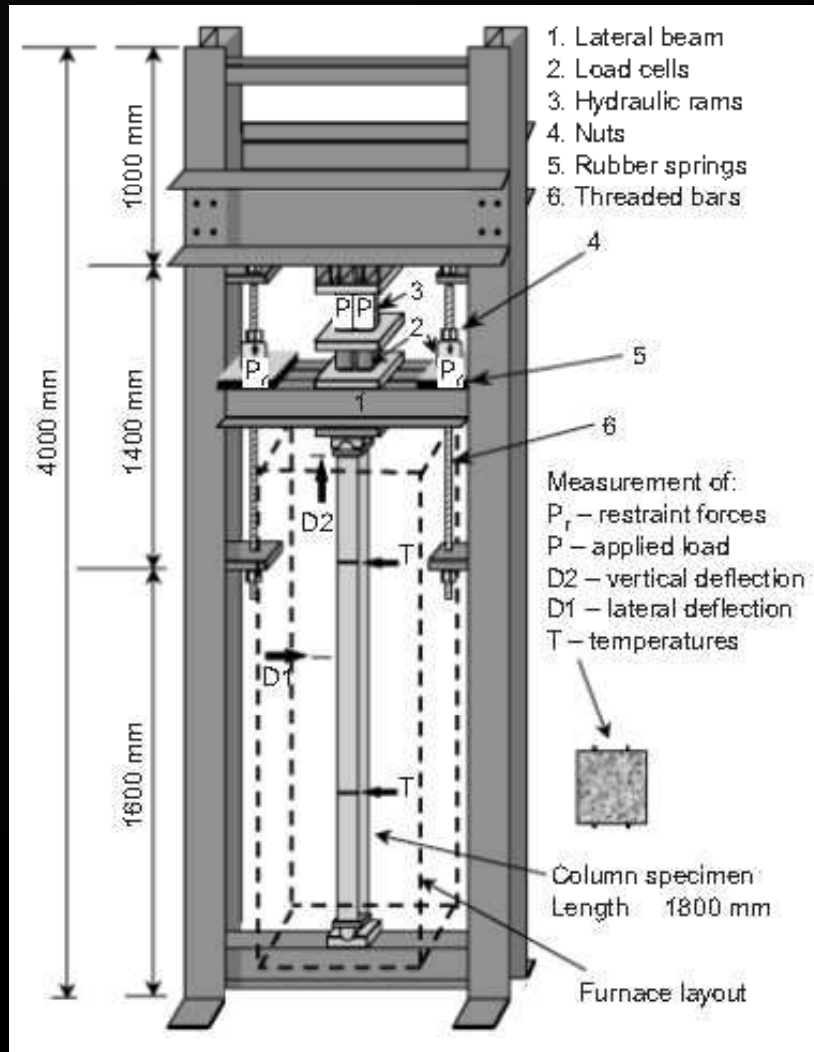
✓ collapsed

✓ *spalling*: 0mm to 5mm

✓ fire: 240min.

✓ no collapse

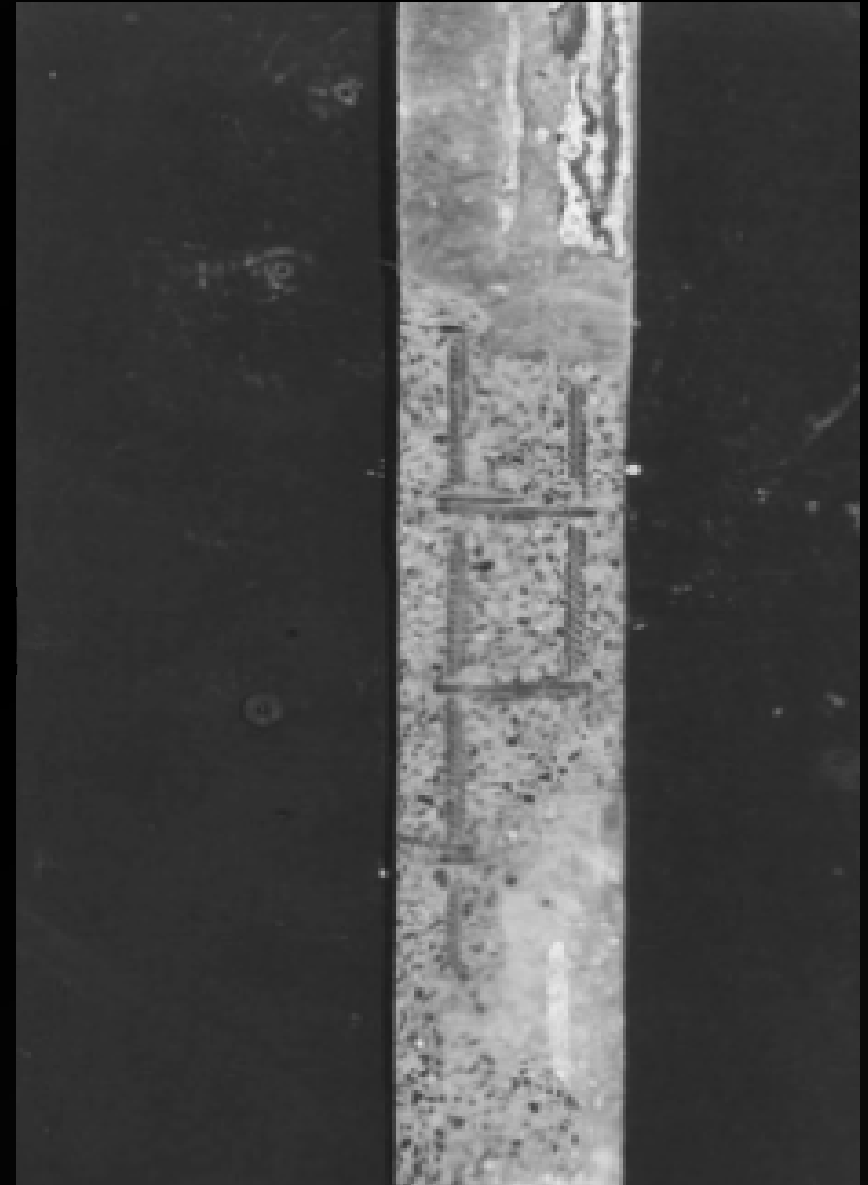
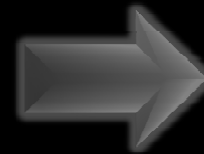
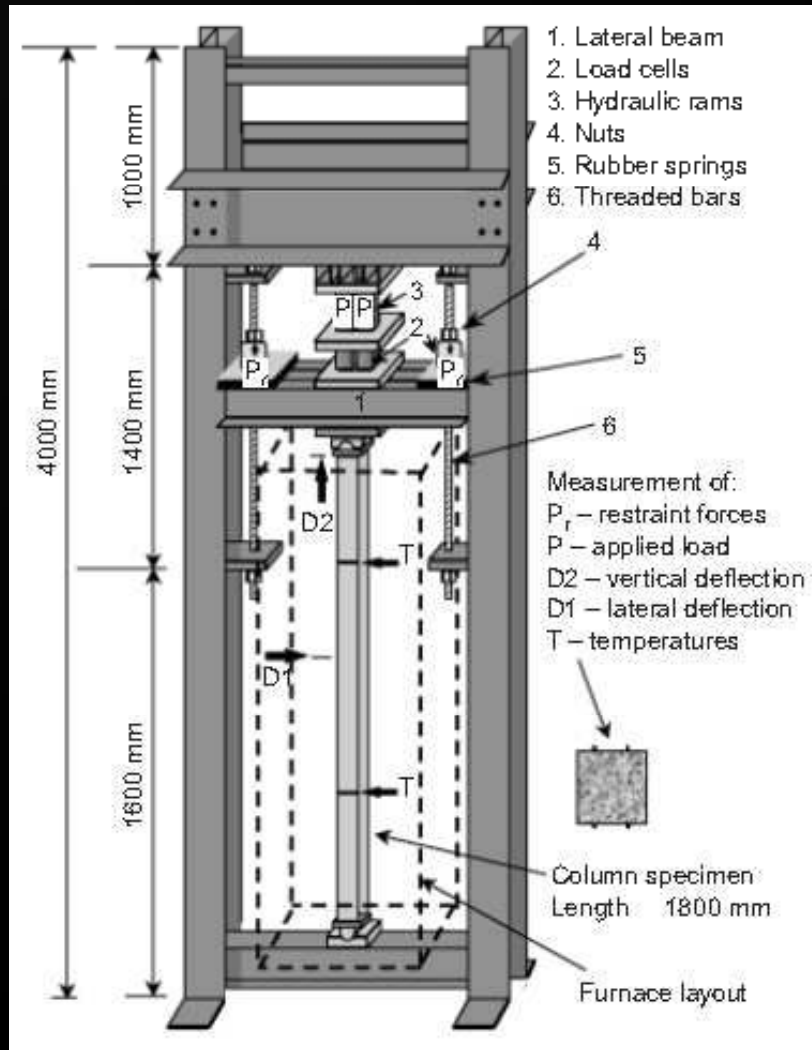
pilar !!??



cross section 12,5cm x 12,5cm

pilar !!??

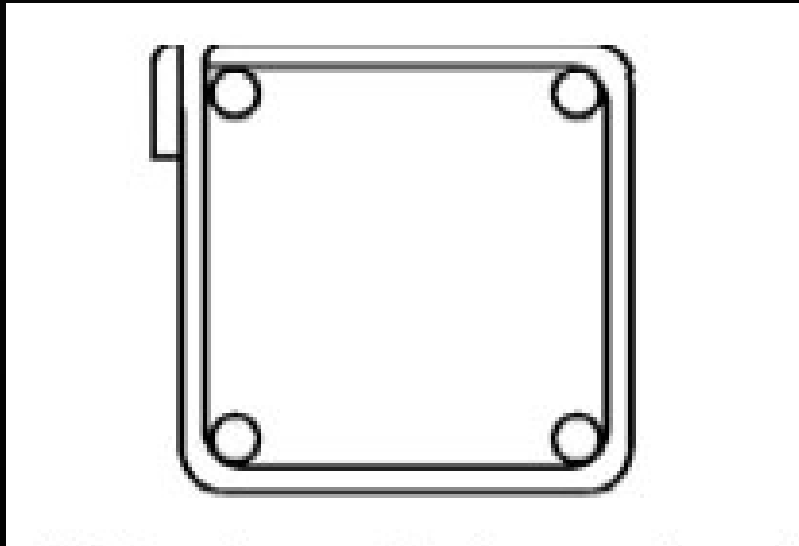
> 40cm



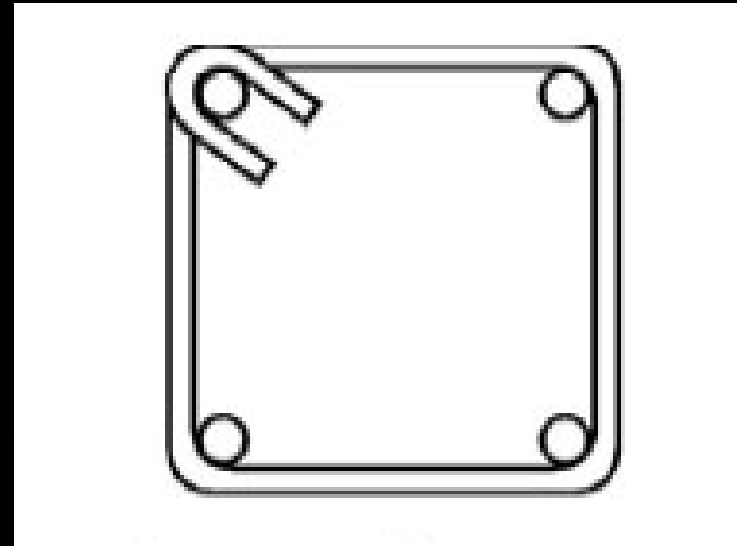
cross section 12,5cm x 12,5cm

detalles de armadura

cerchos en pilares



incorrecto



correcto

incorrecto



Configuração Convencional de Estribos

correcto



Configuração Modificada de Estribos

Kodur, 2005

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

resistencia del concreto

			Concreto normal (43MPa)		Concreto de alta resistência (106MPa)	
Referência	Amostra	Grau de restricção	Tipo de <i>spalling</i>	Grau de <i>spalling</i>	Tipo de <i>spalling</i>	Grau de <i>spalling</i>
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%

Concreto bajo Fuego

opciones de investigación

PROBETAS

ELEMENTOS

ESTRUCTURA

estructura de concreto

The Cardington Fire Test

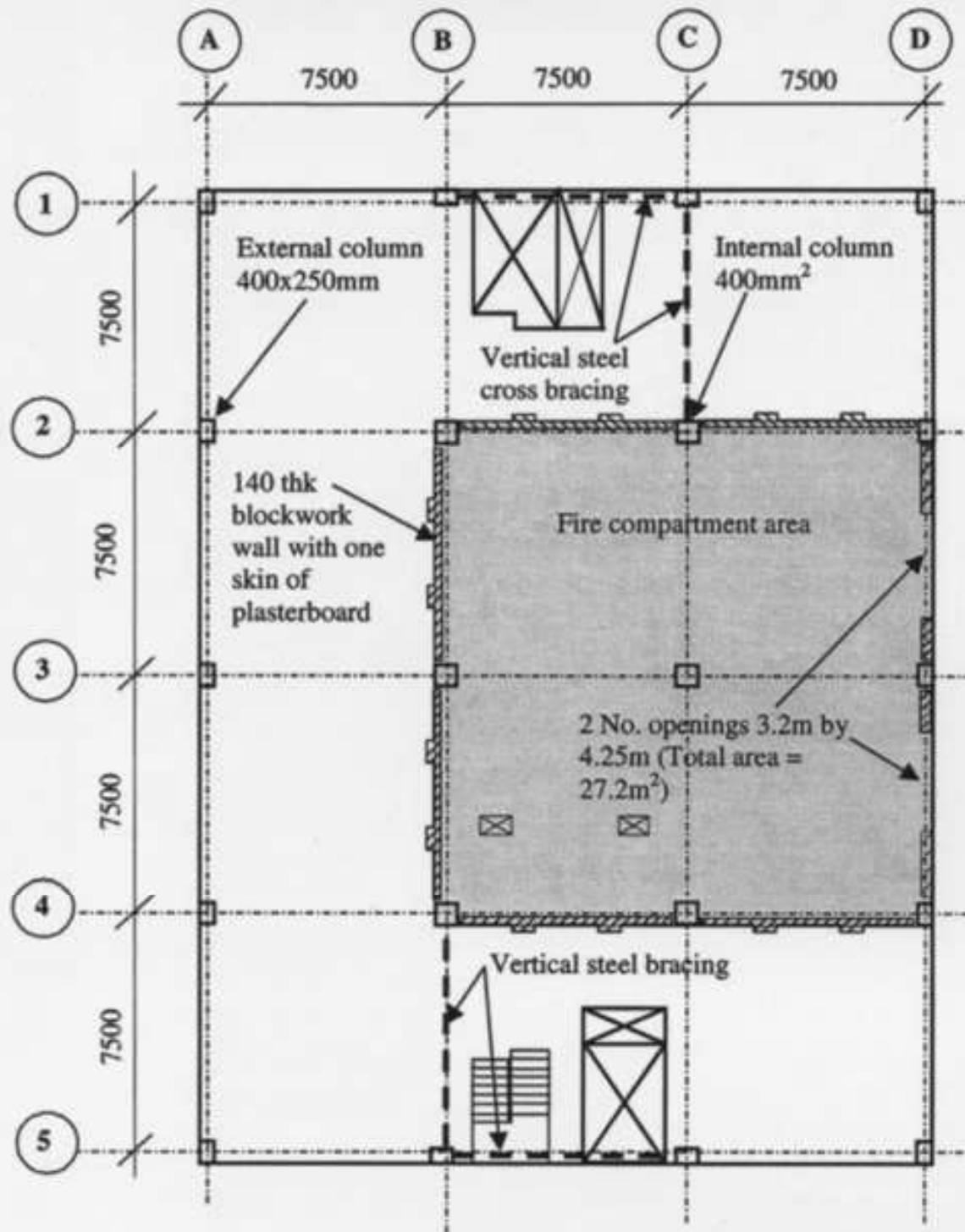
By Pal Chana and Bill Price, British Cement Association

Jul 15, 2003, 09:00

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



Cardington Concrete Building Frame



planta del edificio con sala de fuego

40kg/m²



sala de fuego antes de la ignición

**despues de
120min**



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;

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).

INVESTIGACIÓN
Universidad de São Paulo
BRASIL
2002 → 2010

PhD student: Carlos Britez
Supervisor: Paulo Helene

história



Edifício e-Tower

São Paulo Brasil

2002

$f_c = 125\text{MPa}$

world record

6 pilares en 7 pisos

concreto



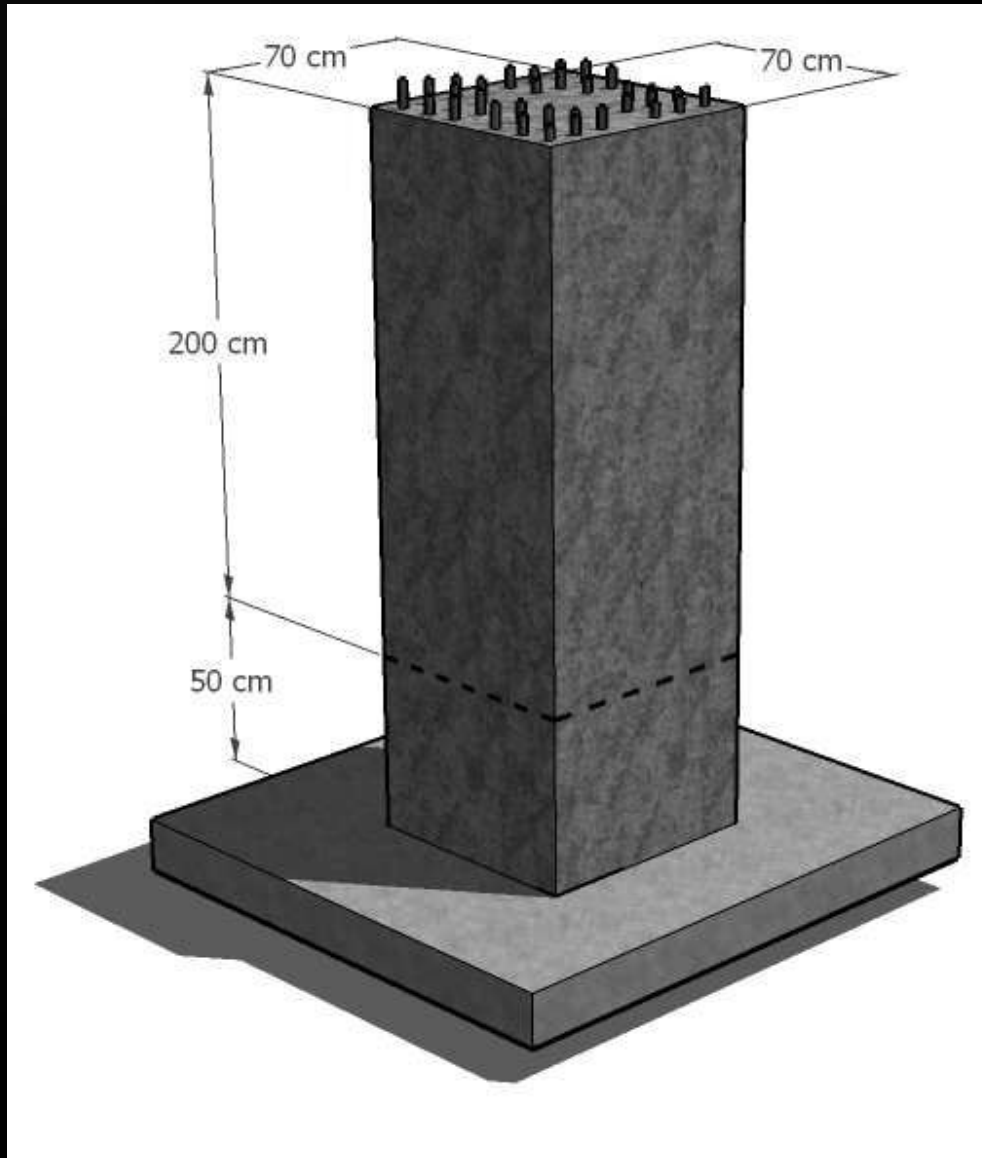
“HPCC in Brazilian Office Tower”

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

HELENE, Paulo &
HARTMANN, Carine

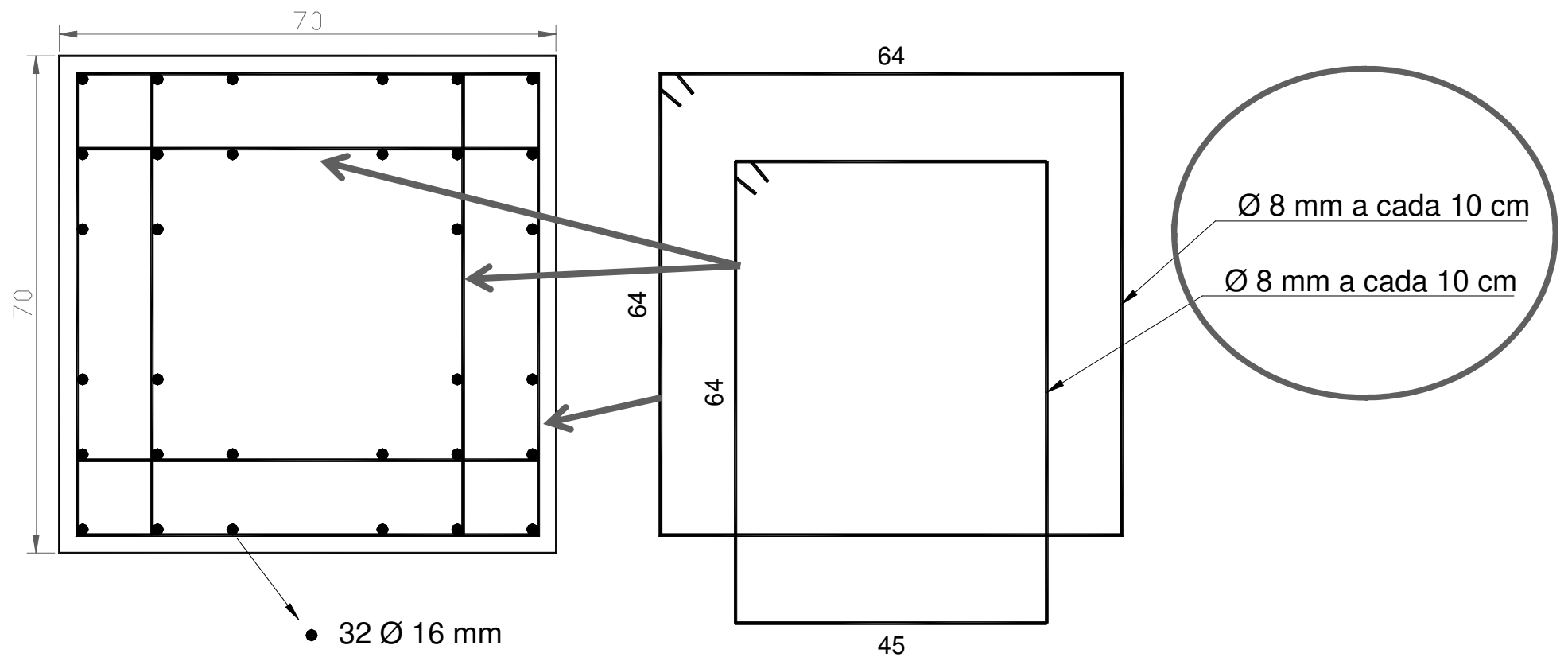


Pilar Ensayado



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

sección transversal



**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

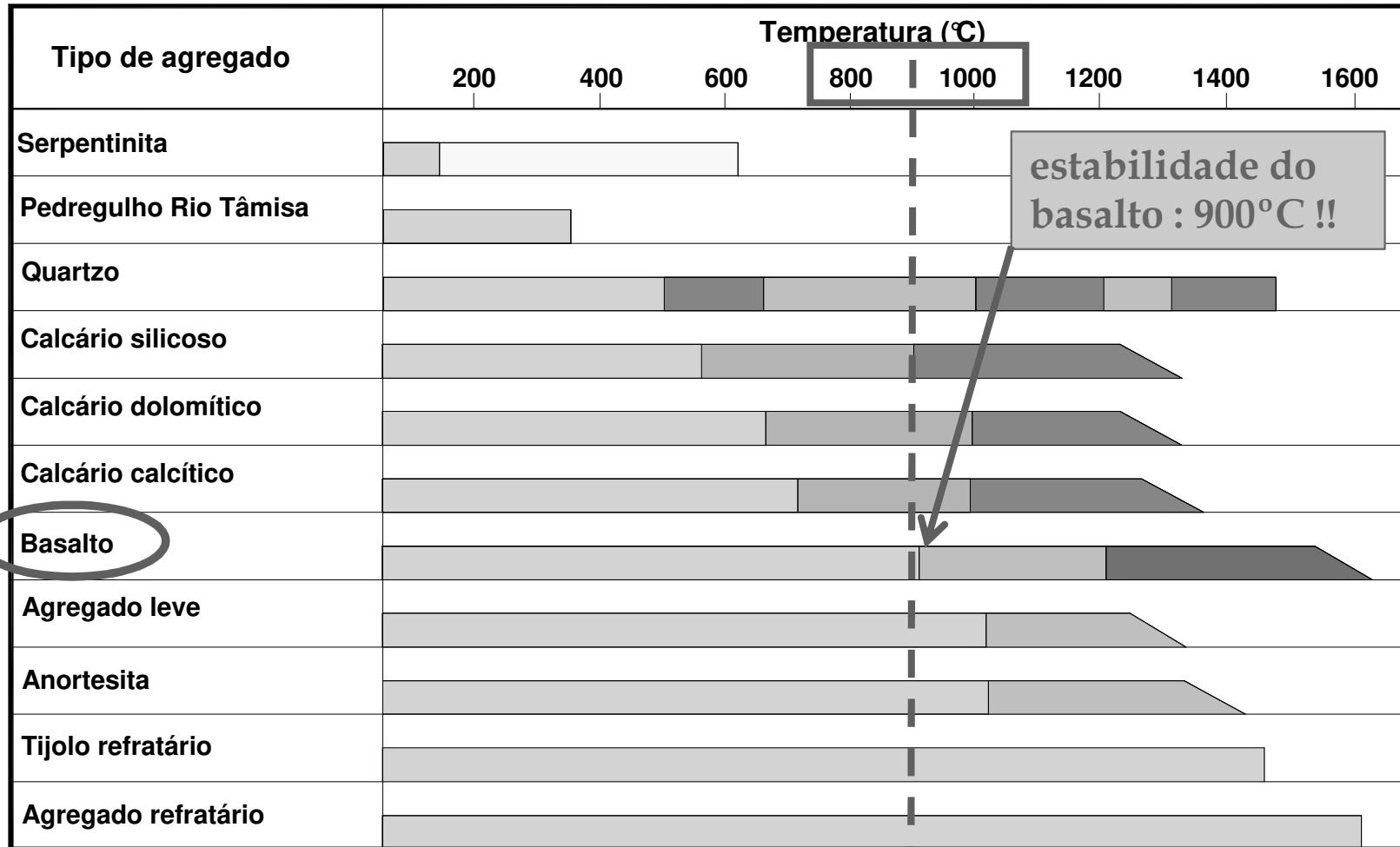
pilar similar a los reales
mantenido en ambiente
externo



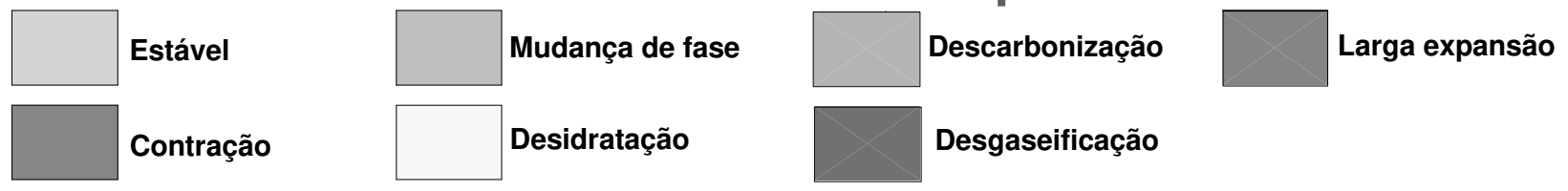
originalidad de la investigación

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

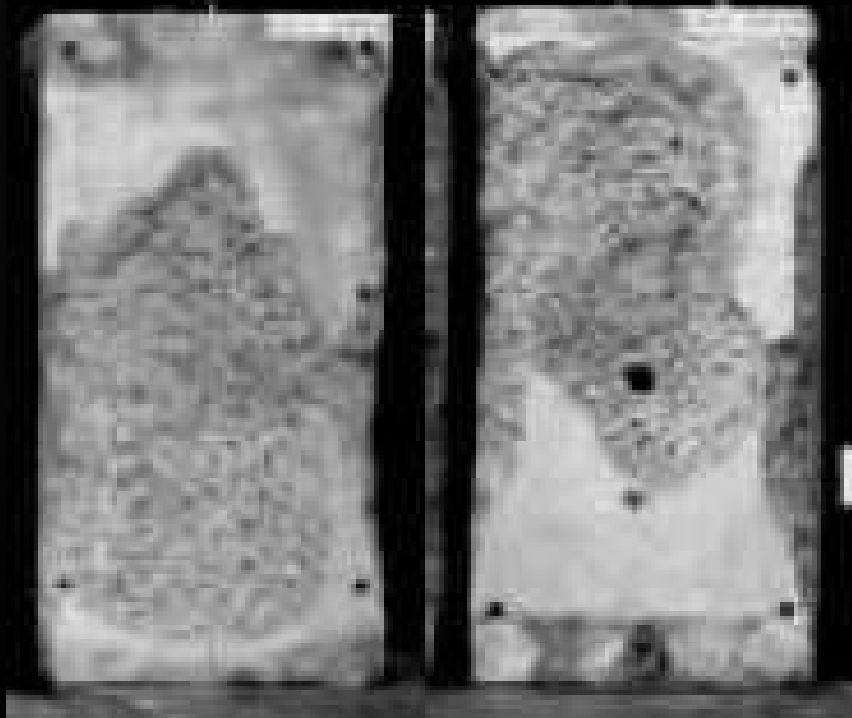
Áridos (*fib* bulletin 38, 2007)



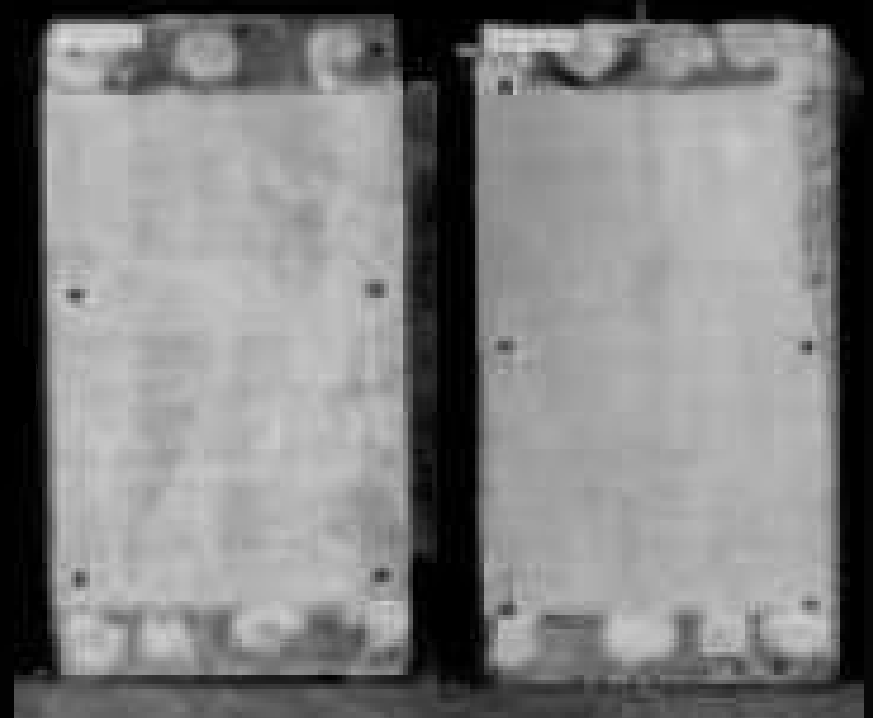
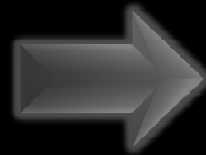
estabilidade do basalto : 900°C !!



influencia de la edad ...



2 months



1 year

Morita et al, 2002

concreto colorido



pilar → corte y transporte



hilo de diamante

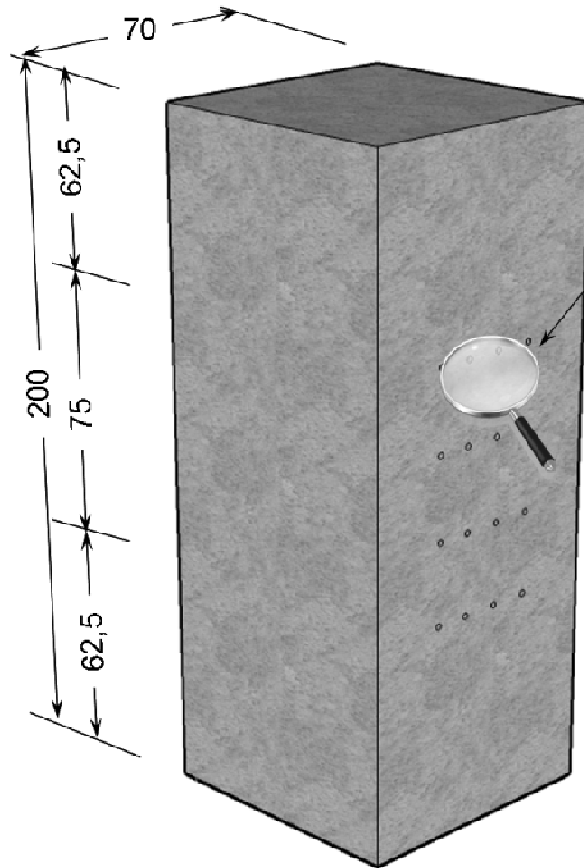


testigos extraídos



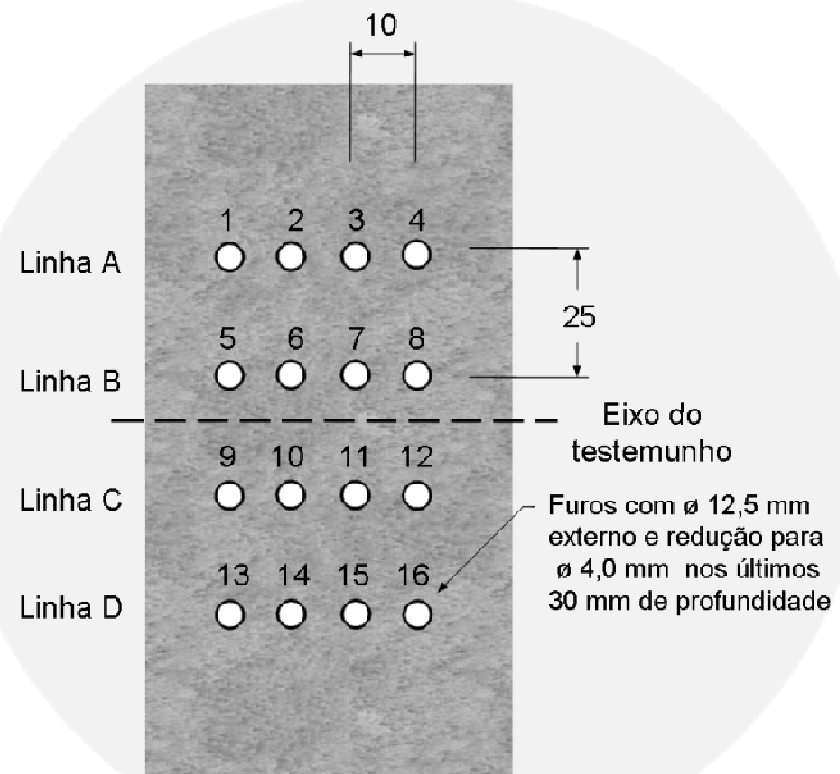
140 MPa

16 termopares

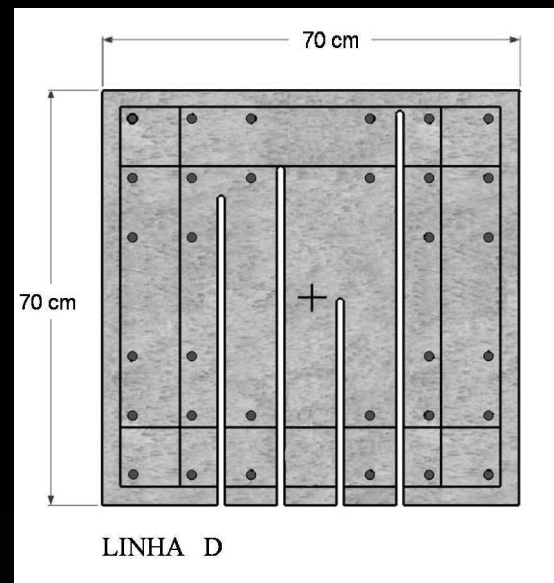
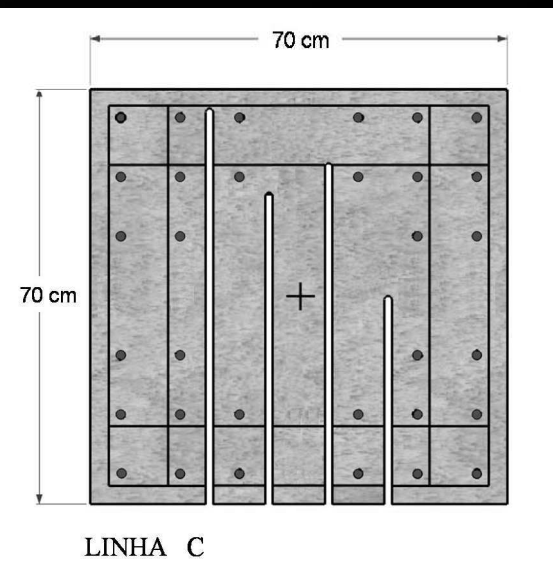
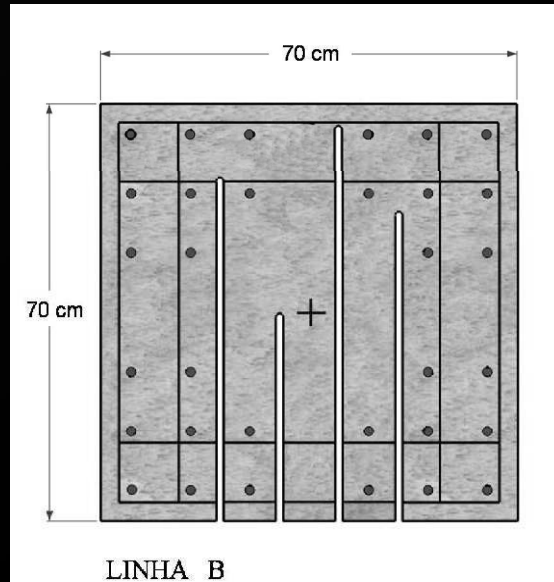
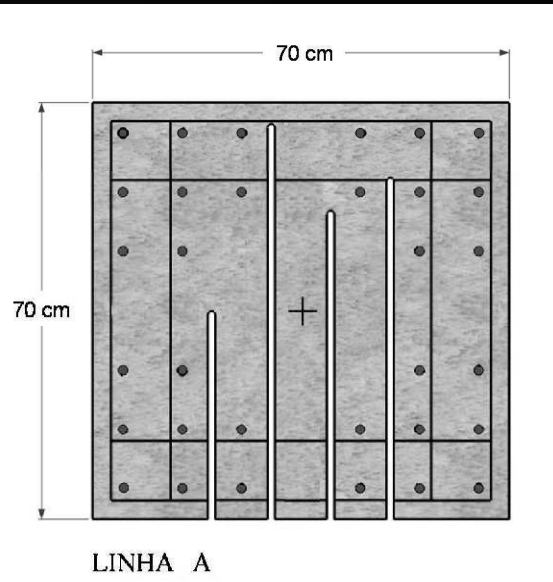


Medidas em cm

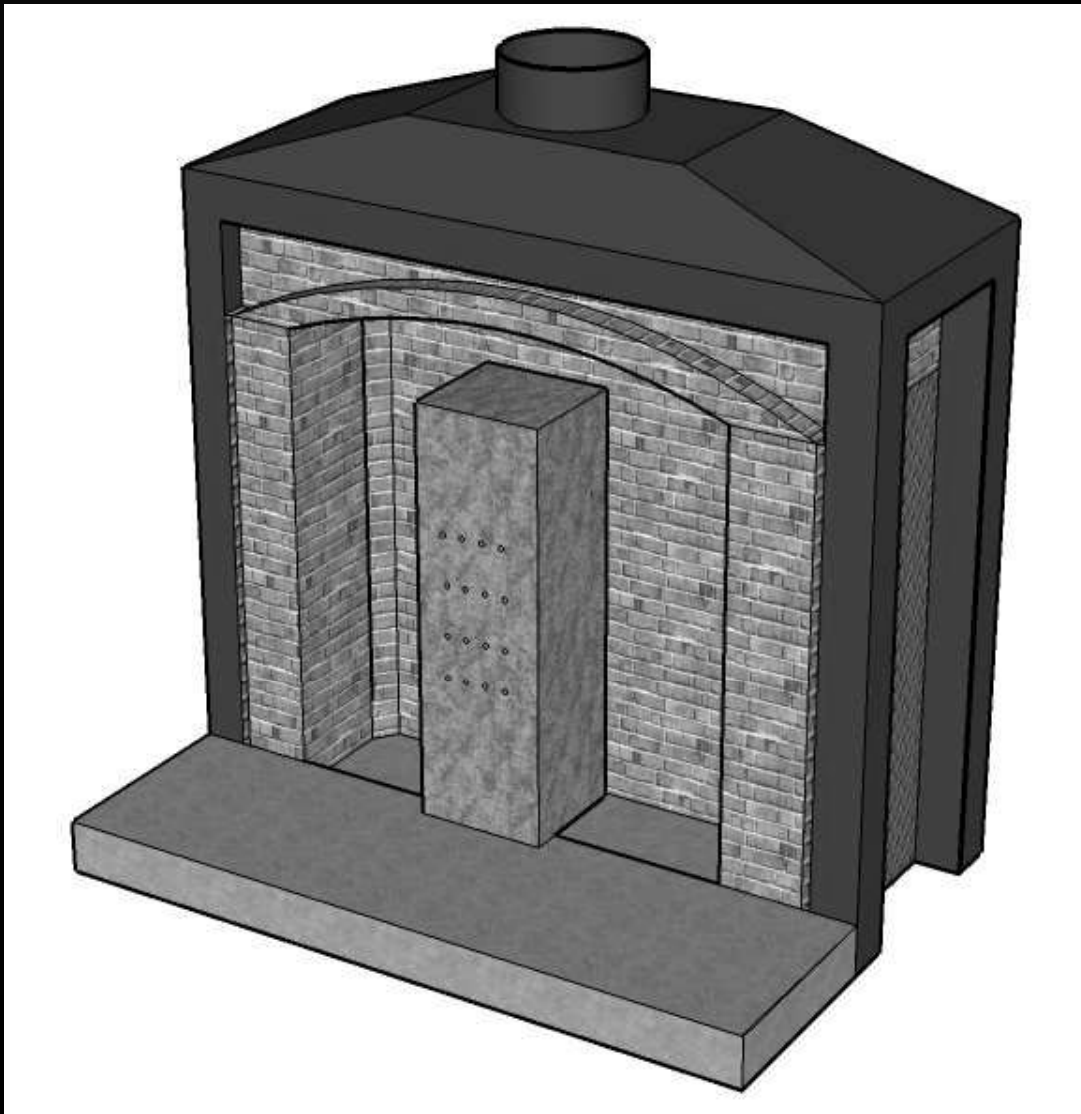
Furos para colocação dos termopares



Inserindo termopares



Laboratório (horno)



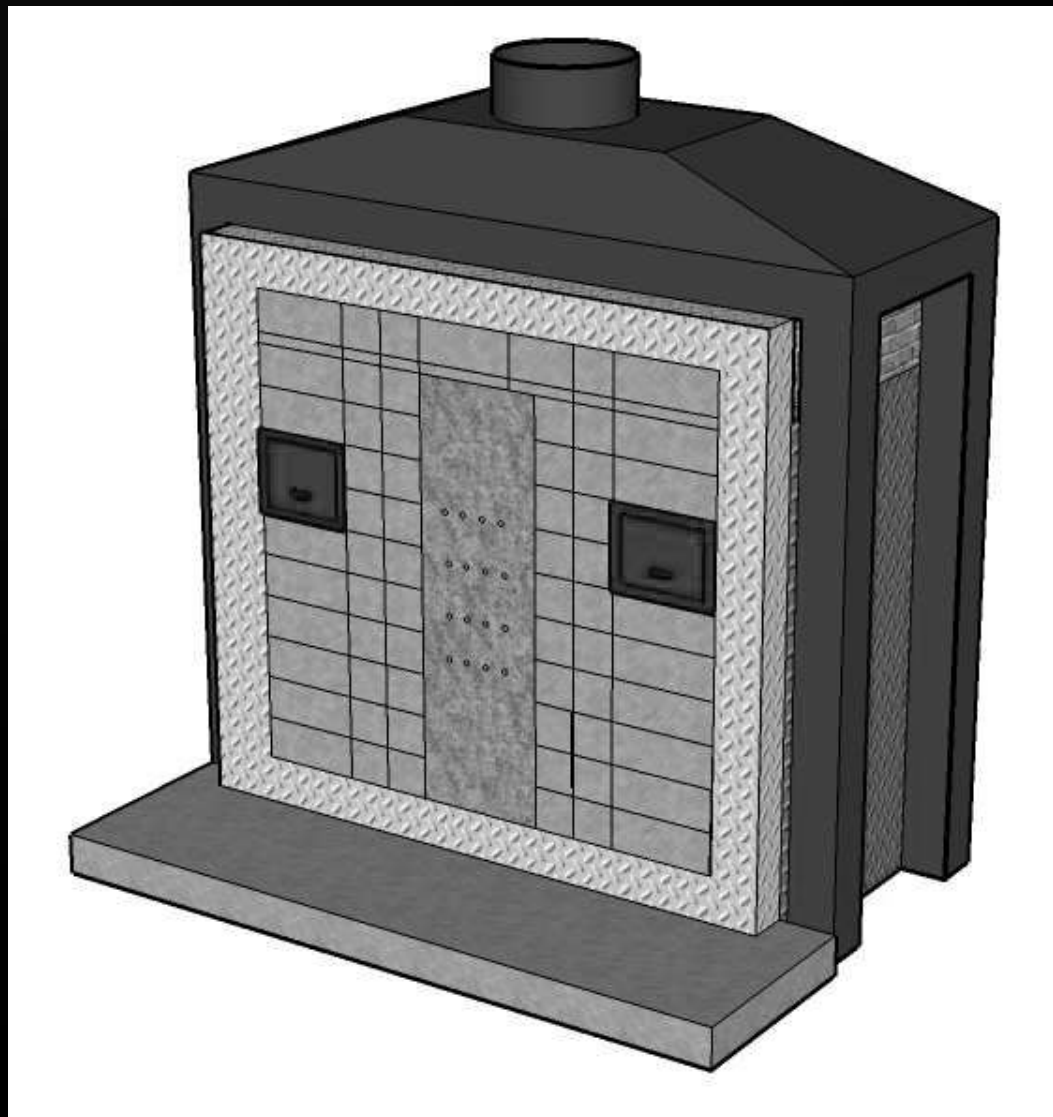
- ✓ **sin carga**
- ✓ **3 lados (faces)**
- ✓ **ISO 834**
- ✓ **180 min**

protección con fibras ceramicas

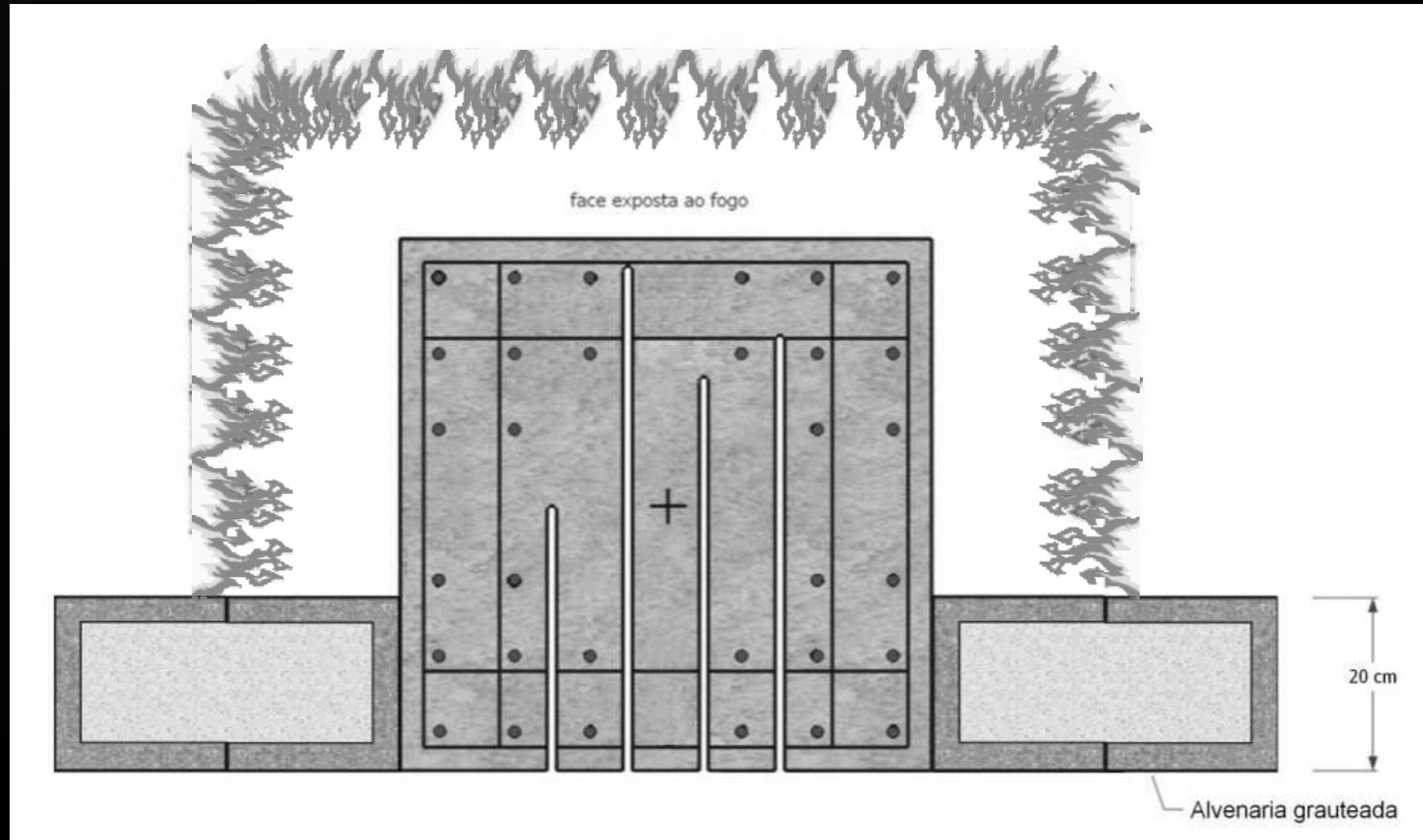


Laboratório

horno de alta temperatura

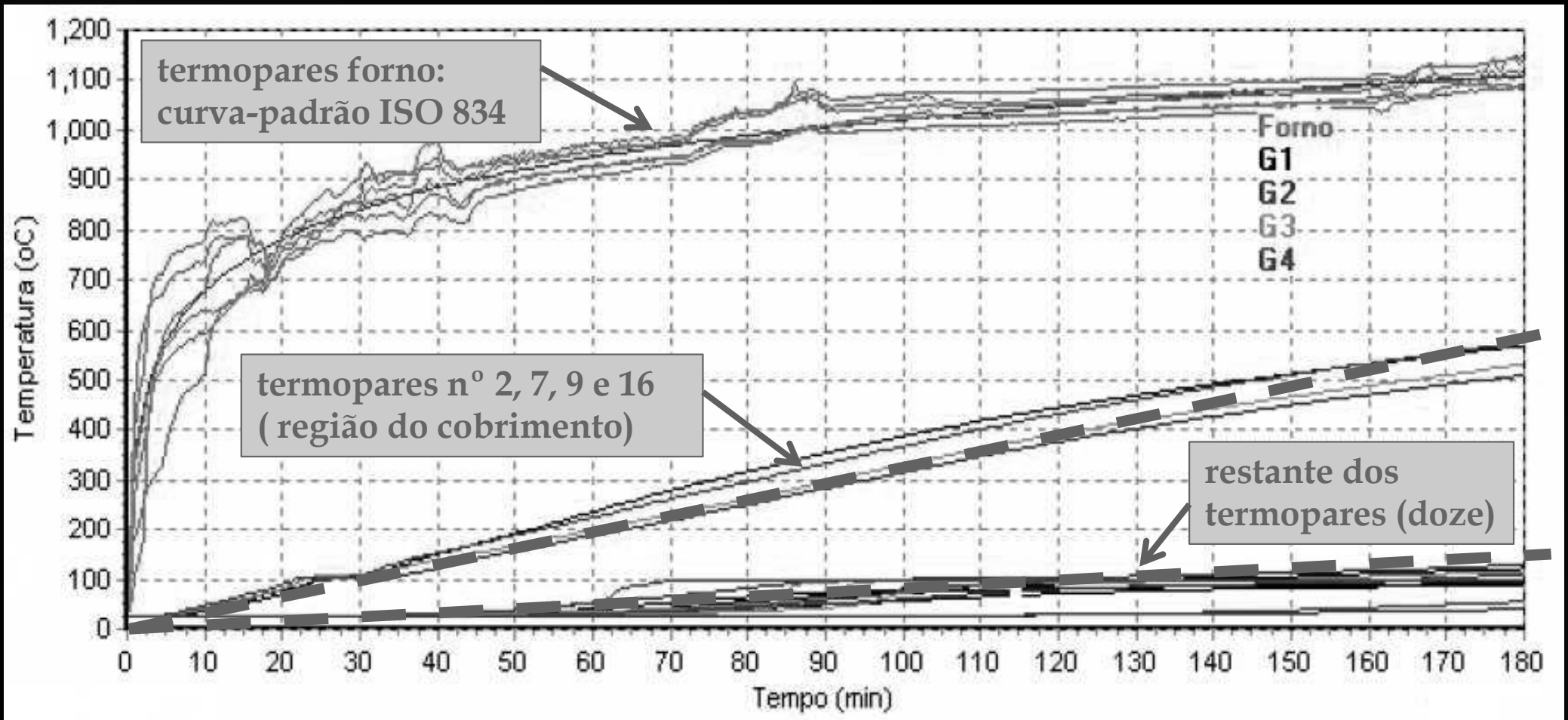


condiciones de ensayo (3 lados)

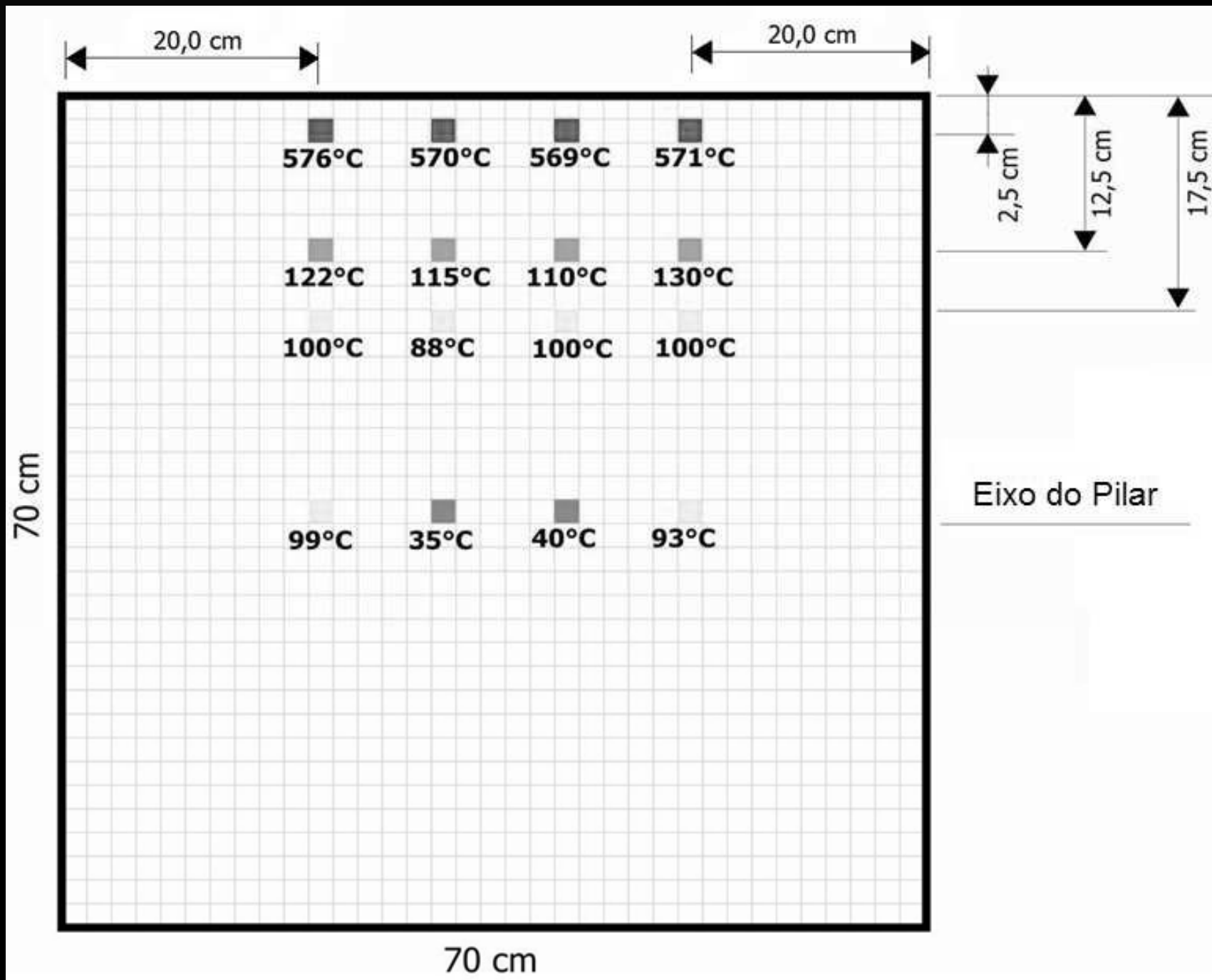


ISO 834 standard fire

evolución de las temperaturas



temperaturas a los 180min



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



Integridad



aristas perfectas

Integridad después de 180min



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

Integridad

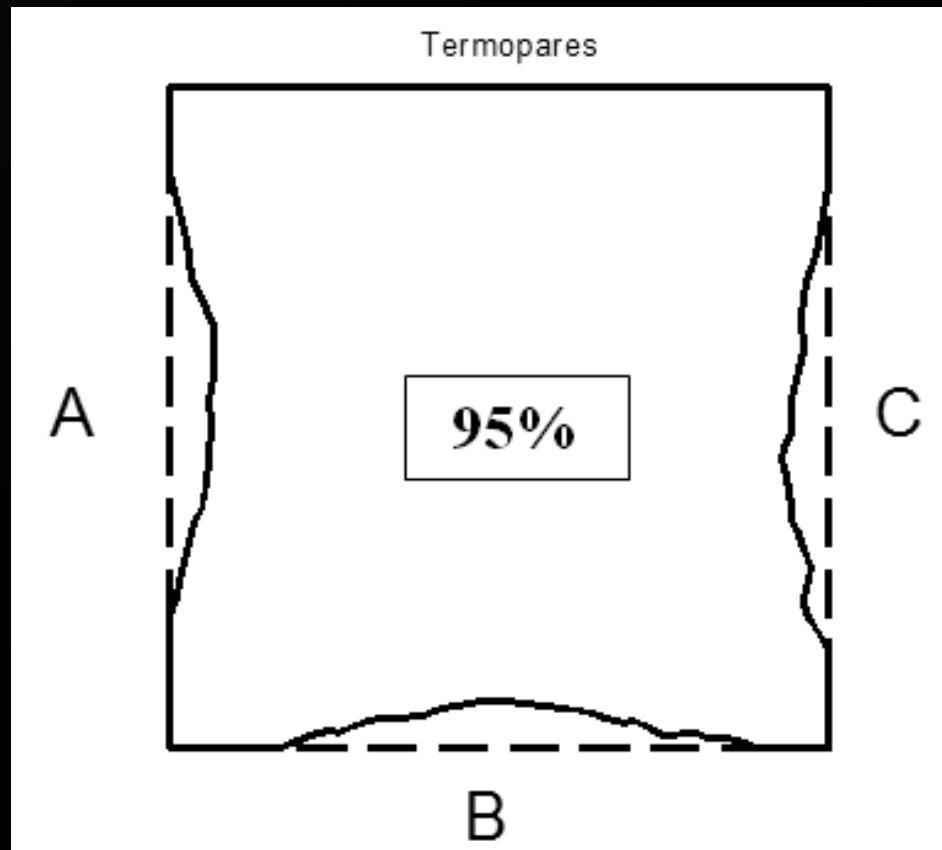


**área de acero
expuesta
< 5%**

Integridad



Integridad



spalling medidos en 450 puntos (150 cada lado)



“pigmento como termometro natural”



“termometro natural”



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



cerca de 600°C

**análise numérica de la
capacidad resistente
residual del pilar
EUROCODE II**

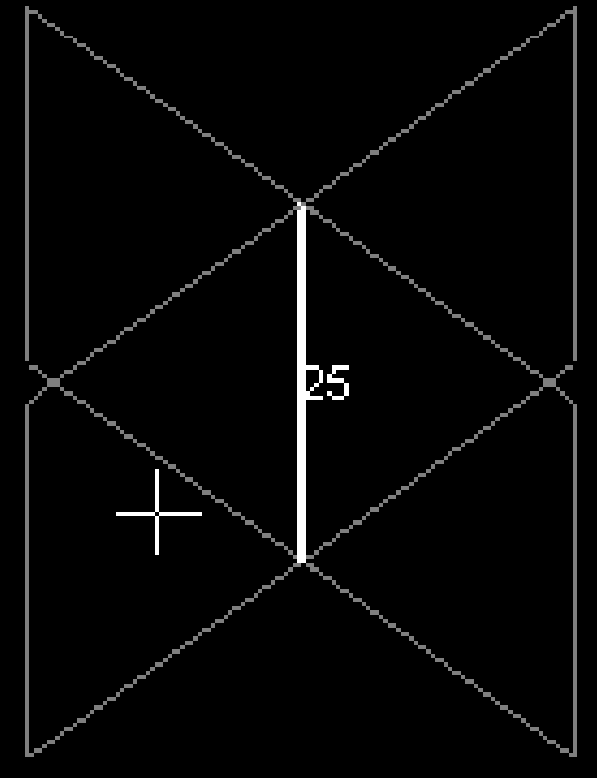
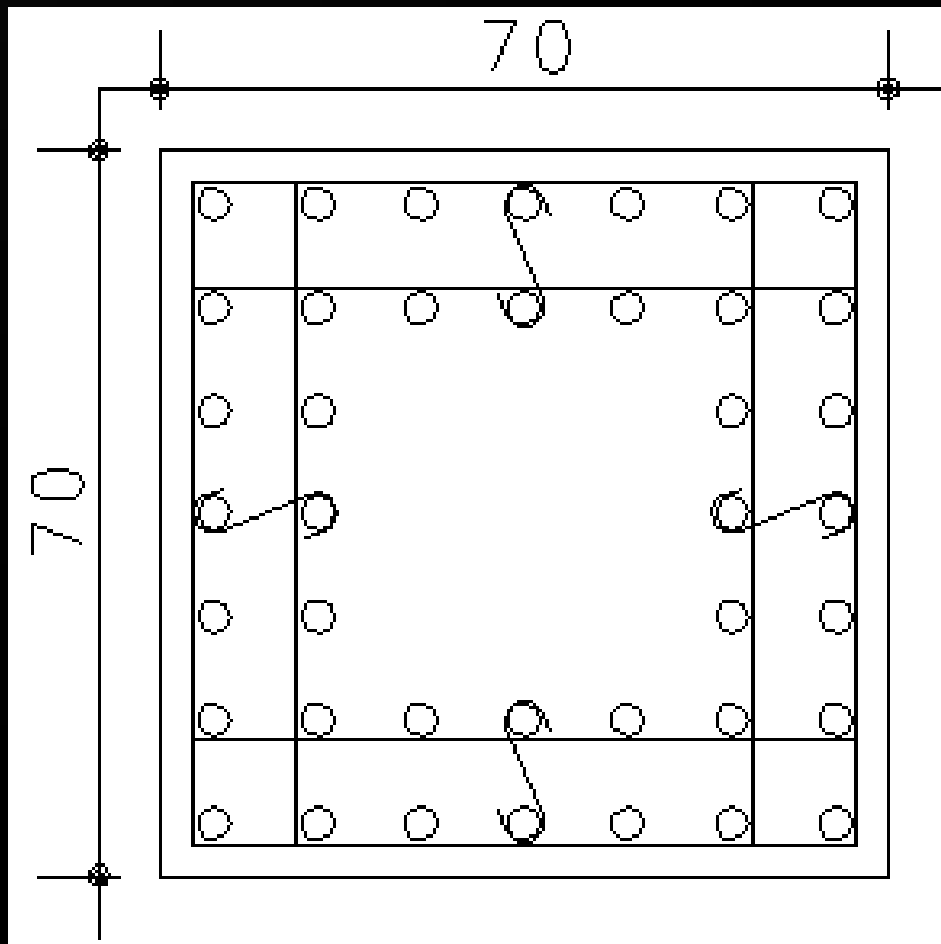
Condición Inicial

cross section = 70x70cm

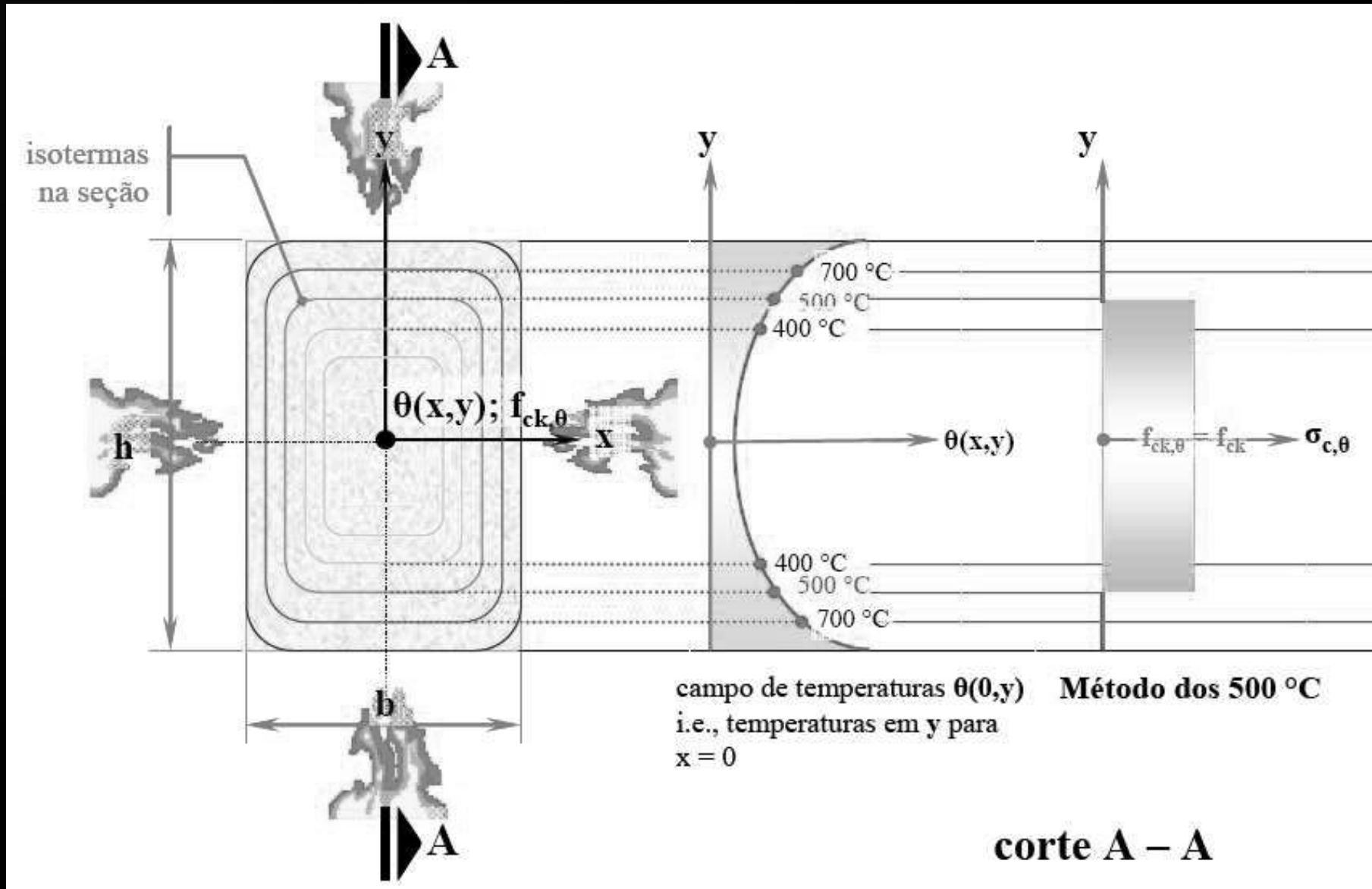
$A_c = 4578,32\text{cm}^2$

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

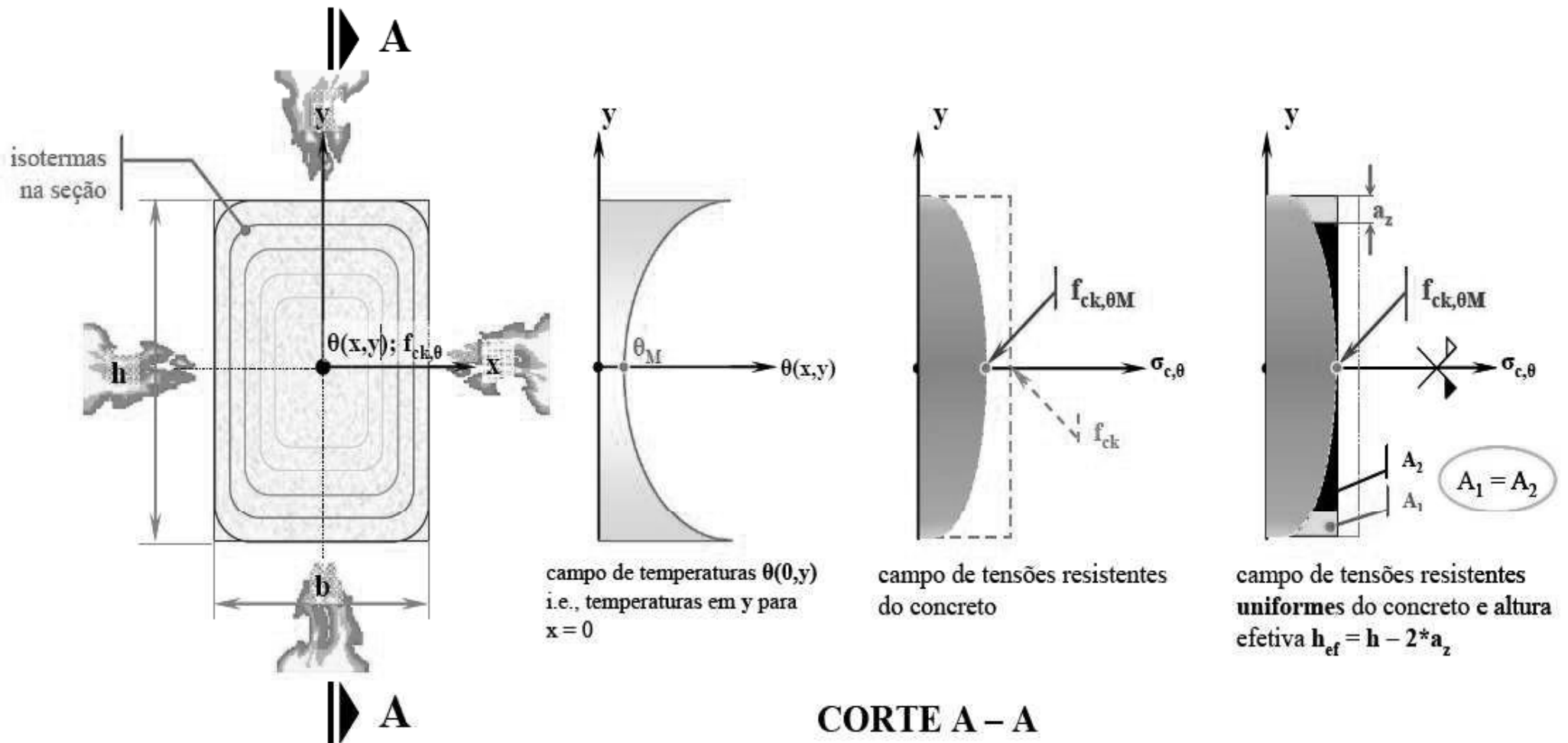
$\rho = 7,03\%$



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



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



resumo para $M_x = M_y = 0$

Condición Inicial

cross section \rightarrow 70x70

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

500°C Isotherm Method

cross section \rightarrow 56x56

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

Zone Method

cross section \rightarrow 52x52

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

Comportamiento en la Investigación

Condición Inicial

cross section → 70x70

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

**Condición real después
del fuego**

cross section → 59x59

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

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

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



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

HSC > 50MPa

EXPLOTA

frente al fuego

(explosive spalling)

MITO o VERDAD ?

VERDAD

HSC > 50MPa

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

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**



A black and white photograph of a city skyline featuring several prominent skyscrapers. The buildings have a grid-like facade of windows. Logos for 'BCN', 'Lufthansa', and 'Hilton' are visible on the upper sections of the buildings. In the foreground, a train is visible on tracks, and there are some trees and bushes. The sky is filled with clouds.

Muchas Gracias!