



**ALCONPAT**  
*Uruguay*



ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

# Comportamiento de las Estructuras de Concreto 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**



Search for "Highly sensitive" on the computer and find a link

# 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<sup>3</sup>, pero  
la cantidad de CO<sub>2</sub> y  
de Energía y de H<sub>2</sub>O  
disminuye con MPa**

**CO<sub>2</sub> / MPa**

*e-Tower*

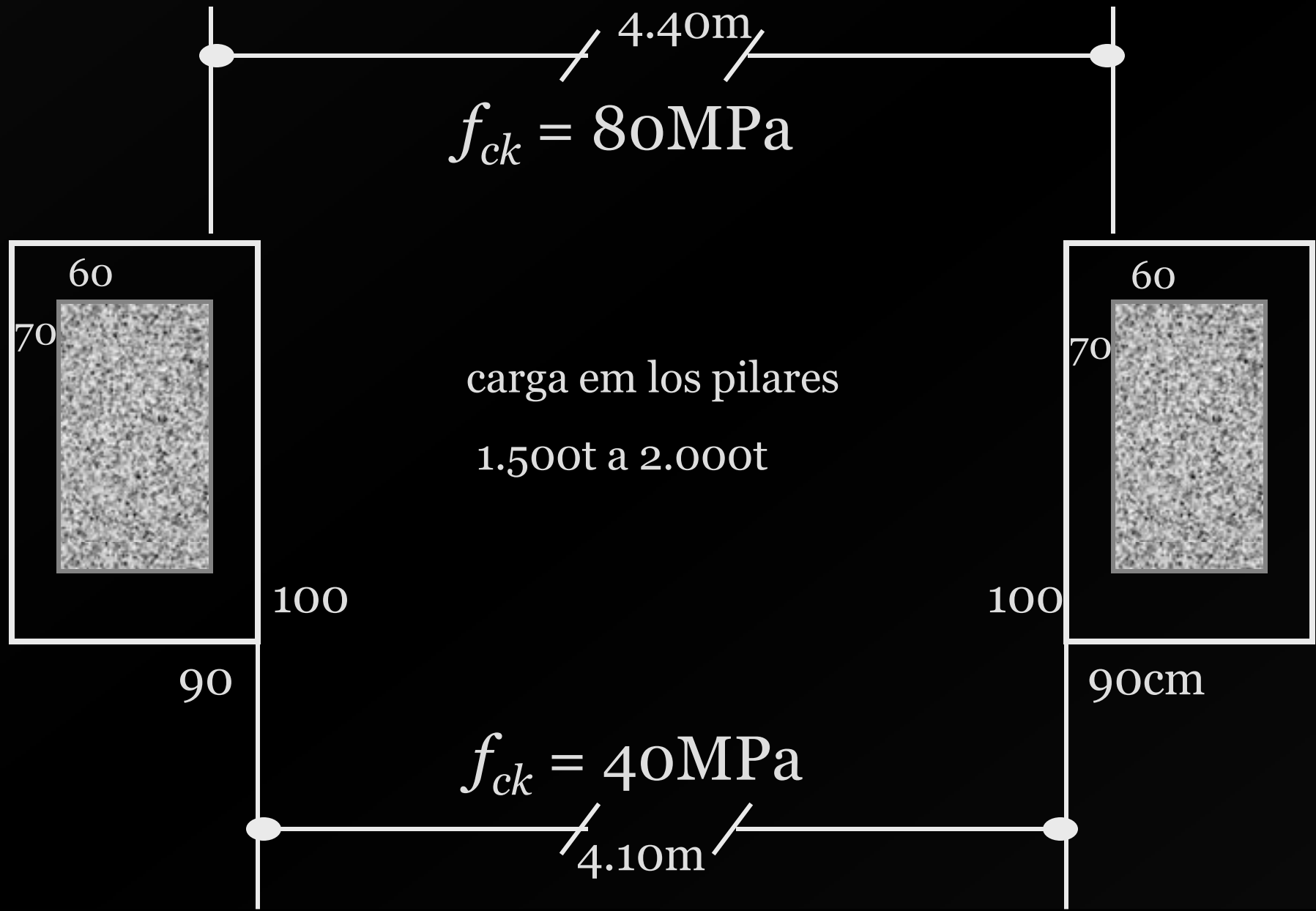




- ◆ Edifício e-Tower SP
- ◆ 42 pisos
- ◆ Heliponto
- ◆ Pileta semi-olímpica
- ◆ Academia de ginástica
- ◆ 2 restaurantes
- ◆ Concreto colorido
- ◆  $f_{ck}$  pilares = 80MPa



# 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**



**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**

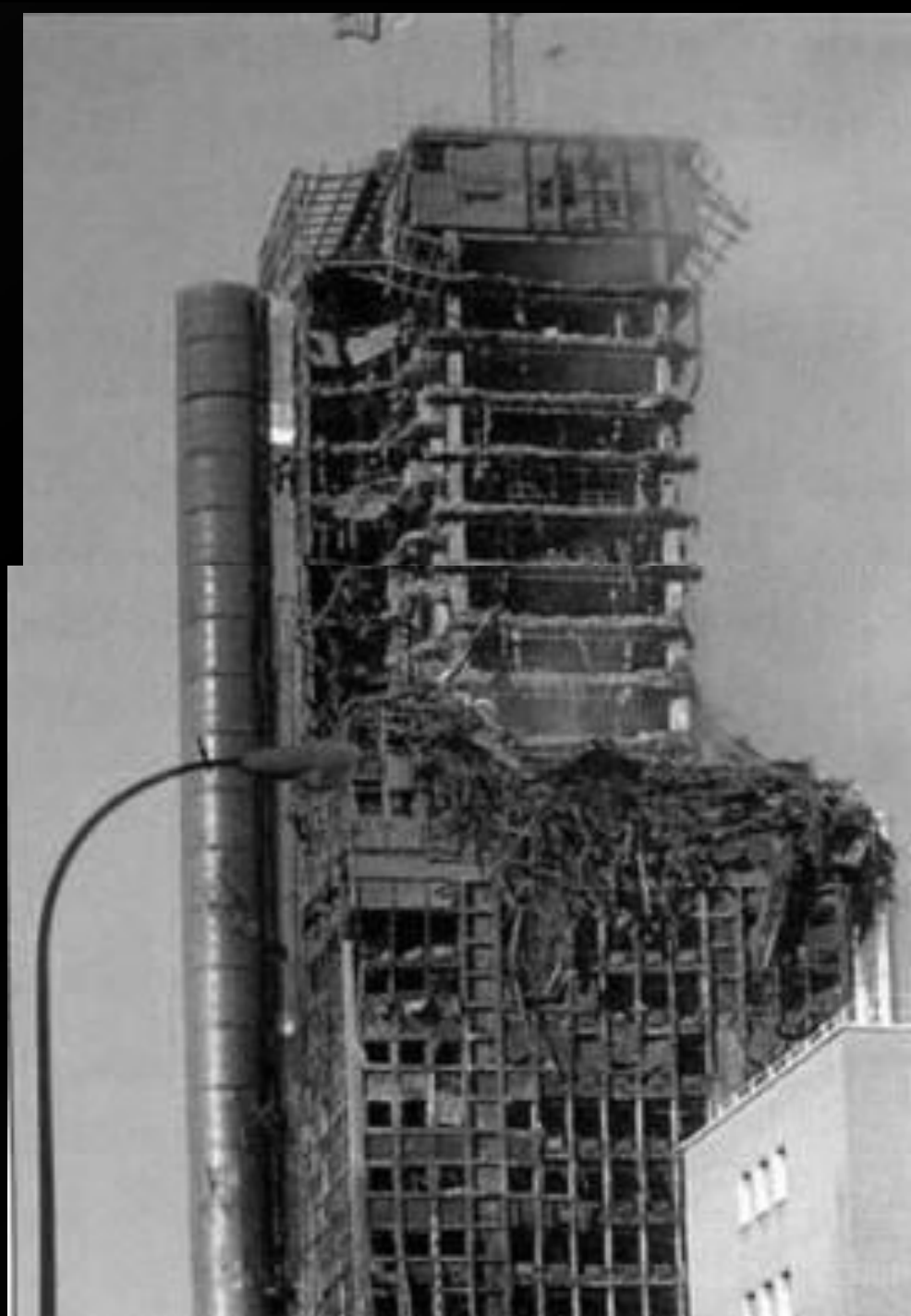
**Construcción: 1971**

**Incendio: 1 Febrero 1974**

***duración: 6h30min***  
***390min***

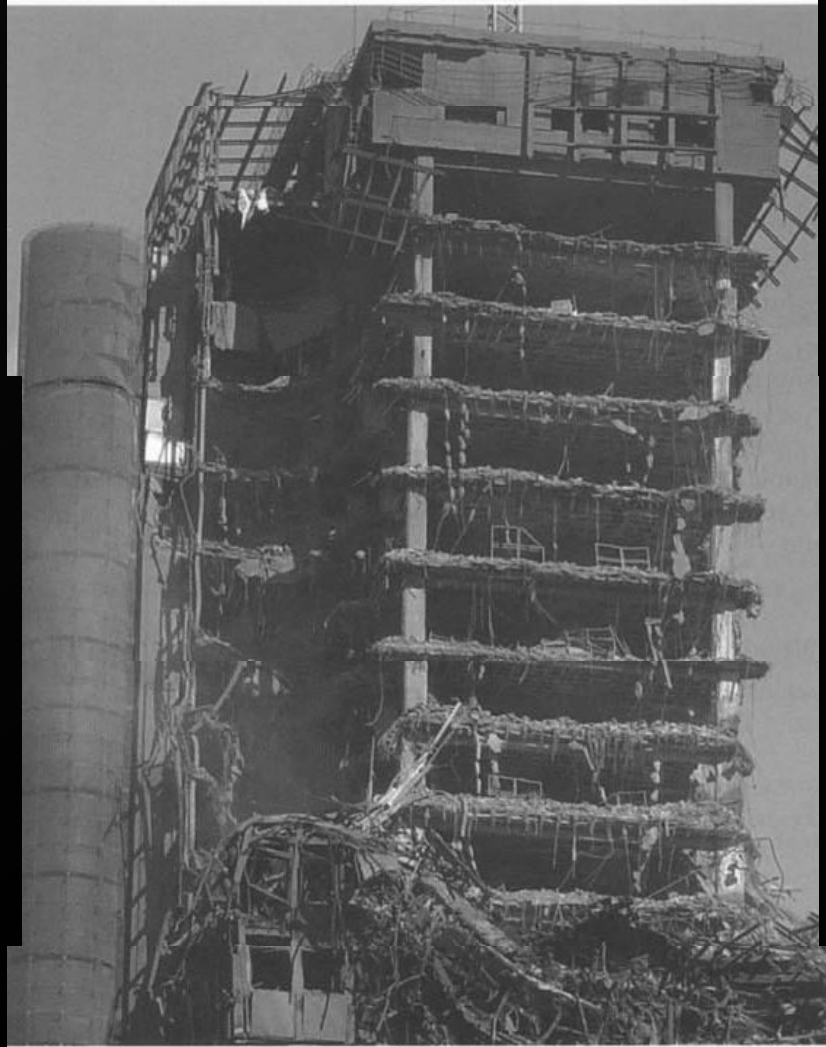
***Perfectas condiciones***  
***Nada ha colapsado***

**Edificio WINDSOR**  
**Madrid**  
**España**  
**2005**



# Edificio WINDSOR

## Estructura mixta acero-concreto



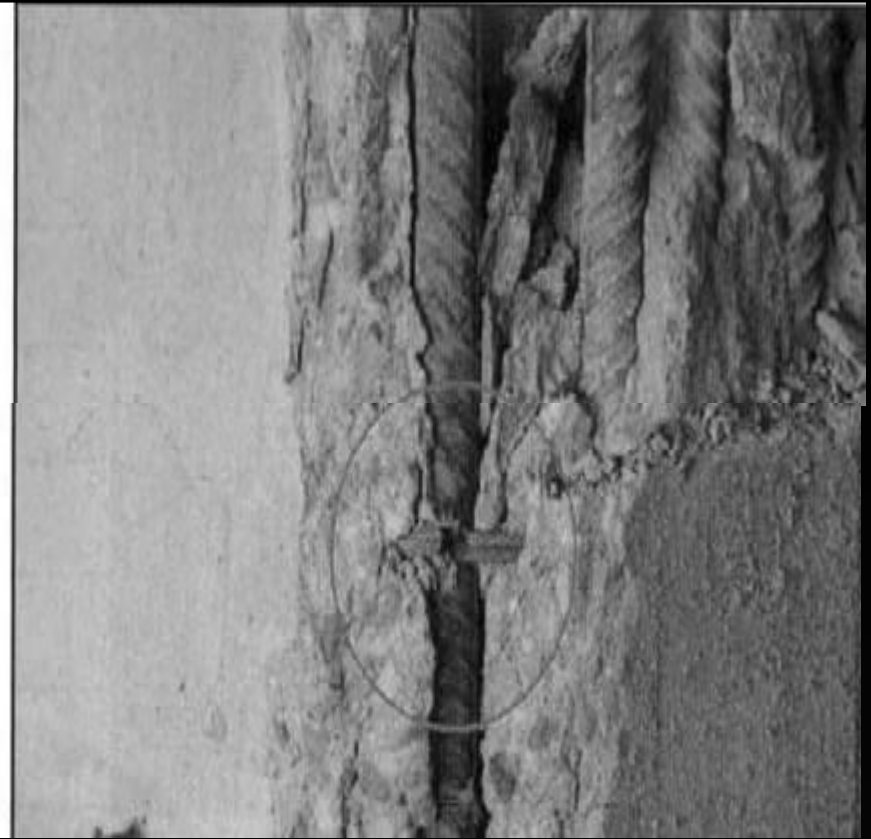
**37 pisos**  
**5 pisos de garage**  
**+ 31 pisos de oficinas**

**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**

# ***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

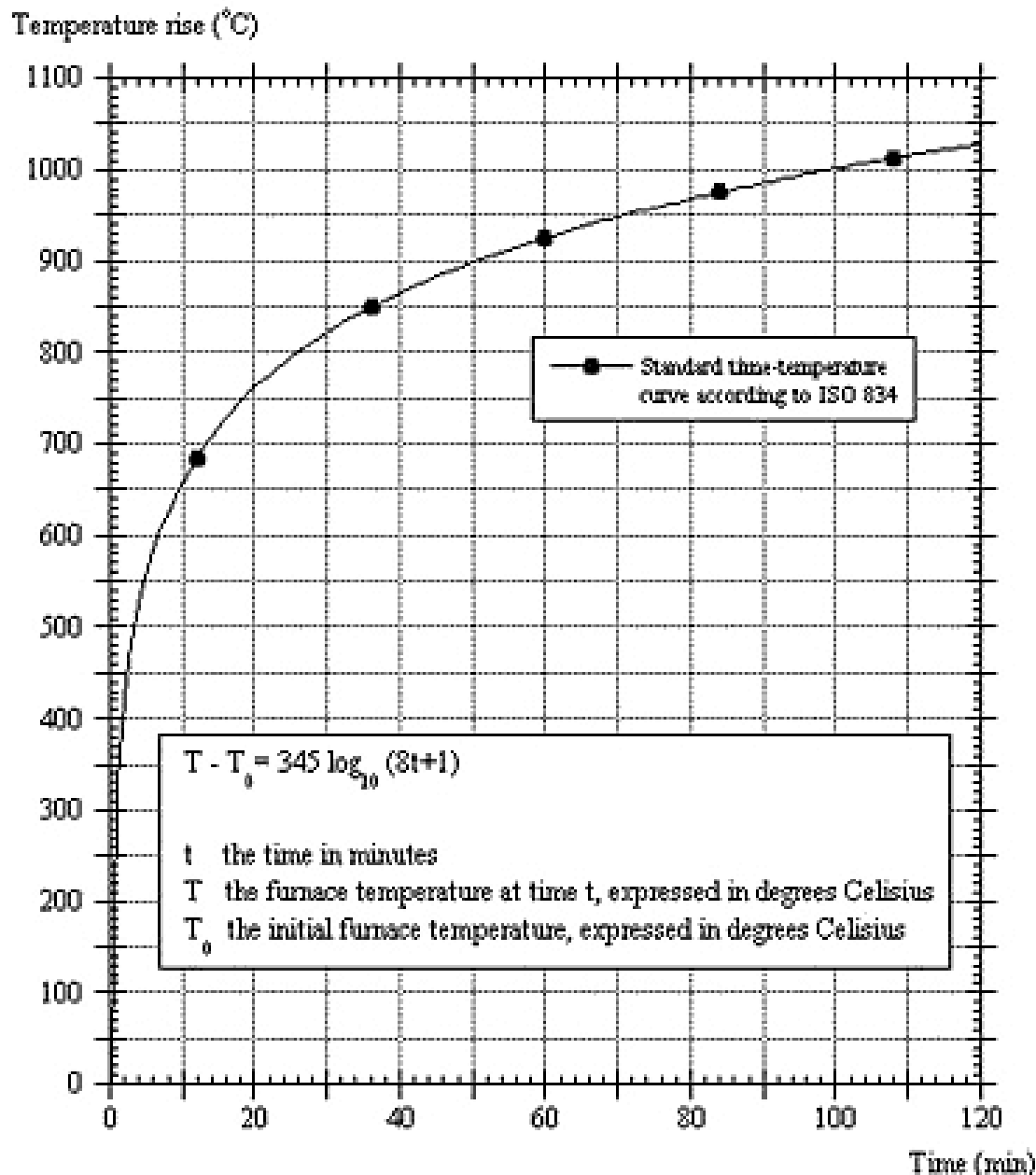
## Curve

### Standard Fire

### ASTM E 119

### ISO 834

The standard time-temperature curve



# **Concreto bajo Fuego**

*opciones de investigación*

**PROBETAS cilíndricas o 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***



# **Carino & Phan. NISTIR 6726. National Institute of Standards and Technology**

*HSC water-cement ratio 0.22 to 0.57, 51 to 93 MPa*

1. High-strength mixtures made with very low w/cm (0.22) showed less strength loss than with 0.33 w/cm.
2. Explosive spalling was observed when the temperature of the specimen center was in the range of 200 °C and 325 °C.

*HSC water-cement ratio 0.22 to 0.57, 51 to 93 MPa*

3. Preload seems to have a mitigating effect on the development of explosive spalling.
4. For concrete samples casted with 0.22 w/cm, tested under restrained conditions, explosive spalling never occurred. Only occurred with some samples casted with 0.33 w/cm.

# estructuras metalicas

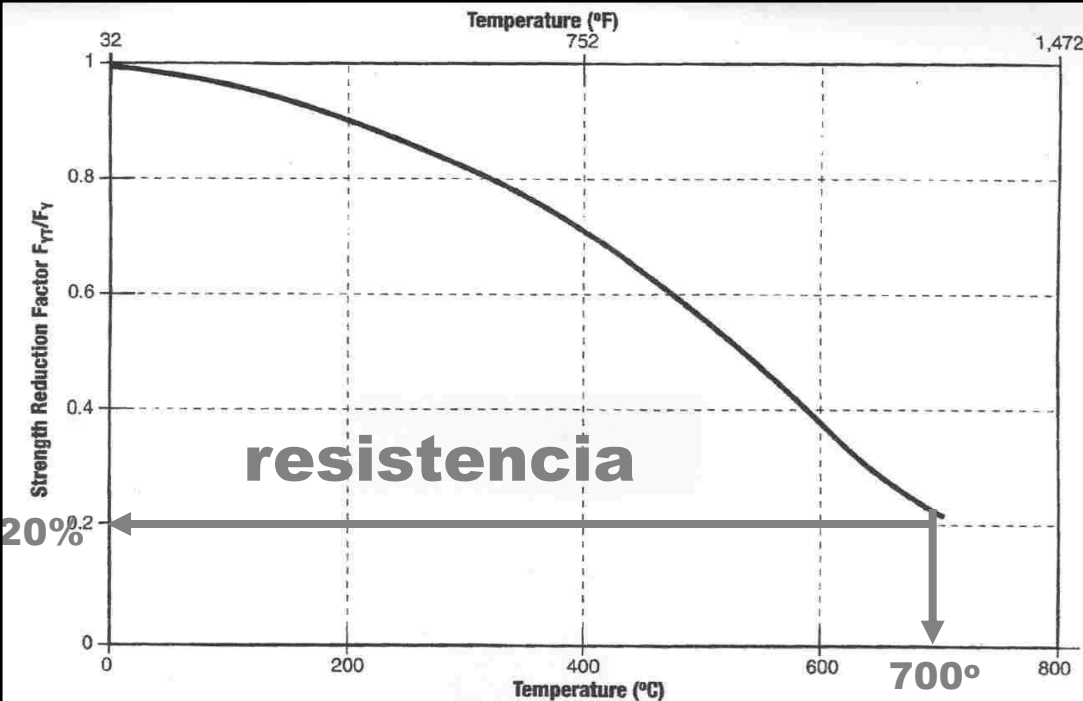


Figure A-6 Strength of steel at elevated temperatures (Lie 1992).

# estructuras de concreto

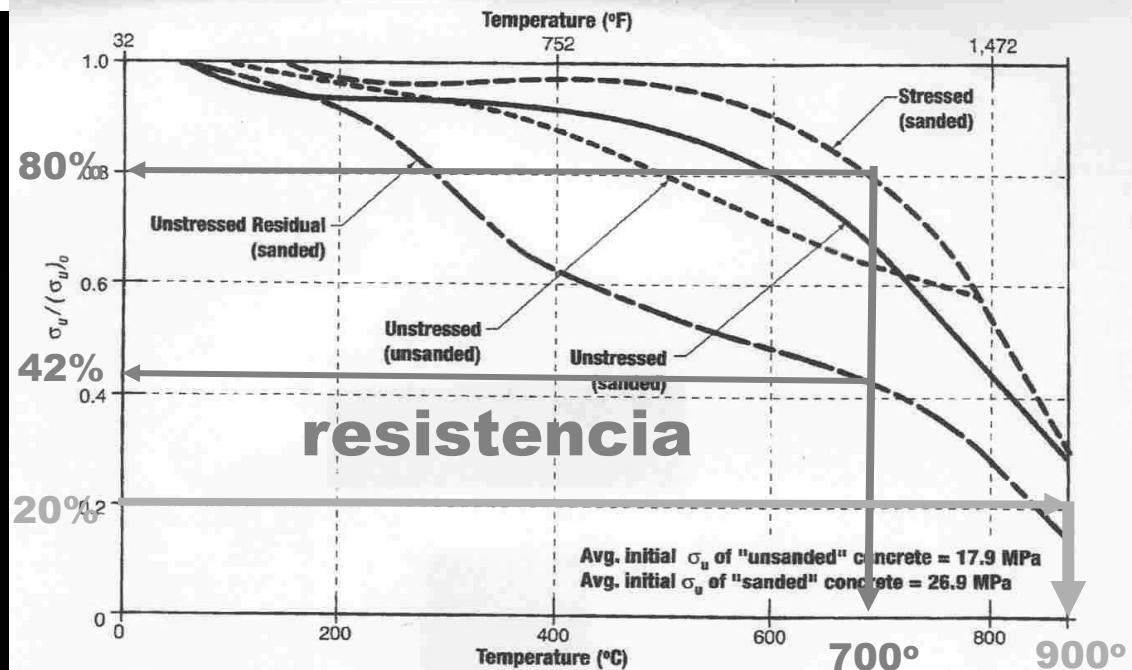


Figure A-12 Reduction of the compressive strength of two lightweight concretes (one with natural sand) at elevated temperatures (Kodur and Harmathy 2002).

# estructuras metálicas

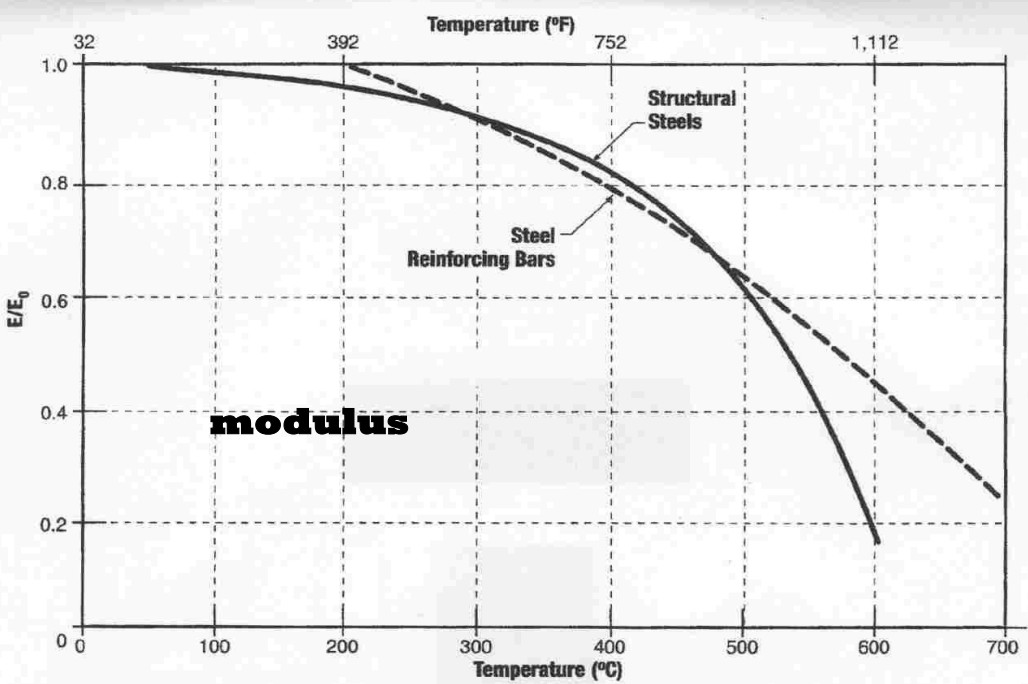
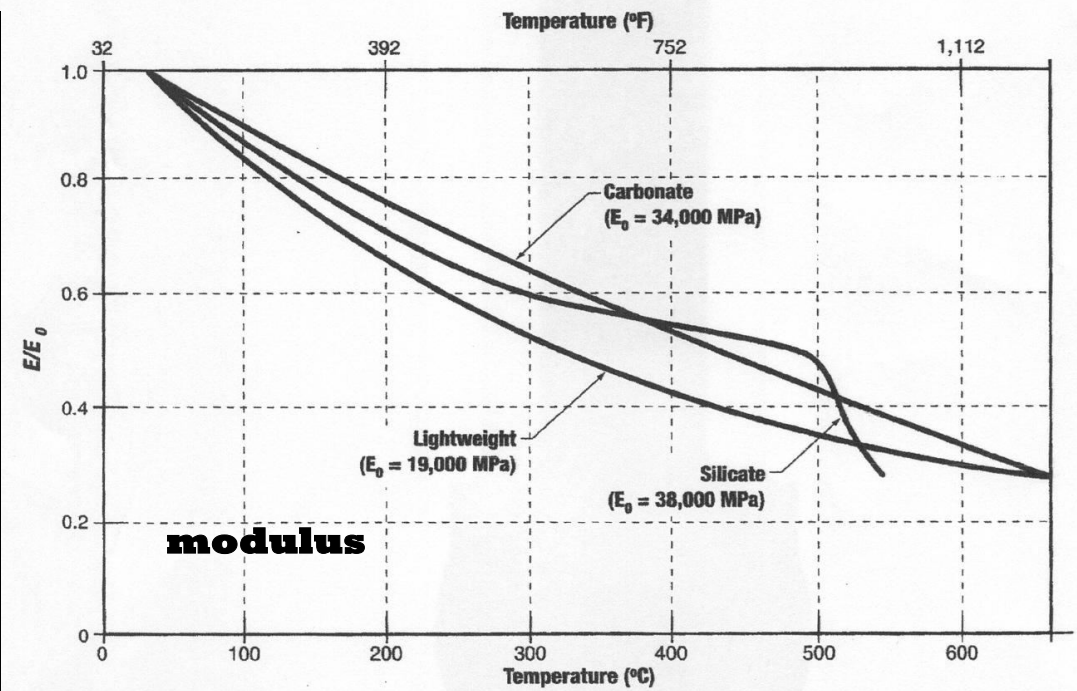


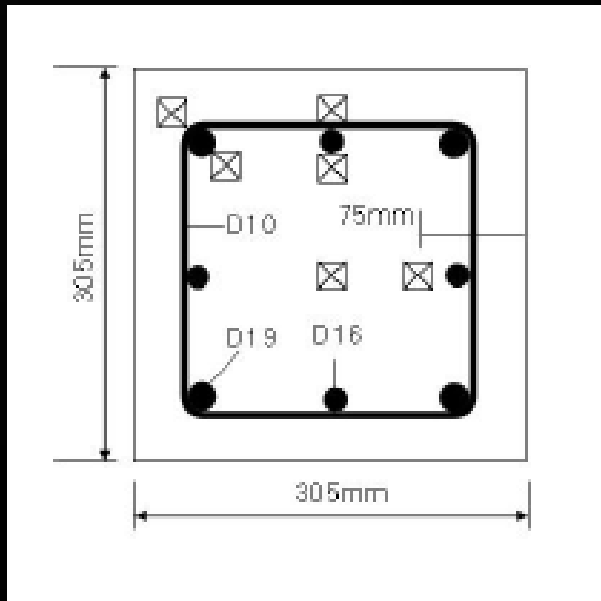
Figure A-7 Modulus of elasticity at elevated temperatures for structural steels and steel reinforcing bars (SFPE 2000).

# estructuras de concreto

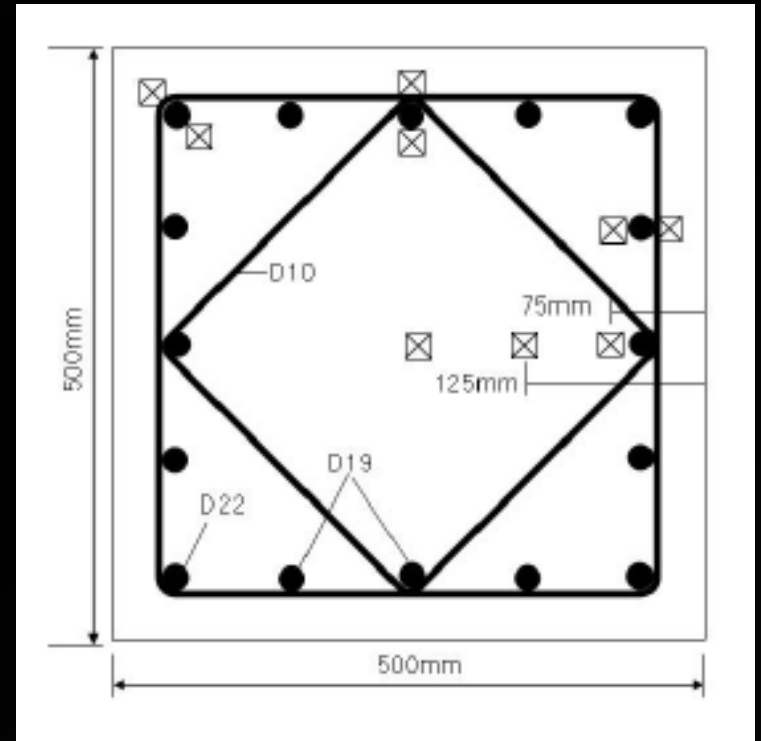


**modulus**

# influencia de la sección transversal



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



50cm x 50cm x 3,4m

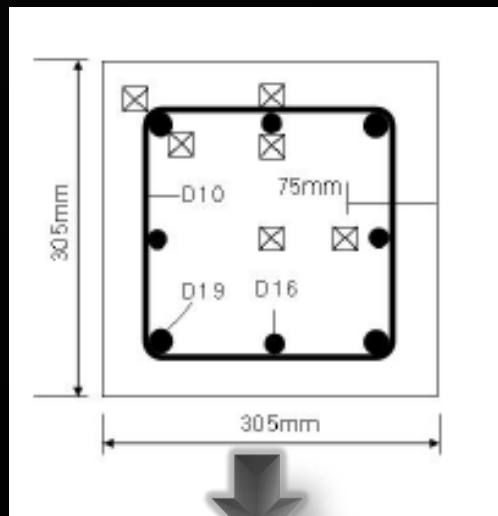
**120MPa**  
**HSRC**

*Park et al, 2007*

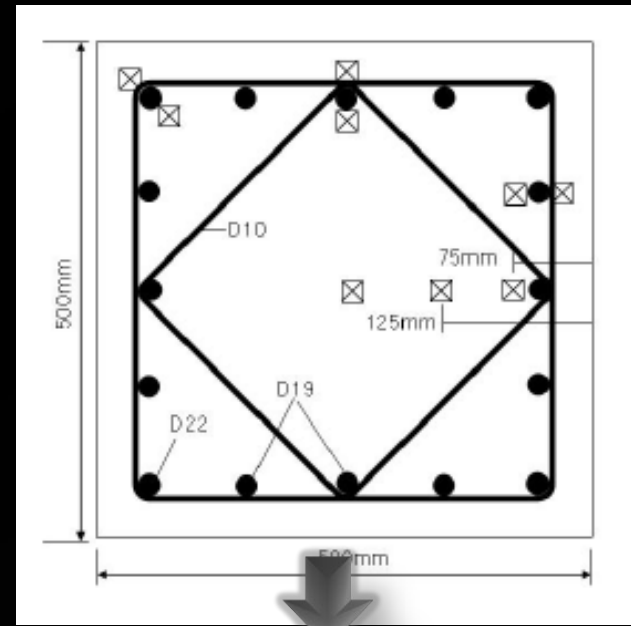
# influencia de la sección transversal

50cm x 50cm x 3,4m

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

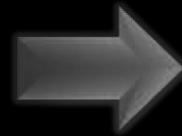
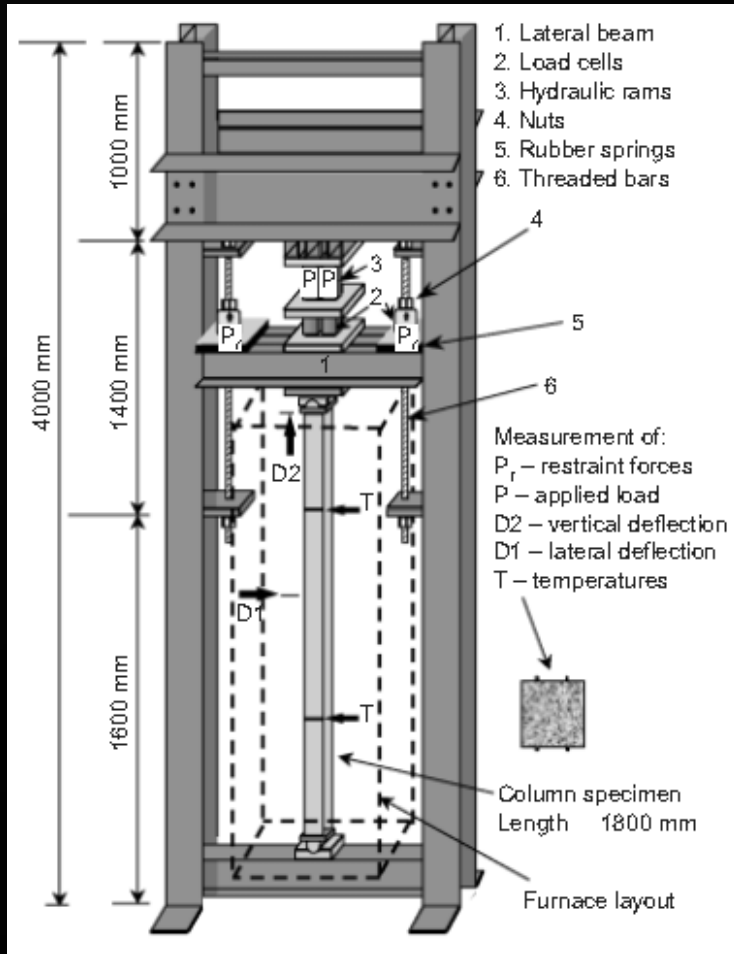


- ✓ *spalling*: 13mm
- ✓ fire → 176min.
- ✓ collapsed



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

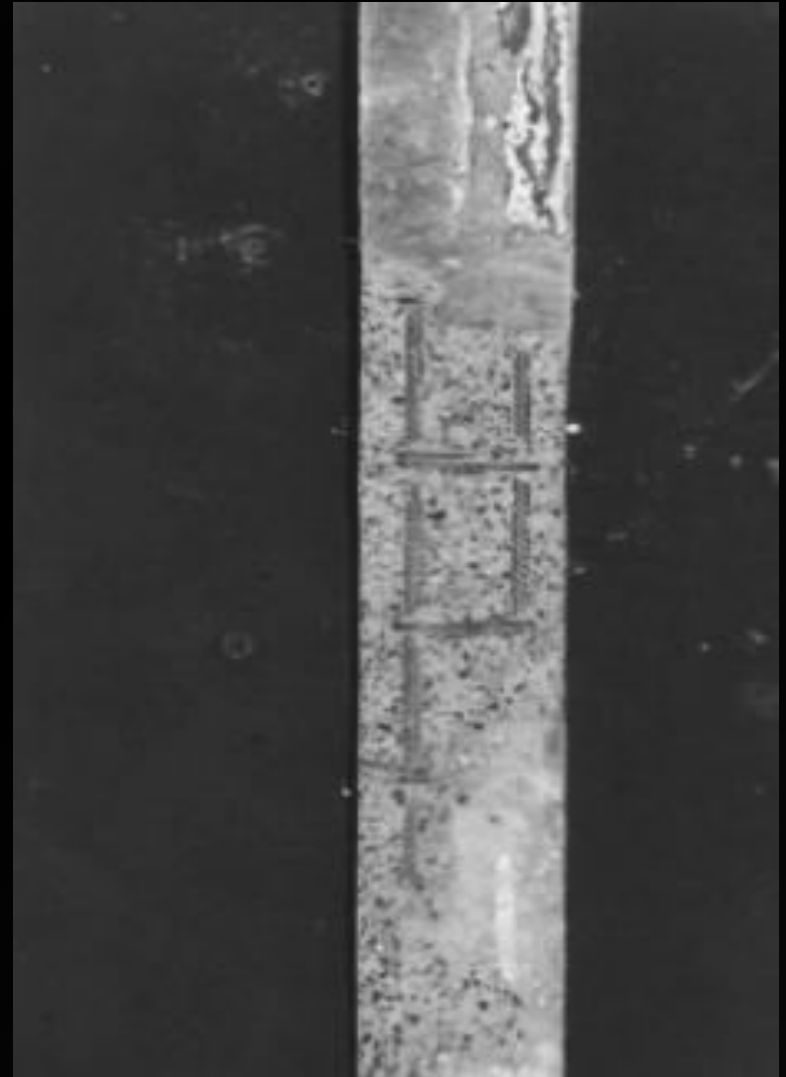
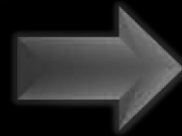
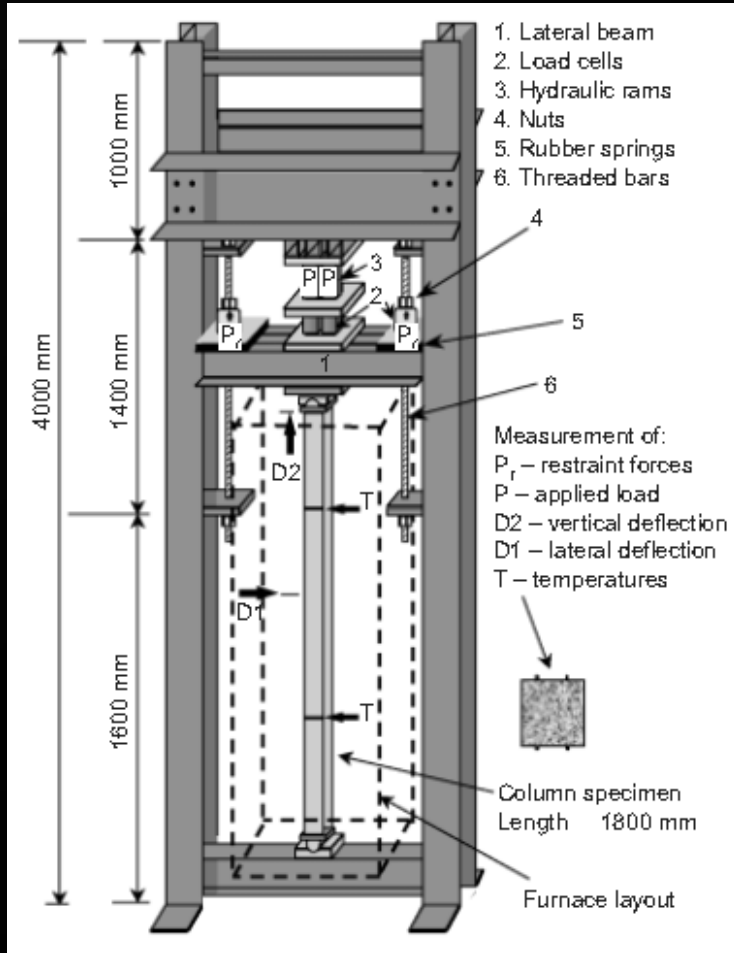
# pilar !!??



cross section 12,5cm x 12,5cm

# pilar !!??

> 40cm

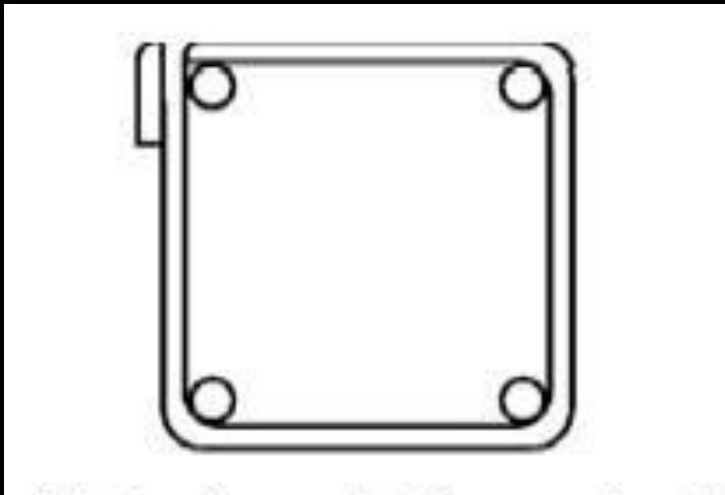


cross section 12,5cm x 12,5cm

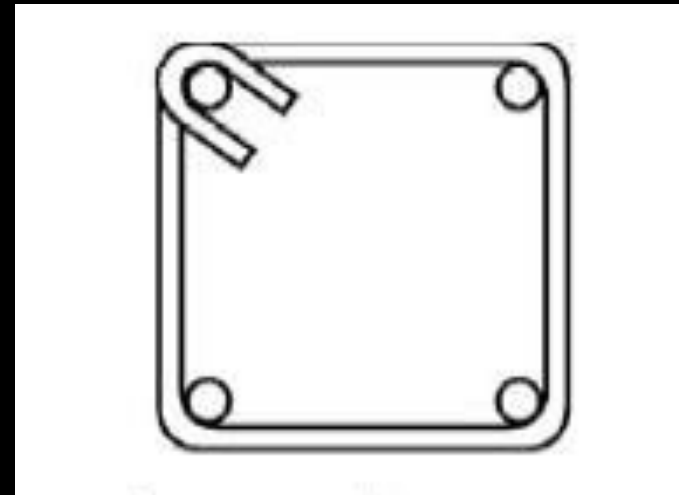


# detalles de armadura

## *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<br>(43MPa) |                            | Concreto de alta<br>resistência (106MPa) |                            |
|------------|---------|----------------------|----------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| Referência | Amostra | Grau de<br>restrição | Tipo de<br><i>spalling</i> | Grau de<br><i>spalling</i> | Tipo de<br><i>spalling</i>               | Grau de<br><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%                         |

# estructura de concreto

## The Cardington Fire Test

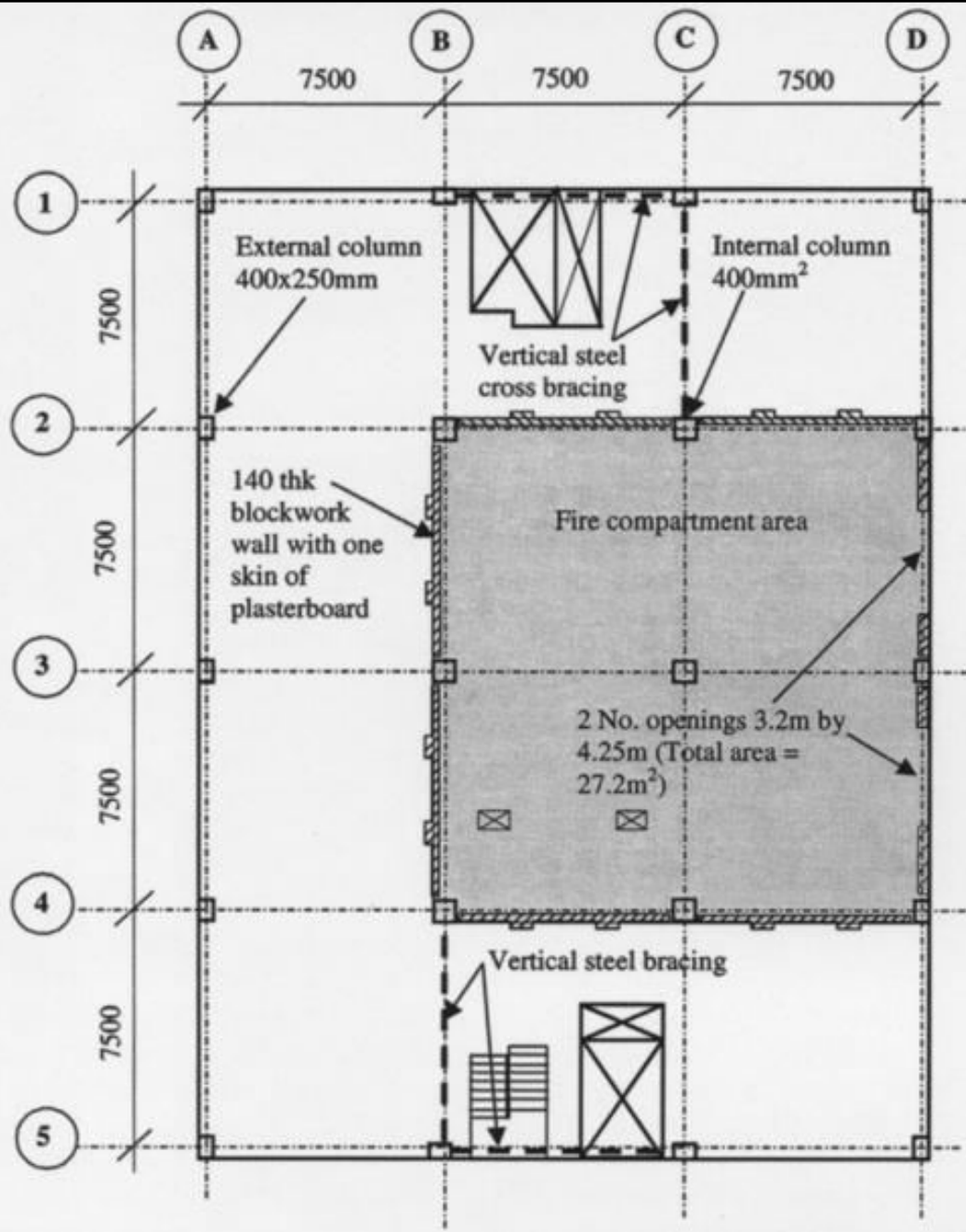
By Pal Chana and Bill Price, British Cement Association

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%

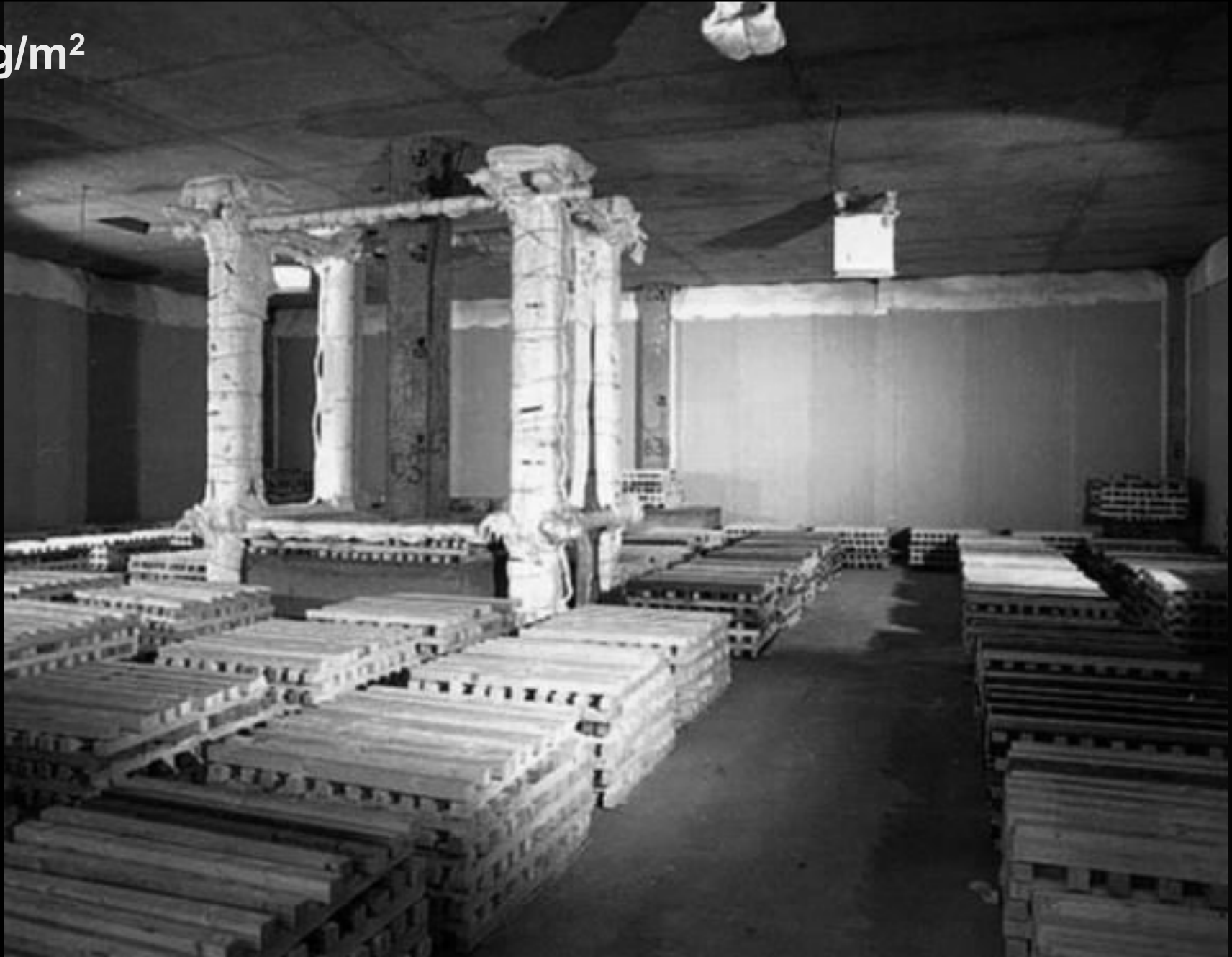


Cardington Concrete Building Frame



planta del edificio con sala de fuego

40kg/m<sup>2</sup>



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**  
**Universidade 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**



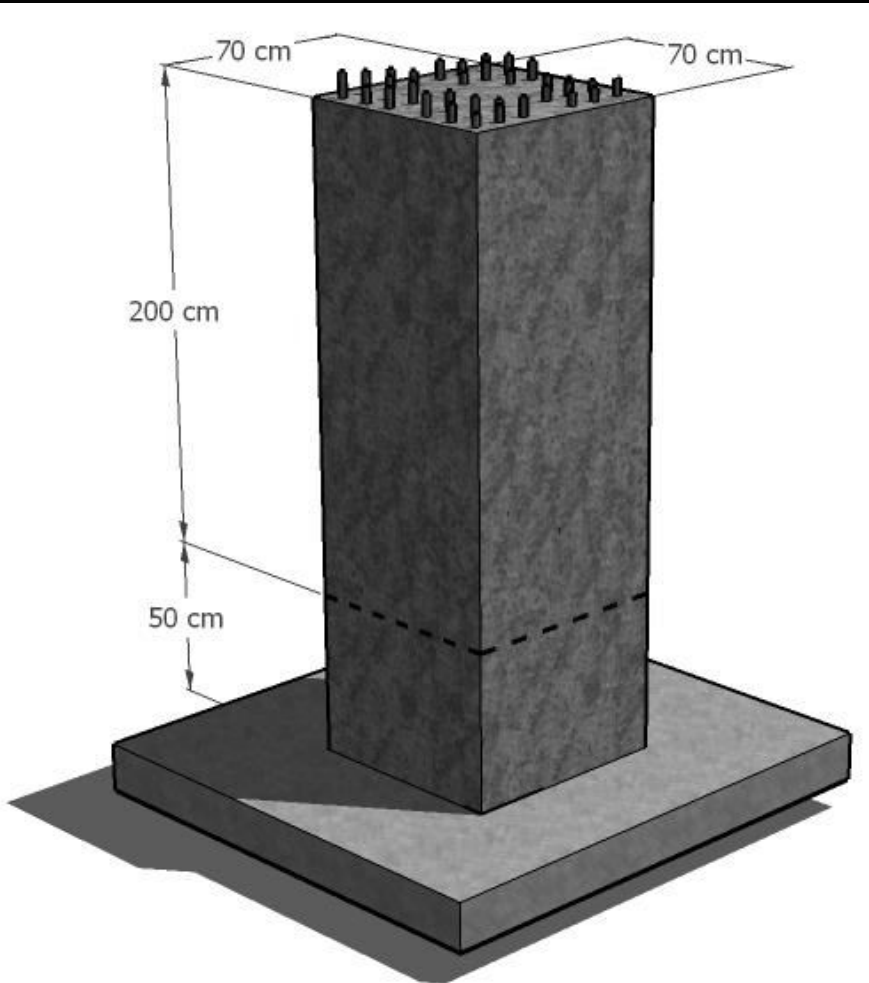
# “HPCC in Brazilian Office Tower”

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

HELENE, Paulo &  
HARTMANN, Carine



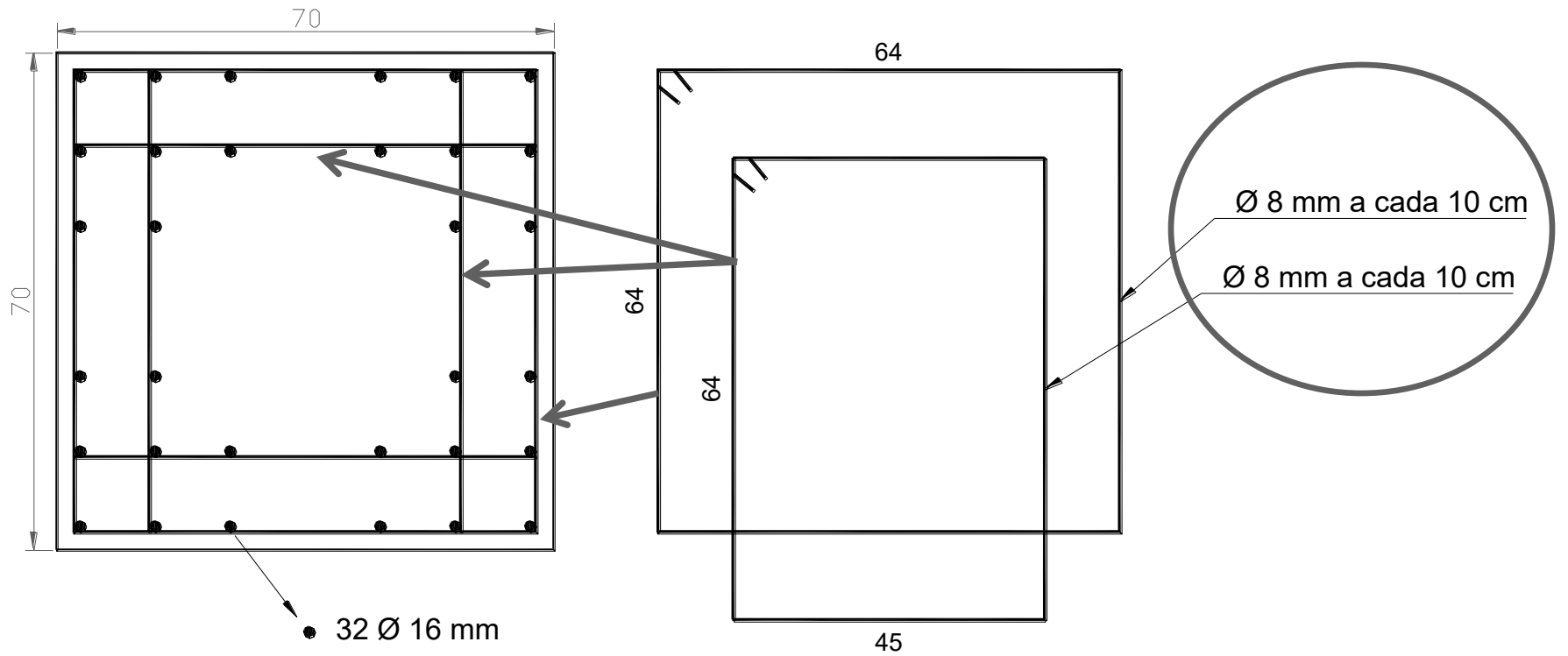
# Pilar Ensayado



- ✓ **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**

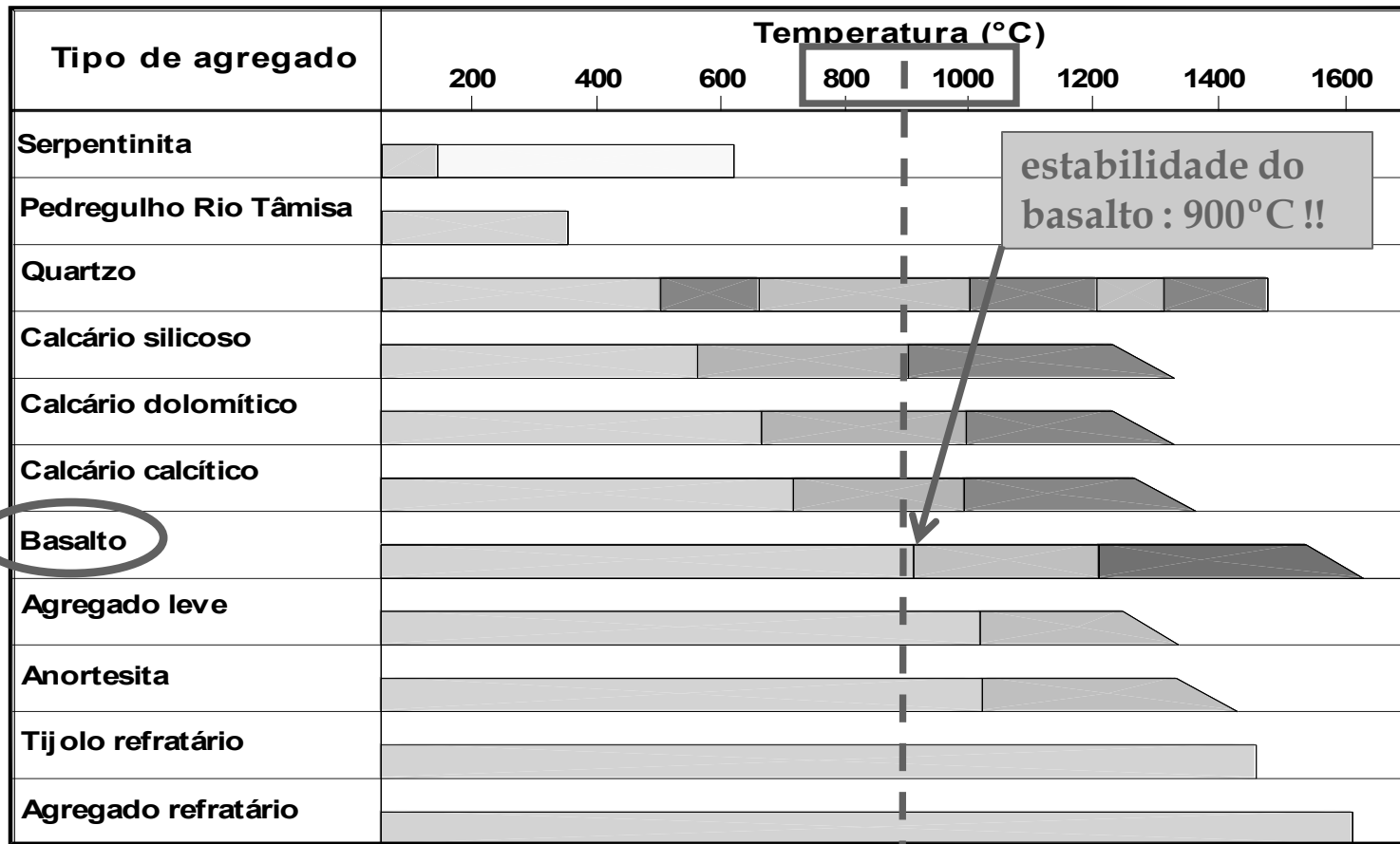
pilar similar a los reales  
mantenido en ambiente  
externo



# **originalidad de la investigación**

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

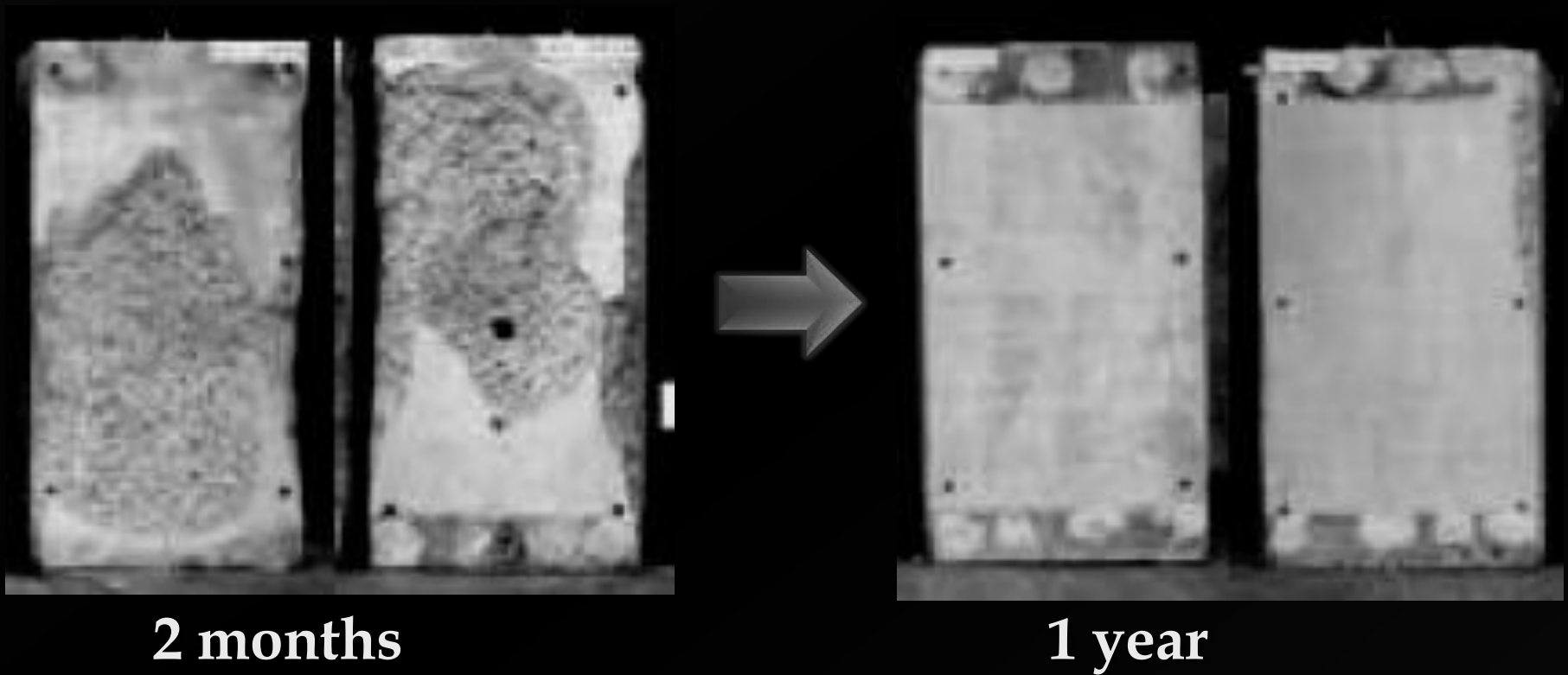
# Áridos (*fib* bulletin 38, 2007)



estabilidade do basalto : 900°C !!



# influencia de la edad ...



*Morita et al, 2002*

# concreto colorido



# pilar → corte y transporte



hilo de diamante



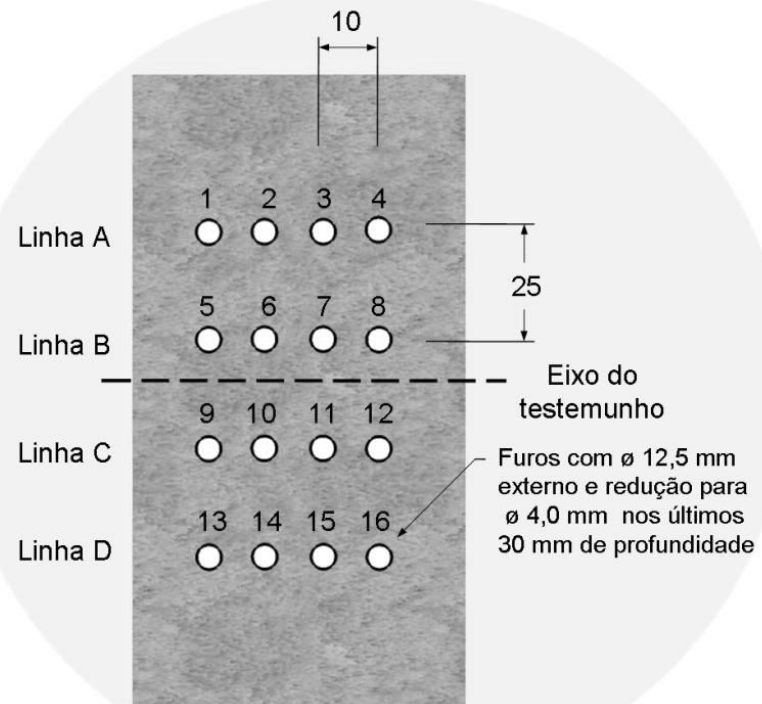
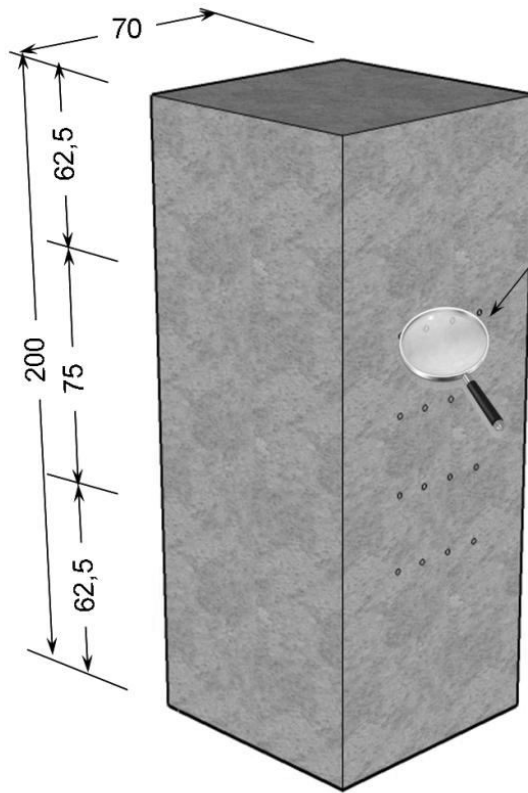


# testigos extraídos

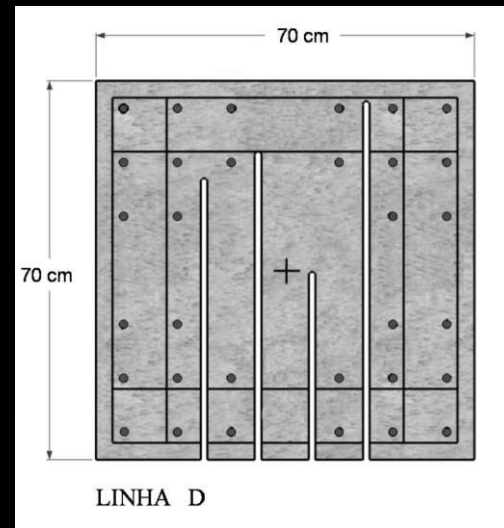
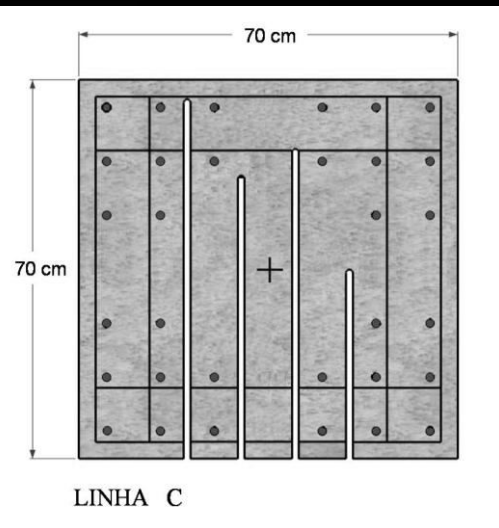
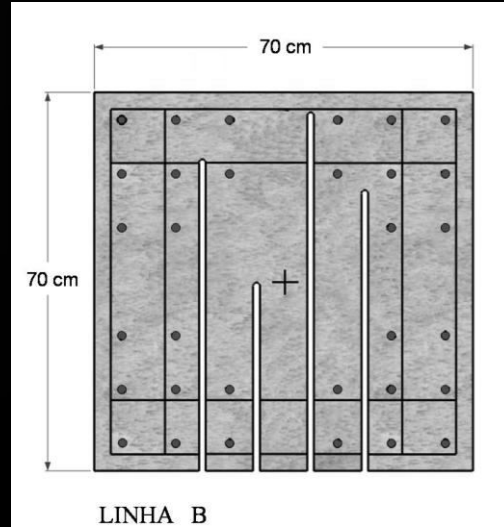
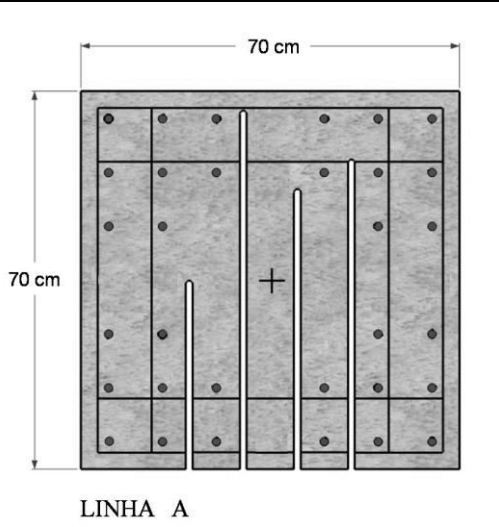


140 MPa

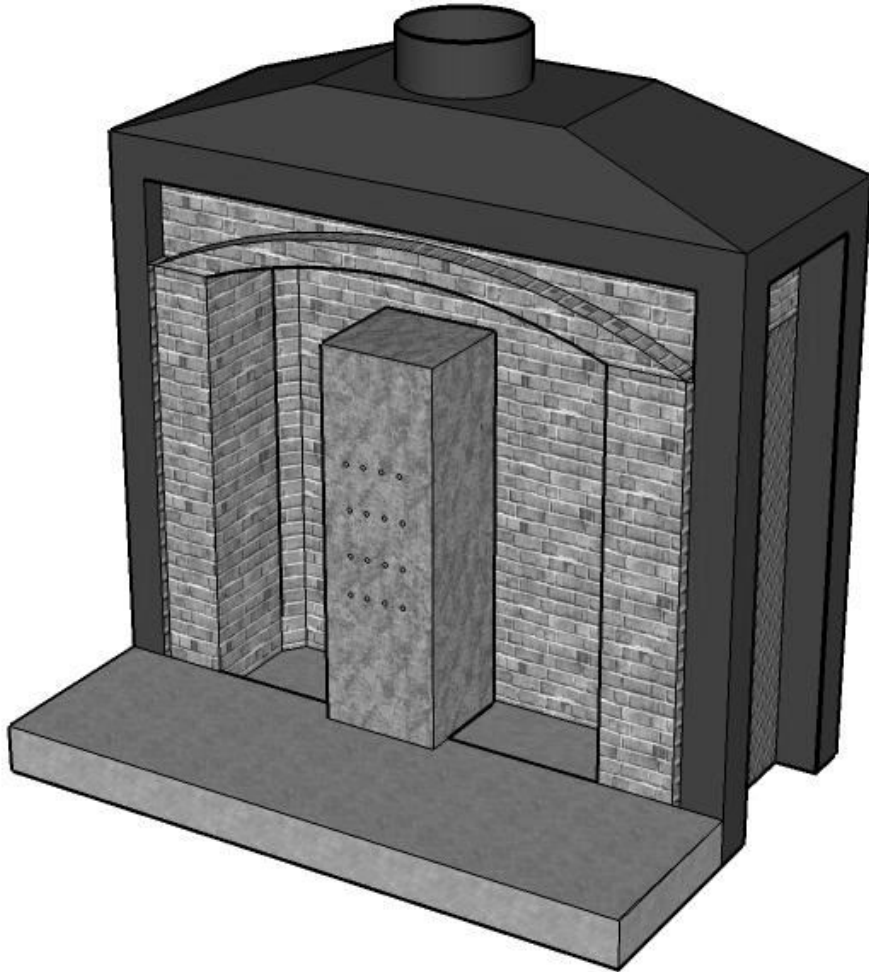
# 16 termopares



# Inserindo termopares



# Laboratório (horno)



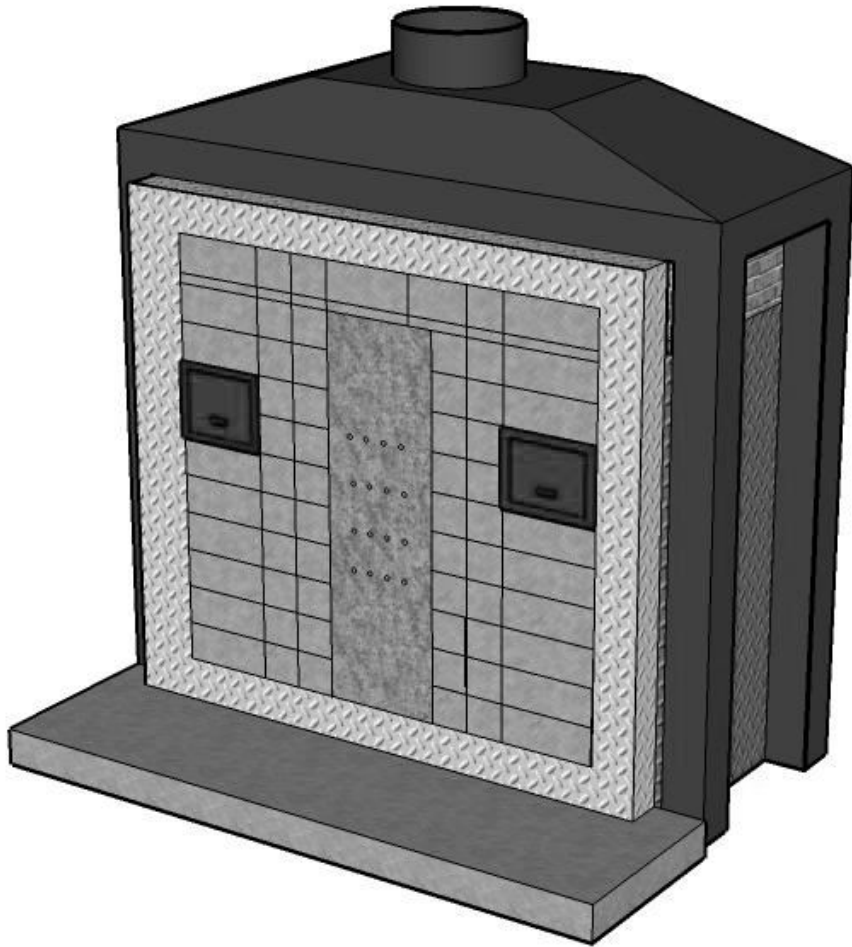
- ✓ **sin carga**
- ✓ **3 lados (faces)**
- ✓ **ISO 834**
- ✓ **180 min**

# protección con fibras ceramicas

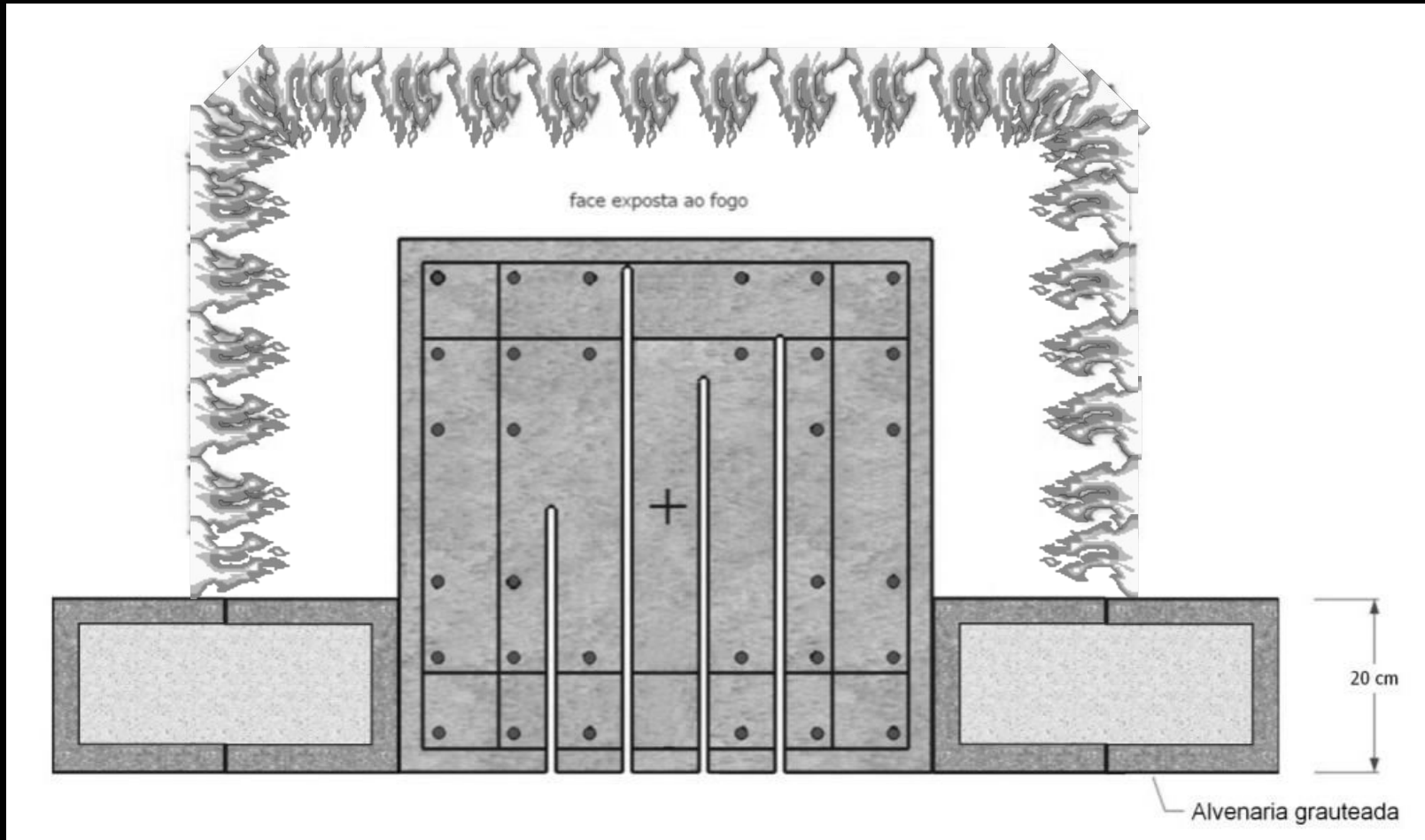


# Laboratório

## horno de alta temperatura

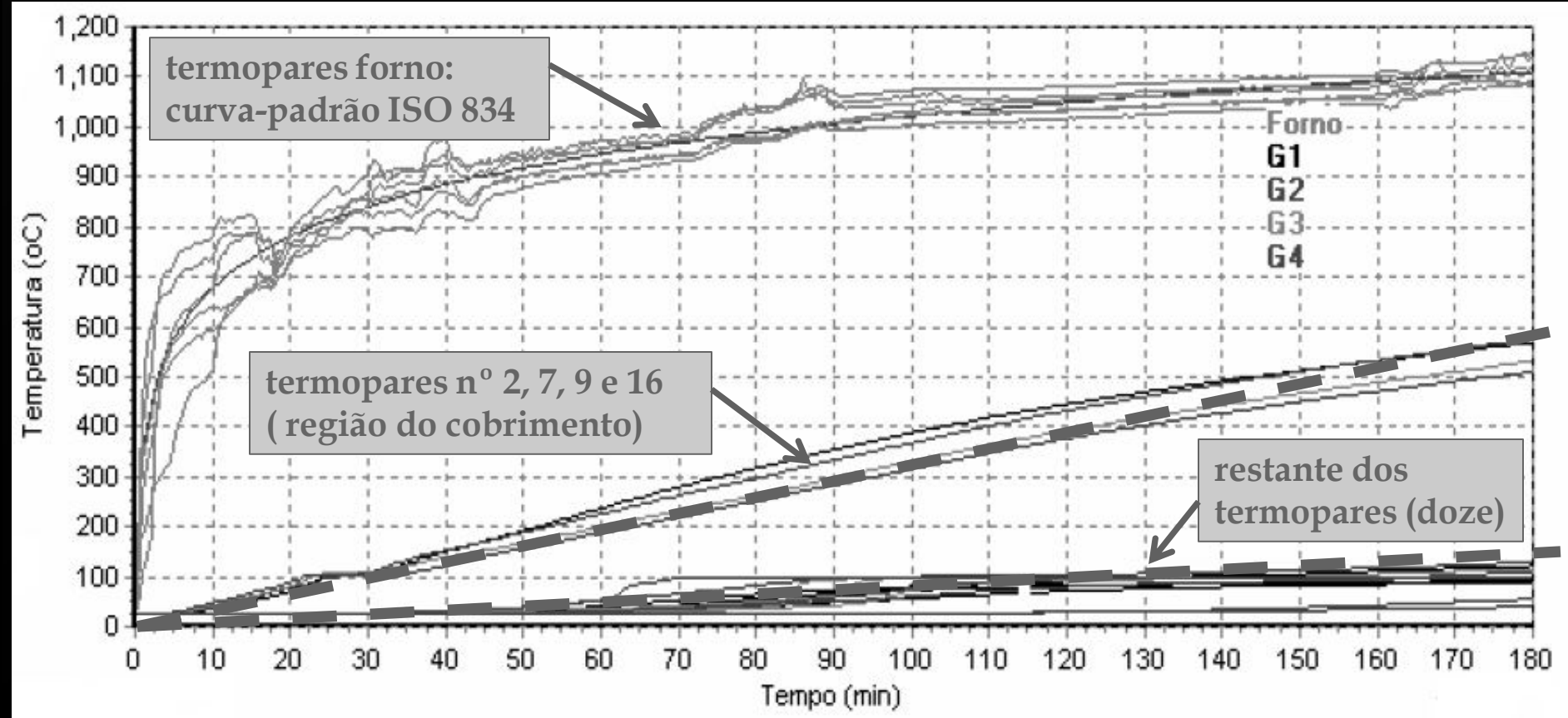


# condiciones de ensayo (3 lados)



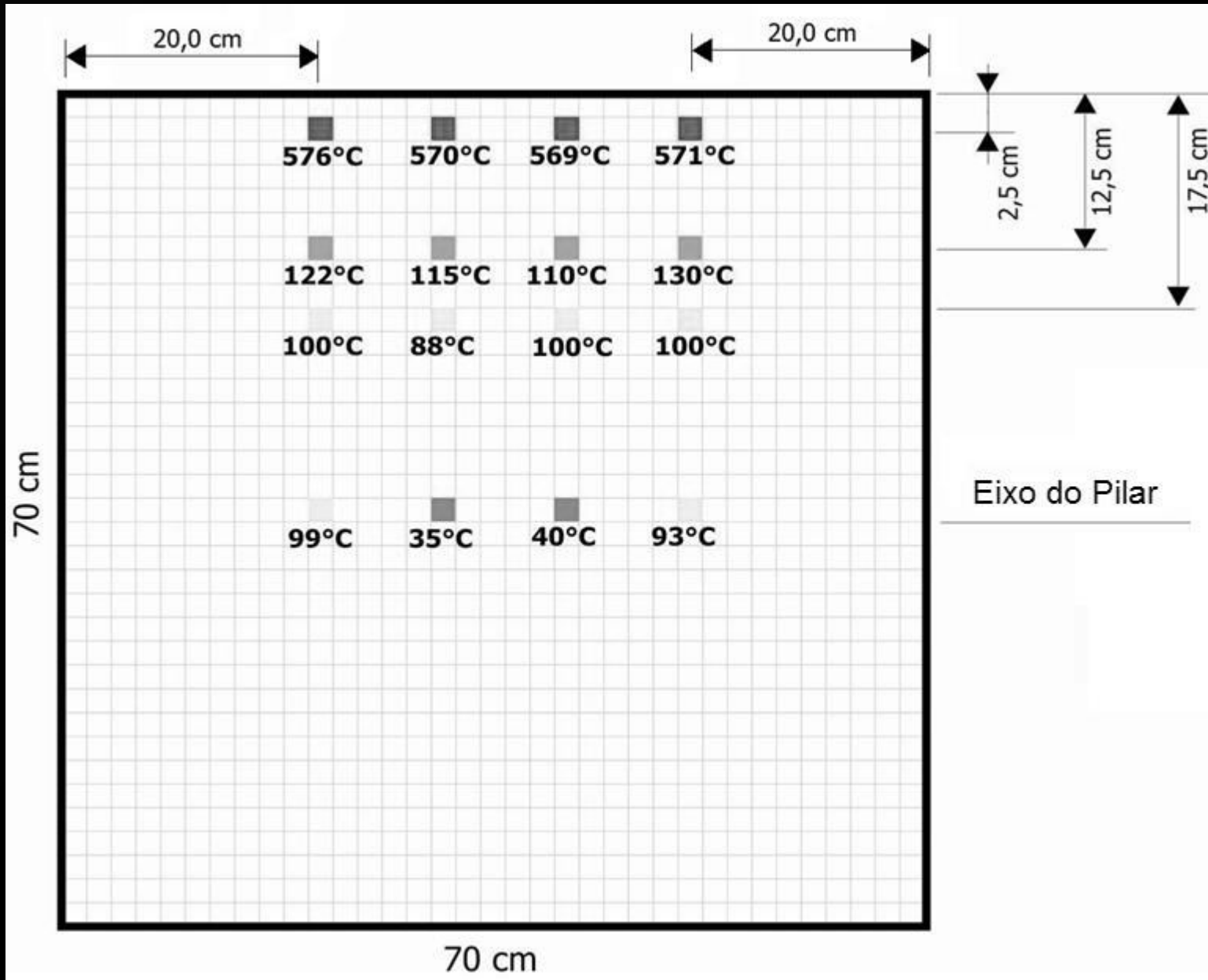
*ISO 834 standard fire*

# evolução 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

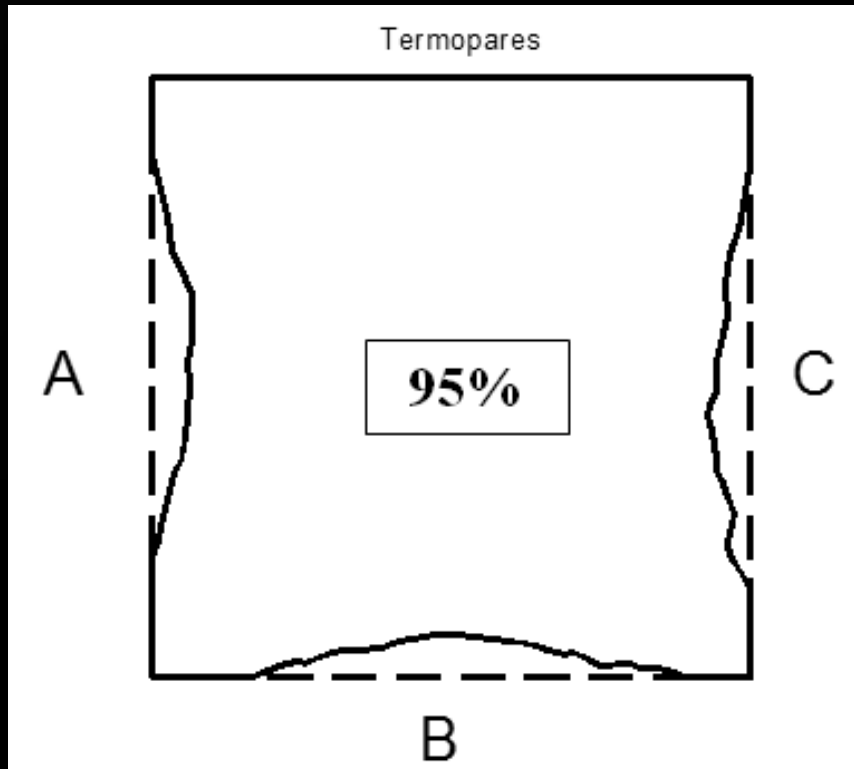


área de acero  
expuesta  
< 5%

# Integridad



# Integridad



*spalling* medidos en 450 puntos (150 cada lado)





“pigmento como termometro natural”



# “termometro natural”



- ✓ pigmento rojo
- ✓ profundidad  $\approx 55\text{mm}$
- ✓  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  to  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- ✓ hematita a magnetita



cerca de  $600^\circ\text{C}$

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

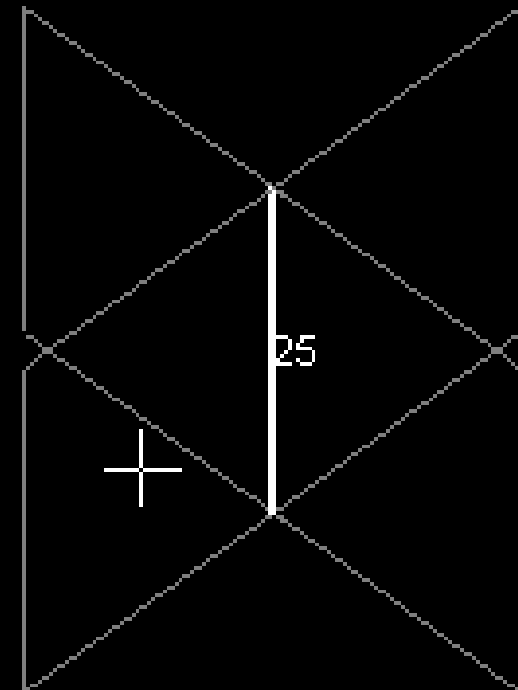
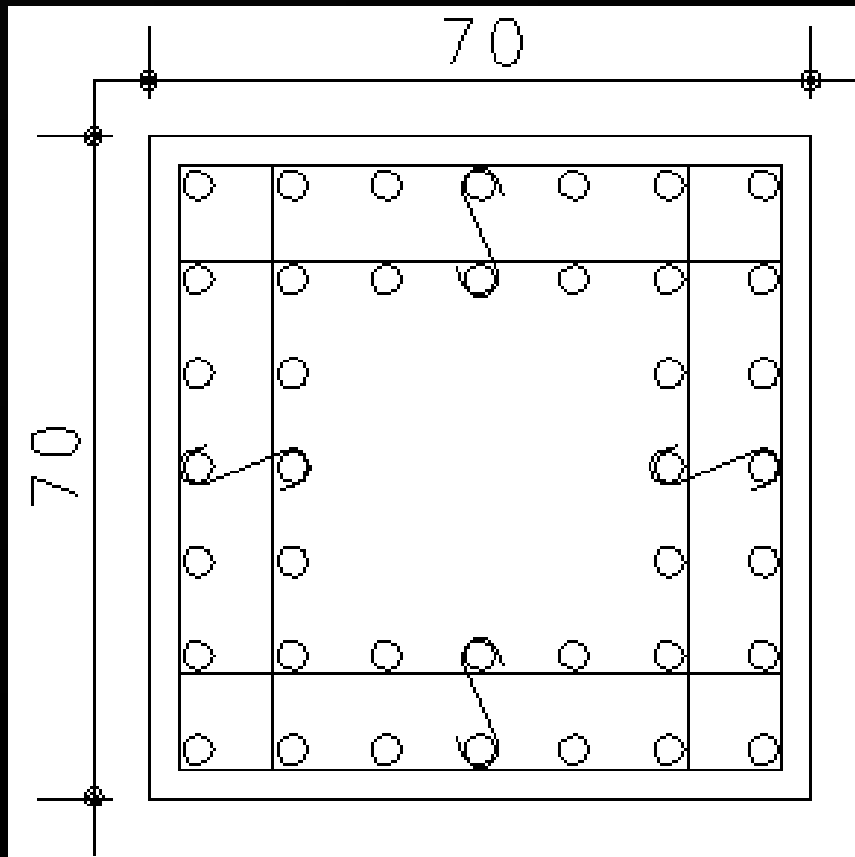
# Condición Inicial

cross section = 70x70cm

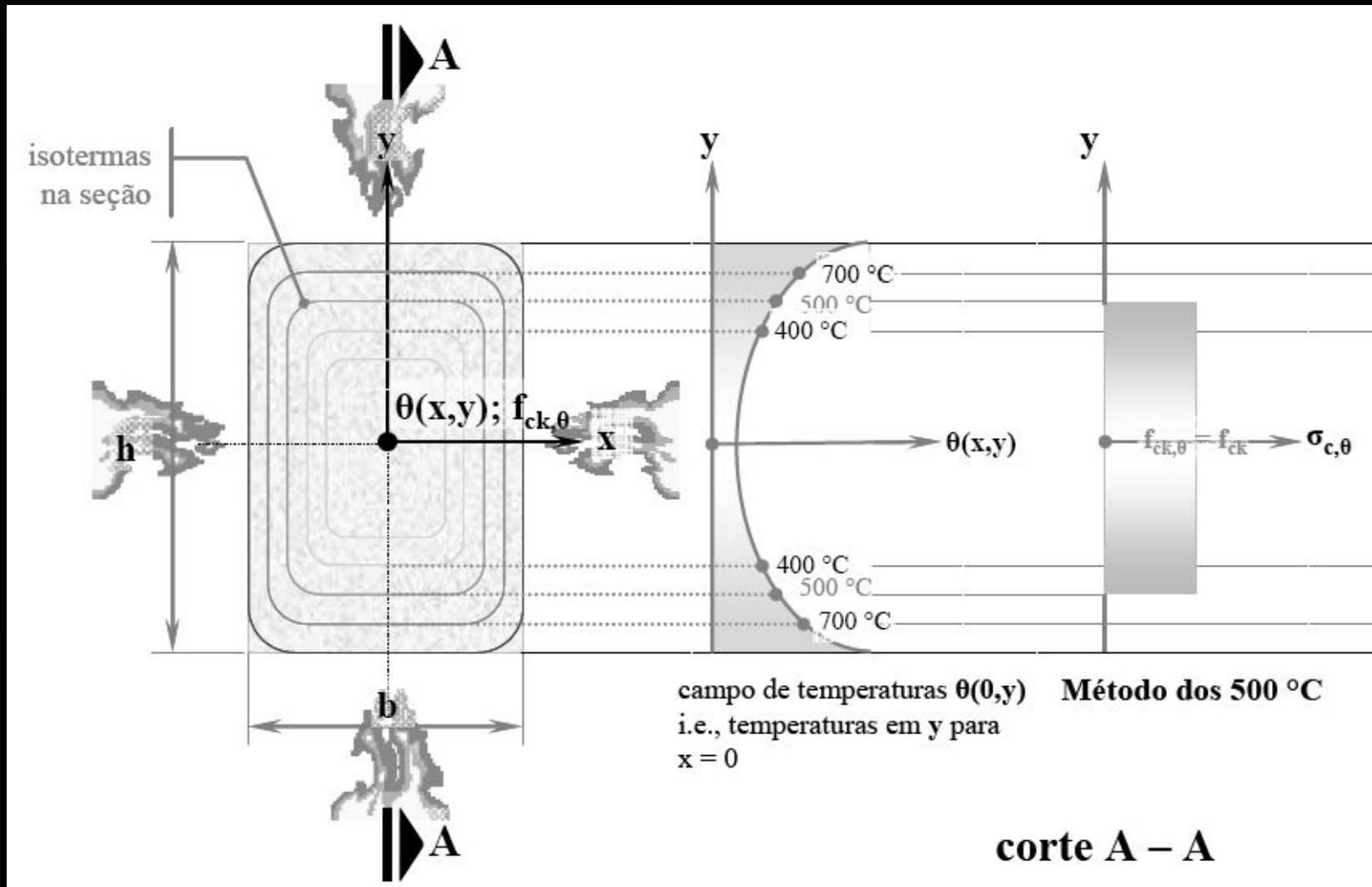
$A_c = 4578,32\text{cm}^2$

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

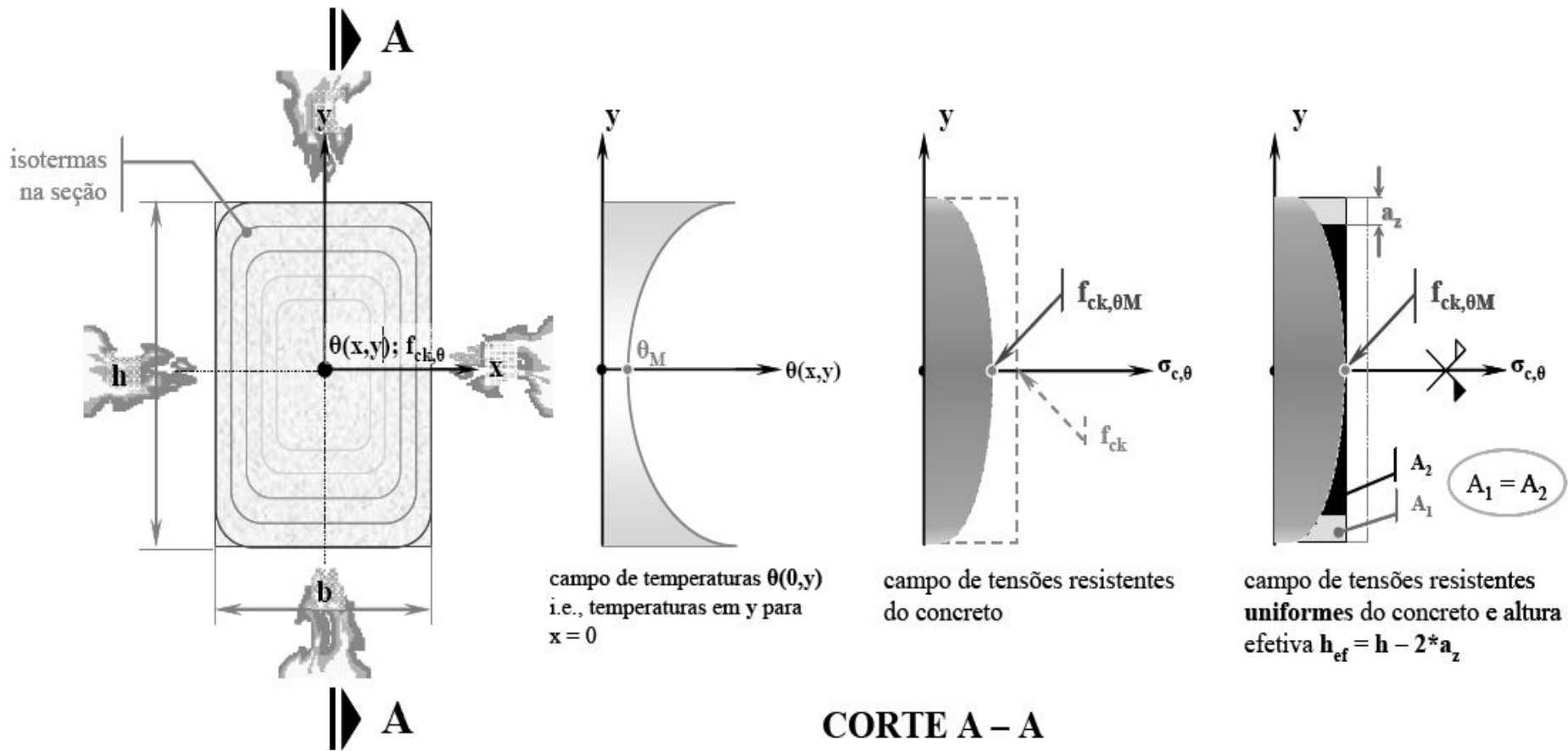
$\rho = 7,03\%$



# 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  $Mx = My = 0$***

**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**



*Art Museum  
Rio de Janeiro  
Brazil*

*Concrete Structure  
Oscar Niemeyer  
Bruno Contarini*

**Muchas Gracias!**

