

Colapso de las Torres del World Trade Center en New York y Por Qué Construir con Hormigón

Ing. Paulo Helene

*MSc, PhD, Prof. Catedrático de la Universidad de São Paulo
Coordinador Internacional de la Red REHABILITAR CYTED
Miembro de ALCONPAT Brasil
Presidente del IBRACON*

1

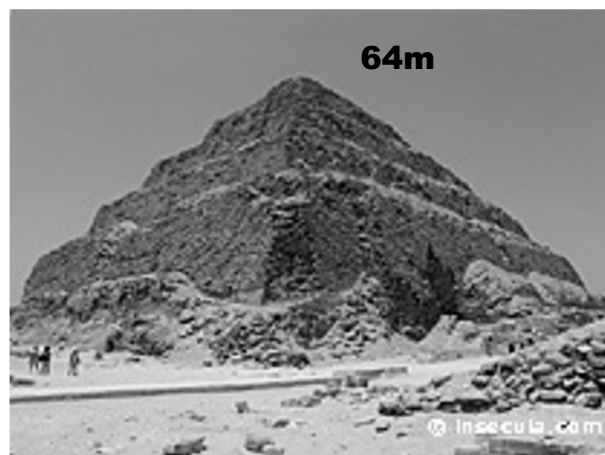
Construir con Materiales Resistentes y Durables

2

**CUANDO FUE
RECONOCIDA LA
PROFESIÓN DE
ARQUITECTO e
INGENIERO CIVIL POR
PRIMERA VEZ ?**

3

Arquitecto y médico Imhotep
2790 A C



Pirámide escalonada de Djeser

4



5

**QUANDO APARECE EL
HORMIGÓN
POR PRIMERA VEZ ?**

6

Panteón
de
Roma



7

Domo del Panteón → Siglo II dC
diámetro de 47m

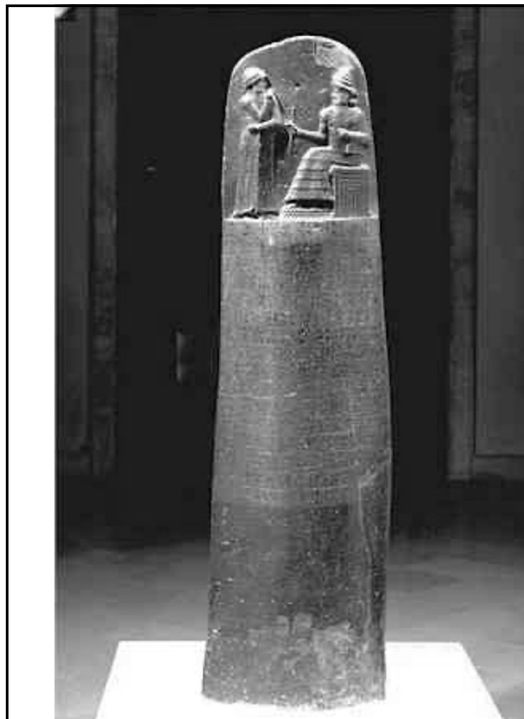


9

La CONSTRUCCIÓN ESTÁ en el PRIMER CÓDIGO CIVIL de la HUMANIDAD

“Durabilidad!”

10



**Código de Leyes de
Hammurabi
(1780 a.C.)**

Rey de Babilonia

**Una copia fue
grabada en un
bloque de roca
diorito negro con
2,4m de altura
conteniendo 282
artículos**

11

Código de Leyes de Hammurabi

Artículos 229 a 233 → obras

229. Cuando una casa o parte de ella colapsa y mata el propietario, el constructor debe morir;

230. Cuando una casa o parte de ella colapsa y mata el hijo del propietario, el hijo del constructor debe morir;

231.....

232.....

233.....

12

Siglo

IV → Byzantine style → Church Santa Sophia, Istanbul

IX → Romanic style → Abbey Cluny, France

XII-XIV → Gothic style → Cathedral Notre Dame, Cologne

XV → Renaissance style

XVII → Baroque style → San Pietro, Bernini

XVII → Neoclassic style → Triumph Arc , Paris

13

Catedral de Notre Dame



1163-1330

La bóveda de la nave central → 35 m de altura

14

Siglo

IV → Byzantine style → Church Santa Sophia, Istanbul

IX → Romanic style → Abbey Cluny, France

XII-XIV → Gothic style → Cathedral Notre Dame, Cologne

XV → Renaissance style

XVII → Baroque style → San Pietro, Bernini

XVII → Neoclassic style → Triumph Arc , Paris

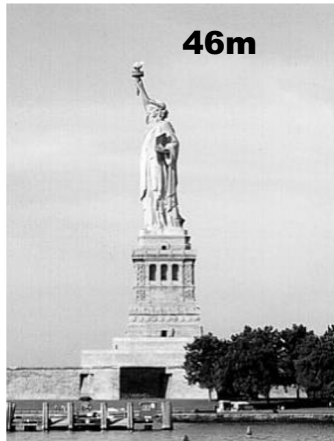
XIX → Steel constructions

15

“Gustave Eiffel”

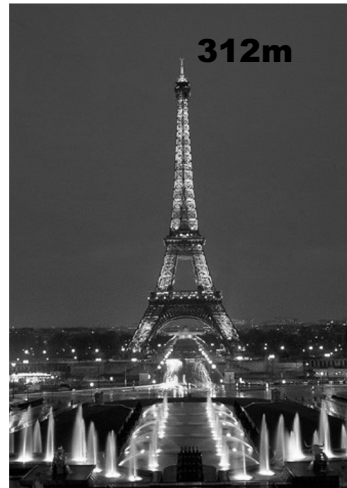
1884 → Estatua de la Libertad

1889 → Torre Eiffel



46m

**(5a+2a)
60t
pintura**



312m

2204 → 6.230.050 visitantes

16

**Dónde están los
edificios de oficinas
y viviendas ?**

Qué pasó?

17

- **1888 → Leroy Buffington USA, esqueleto reticular**
- **1853 → Otis, elevador seguro, 1889 → 1º elevador eléctrico en NY**

18

El inicio de los rascacielos en la edad contemporánea fue en 1890-1891 con la construcción del edificio Wainwright con 42m St. Louis, USA.

Conocido Escuela de Chicago

**Projectista
Arquiteto Louis Henry Sullivan**

19

**SIGLO XX
1900**

**APARECE UN
NUEVO MATERIAL**

***Hormigón Armado
Concreto Armado***

20



**Palacio Salvo
Montevideo**

27 pisos

Uruguay 1928

Altura 103 m

$f_{ck} = ?$

record mundial

21



Martinelli Building

São Paulo

Brasil 1928

Altura 106 m

$f_{ck} = 13.5 \text{ MPa}$

22



Martinelli Building

75 anos!!!

HPC ???

23



**Rascacielos
Kavanagh**

Buenos Aires

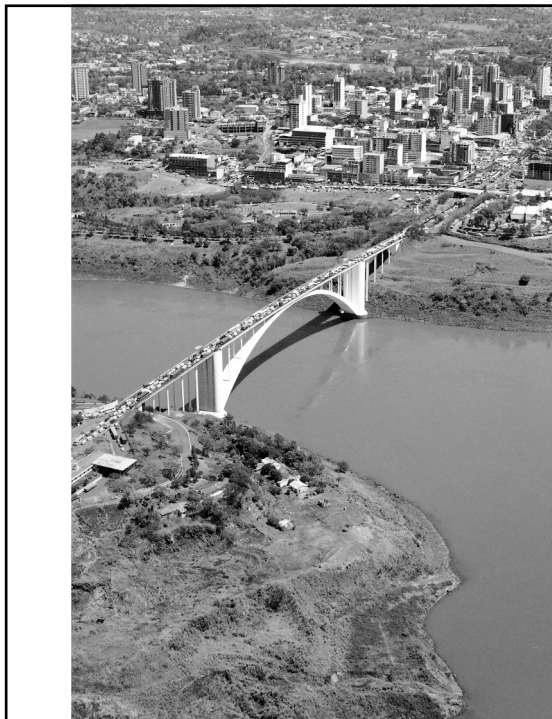
1935

32 pisos

Altura 120m

$f_{ck} = 13,5 \text{ MPa}$

24



**Puente de la
Amistad**

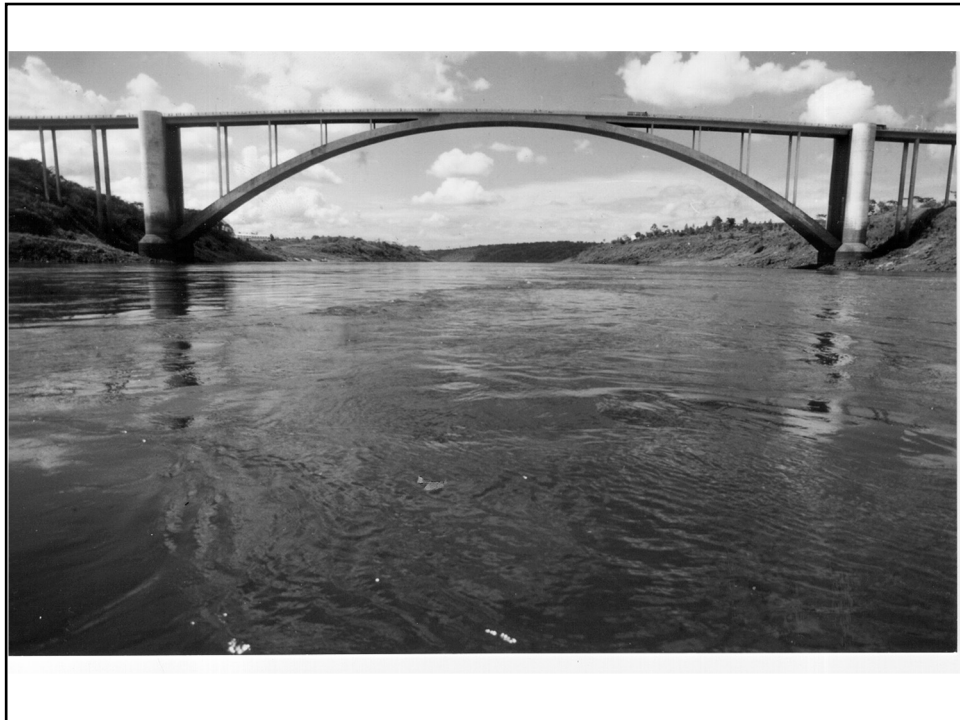
**Brasil /
Paraguay**

1962

300m luz

**“record en
arco”**

25



26

*Torre
Parque Central
Caracas
Venezuela
1984
altura 221m
56 andares*

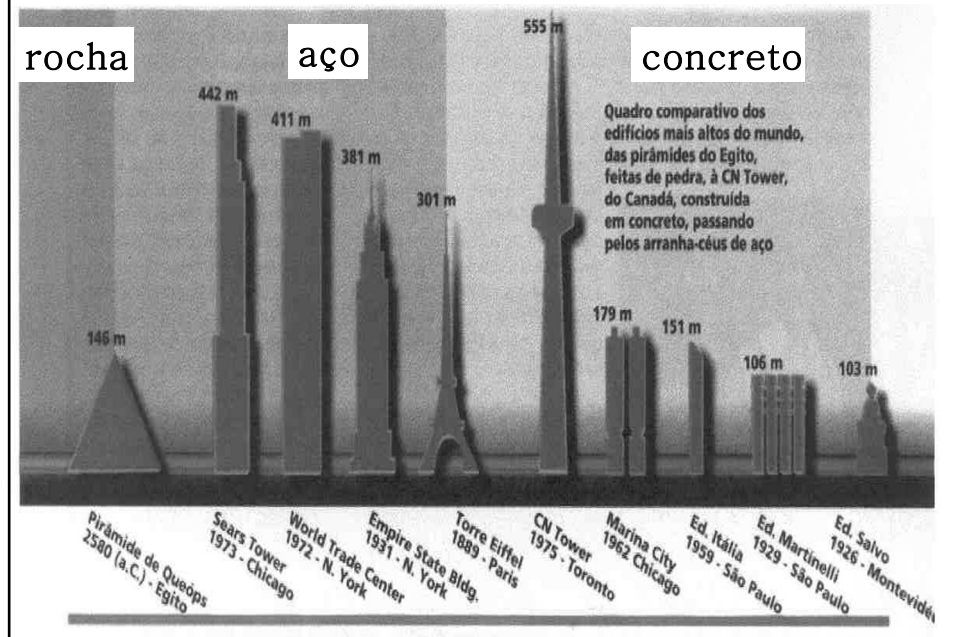
*Ibero
America
Record
35MPa

Ing. Mario
Paparoni &
Sergio Oloma*

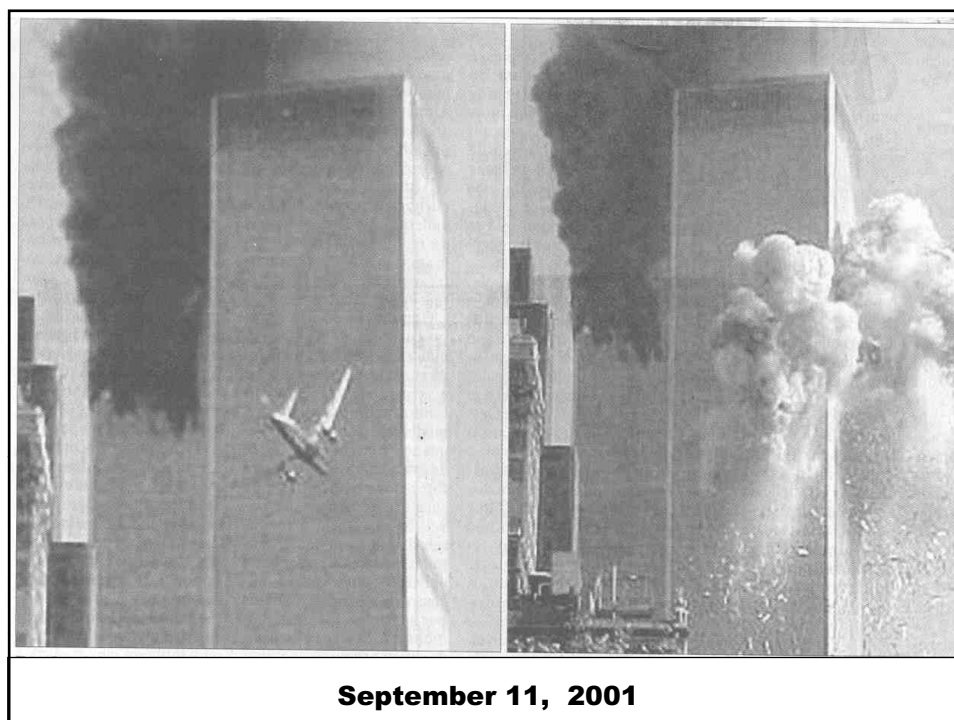
Arq. Enrique Siso & Daniel Shaw

27

Towers



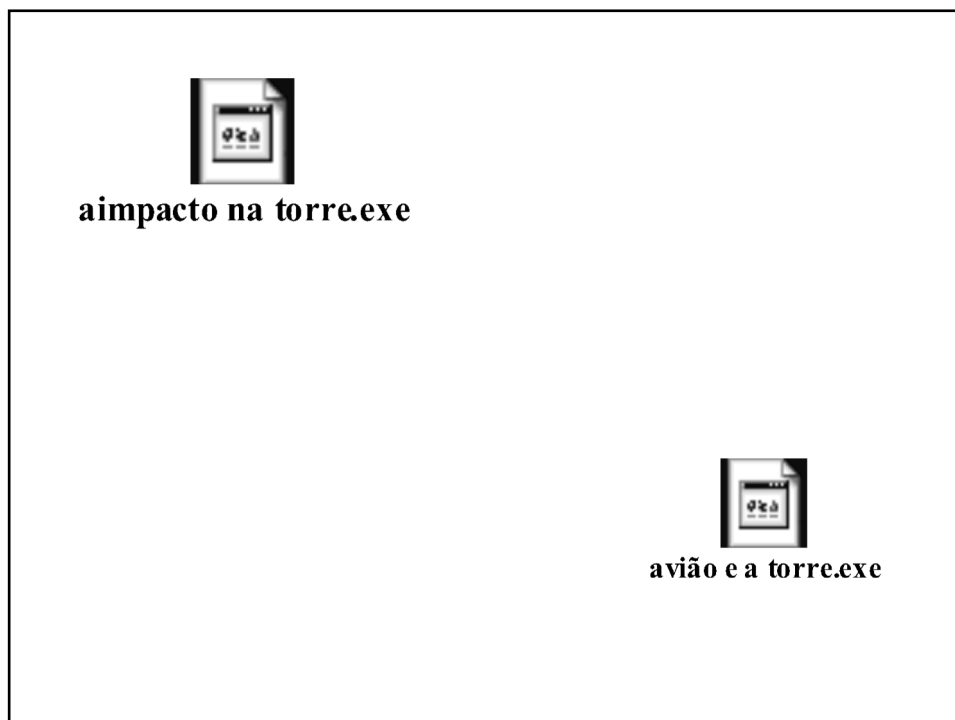
28



29



30



31

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

32

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

33

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

34

Resistencia e Estabilidad

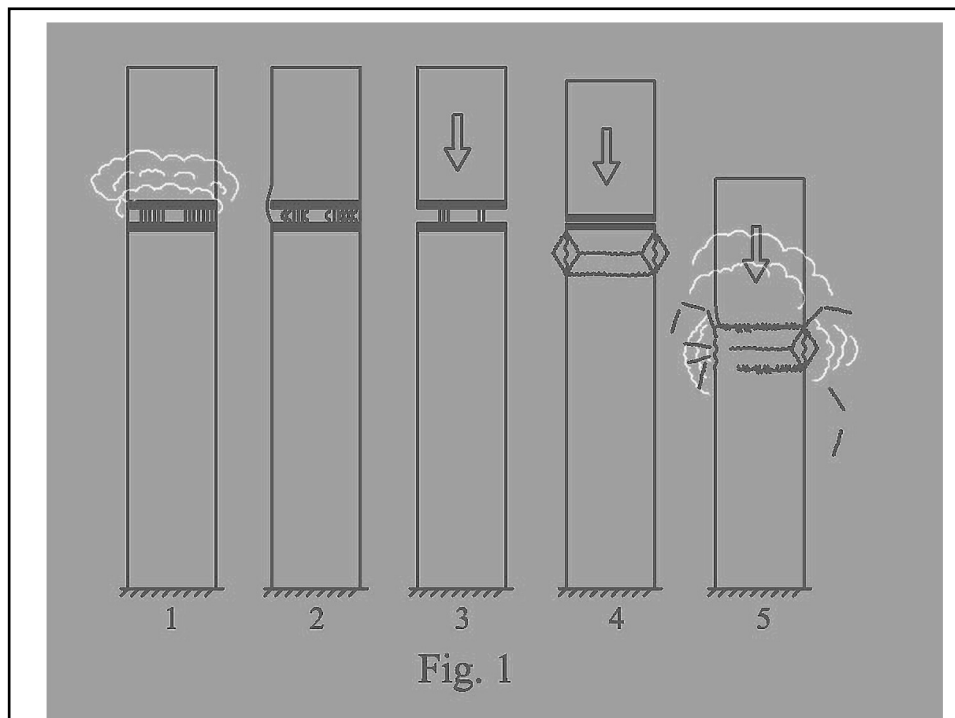
- **medidas indicaron que el impacto del Boeing 767-200ER sometió al edificio a vibraciones semejantes a las de un sismo de índice 2,4 escala Richter**
- **esa vibración inducida, ha tenido una amplitud del orden de la mitad de la máxima considerada por el efecto del viento**
- **período de oscilación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

35

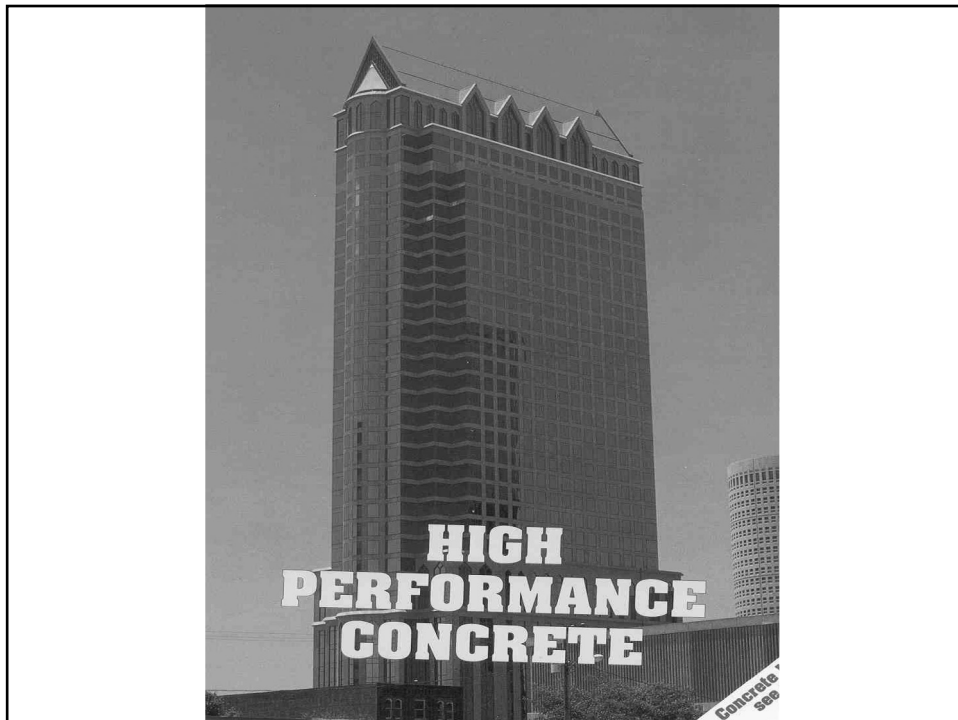
Las Peores Consecuencias del Impacto

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

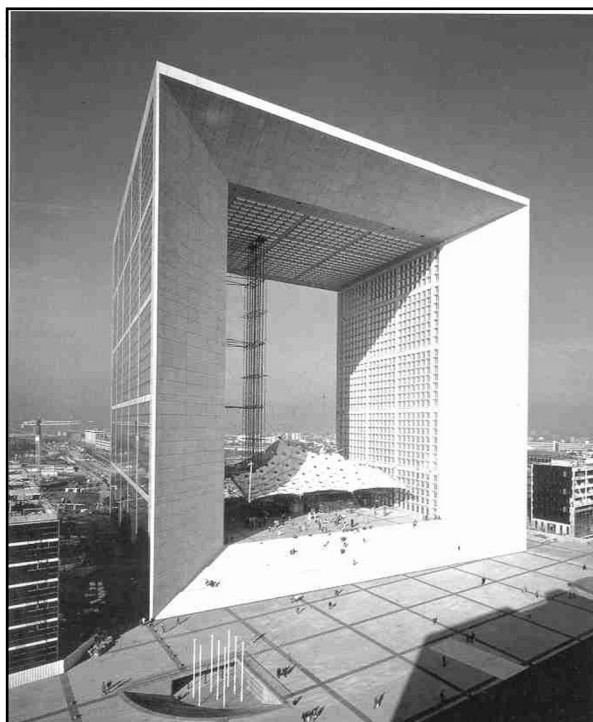
36



37



38



Grand Arch
La Defense
Paris

França 1990

$f_{ck} = 60 \text{ MPa}$

**“high-tech
style”**

39



**Centro
Empresarial
Nações
Unidas**

Torre Norte

**São Paulo
1998**

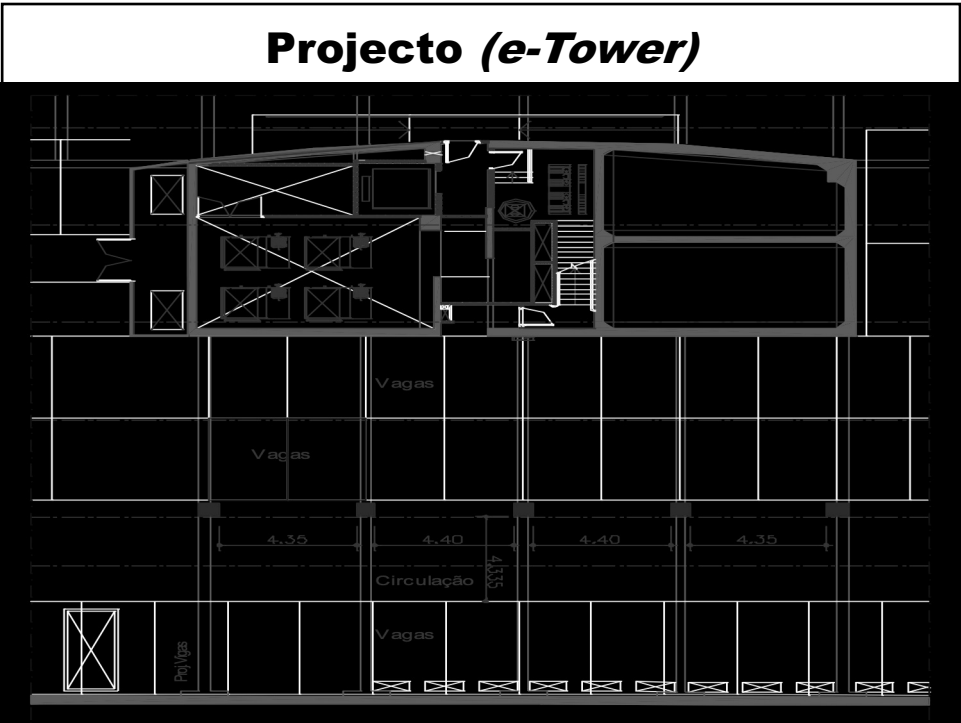
Altura 179 m

$f_{ck} = 50\text{MPa}$

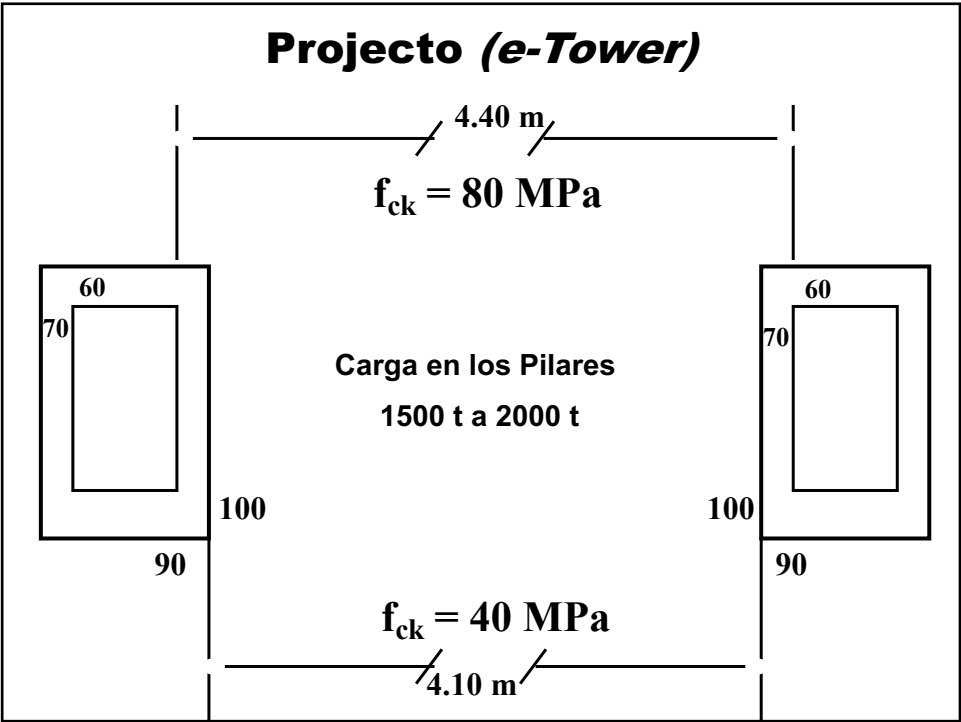
40



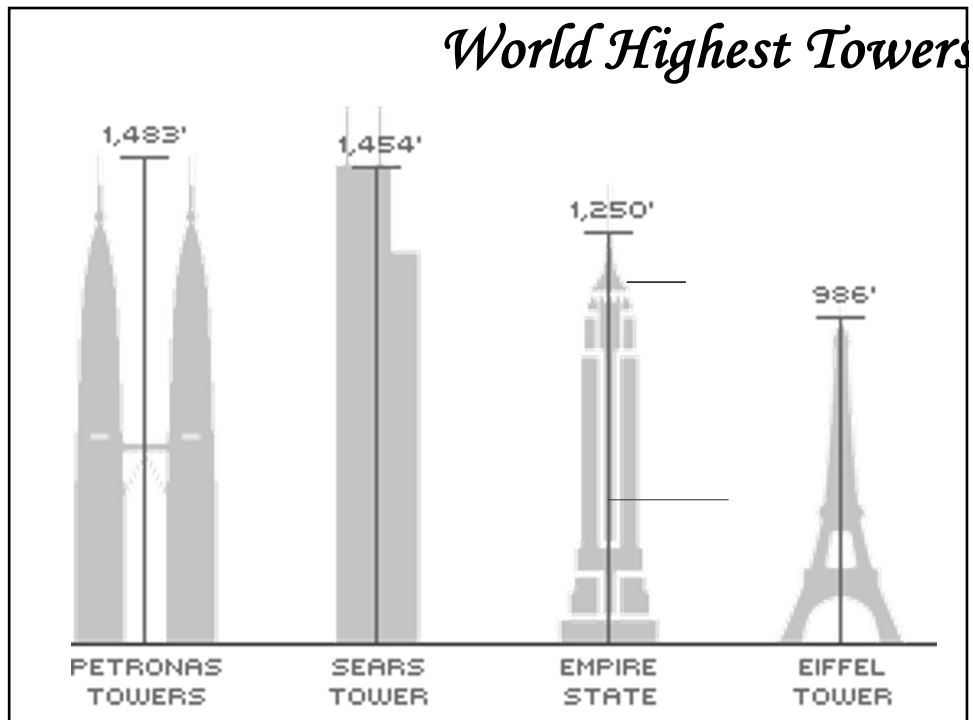
41



42



43



44



Petronas Towers

Kuala Lumpur

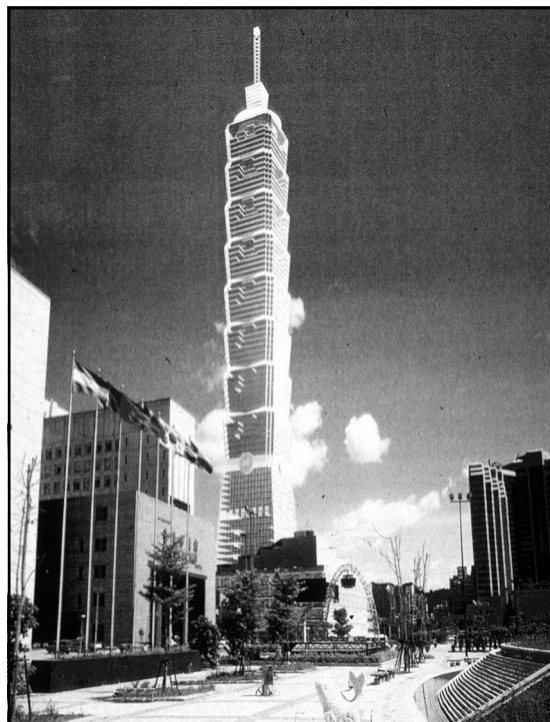
Malásia 1998

Altura 452 m

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

record mundial

45

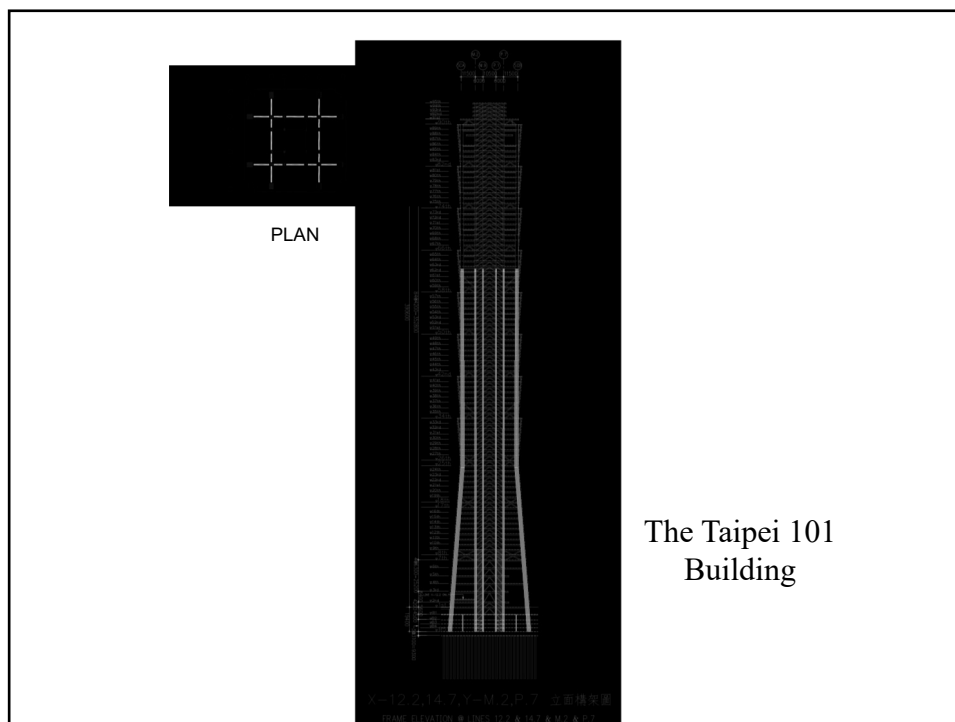


TAIPEI 101

Shanghai World Financial Center

Altura 508m

record mundial



PLAN

47

ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Resistencia a incendio y altas temperaturas

48

Concrete in fire

- ✓ Hormigón es versátil
- ✓ hormigón es no inflamable
- ✓ hormigón es no combustible
- ✓ hormigón es resistente
- ✓ hormigón es aislante térmico

- ❖ hormigón pierde resistencia
- ❖ hormigón puede estallar

- 0 a 100 °C → humedad → vapor de agua → íntegro
- 100 a 350 °C → CSH pierde agua → puede estallar
- 350 a 900 °C → $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO}$ → áridos sueltan
- 900 a 1200 °C → fusión parcial, CO_2

49

Concrete in fire

Ensayos

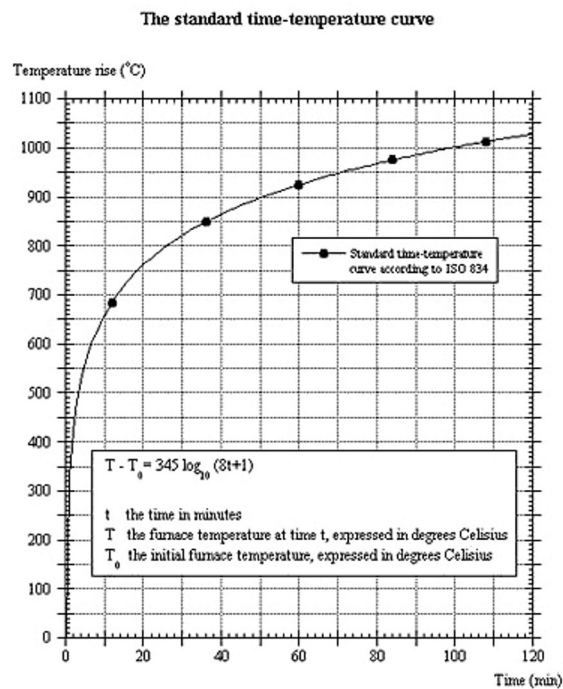
PROBETAS en hornos pequeños
10 cm de diámetro, cubos 10cm, 5cm, 15cmx30cm

COMPONENTES AISLADOS
vigas, tramo de losas, columnas
diferentes recubrimientos

ESTRUTURAS
pisos, diferentes diseños

50

Crecimiento
de la
Temperatura
ASTM E 119
ISO 834



51

NISTIR 6726. National Institute of Standards and Technology, 2001

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 and 325 °C.**

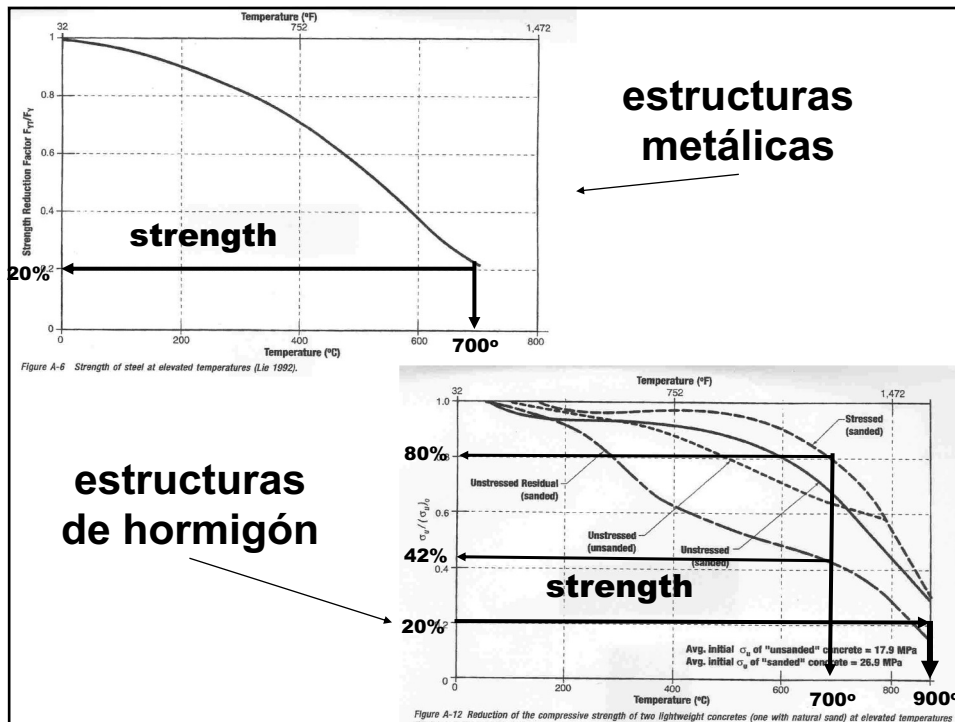
52

NISTIR 6726. National Institute of Standards and Technology, 2001

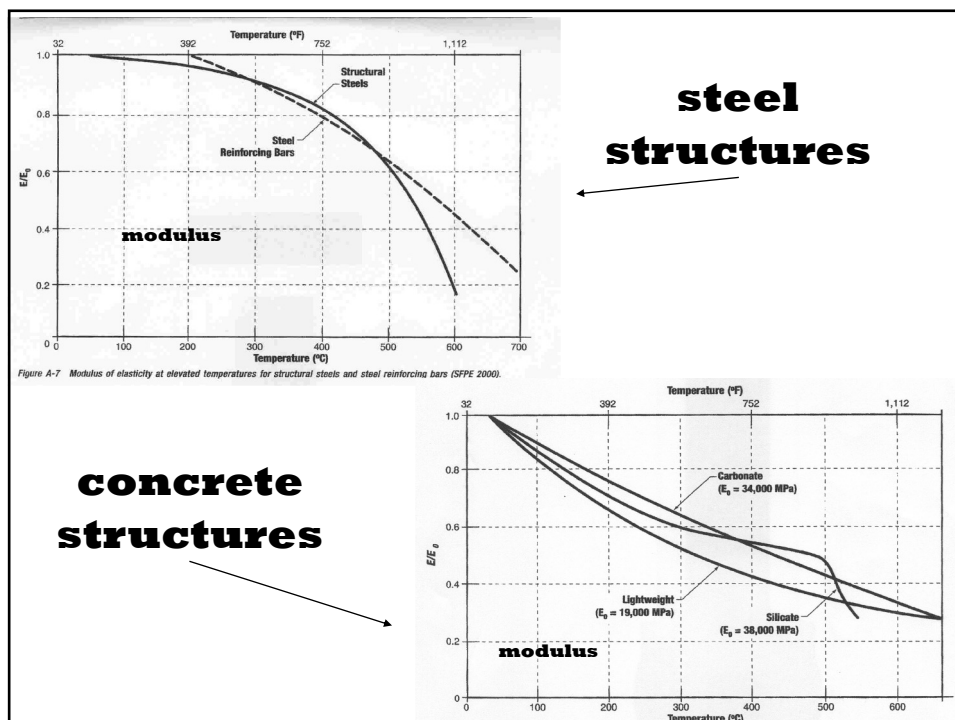
HSC water-cement ratio 0.22 to 0.57, 51 to 93 MPa.

- 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.**

53

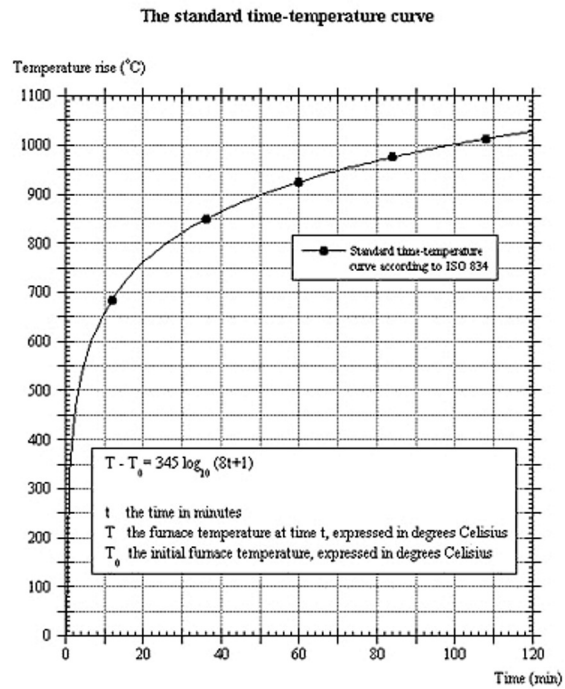


54



55

**Crecimiento
de la
Temperatura
ASTM E 119
ISO 834**



56

**Distribución de la temperatura en
los perfiles metálicos**

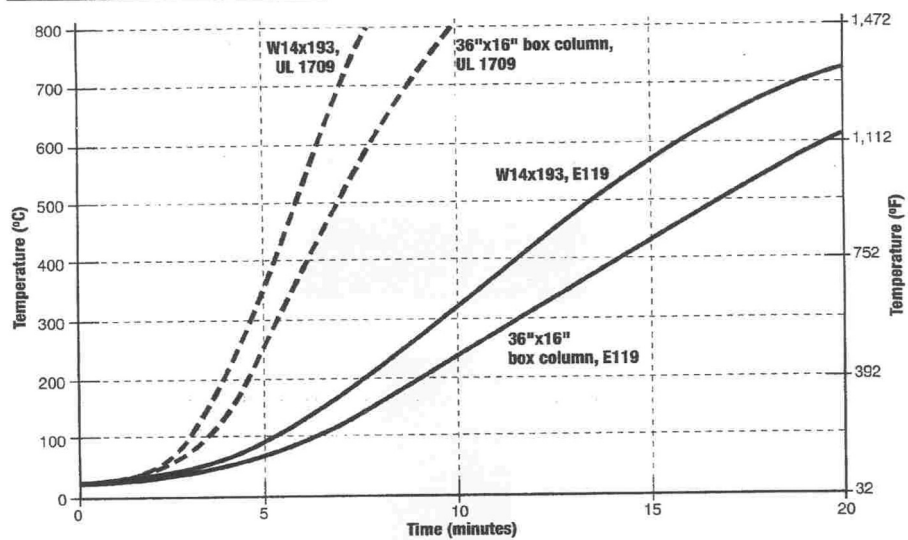
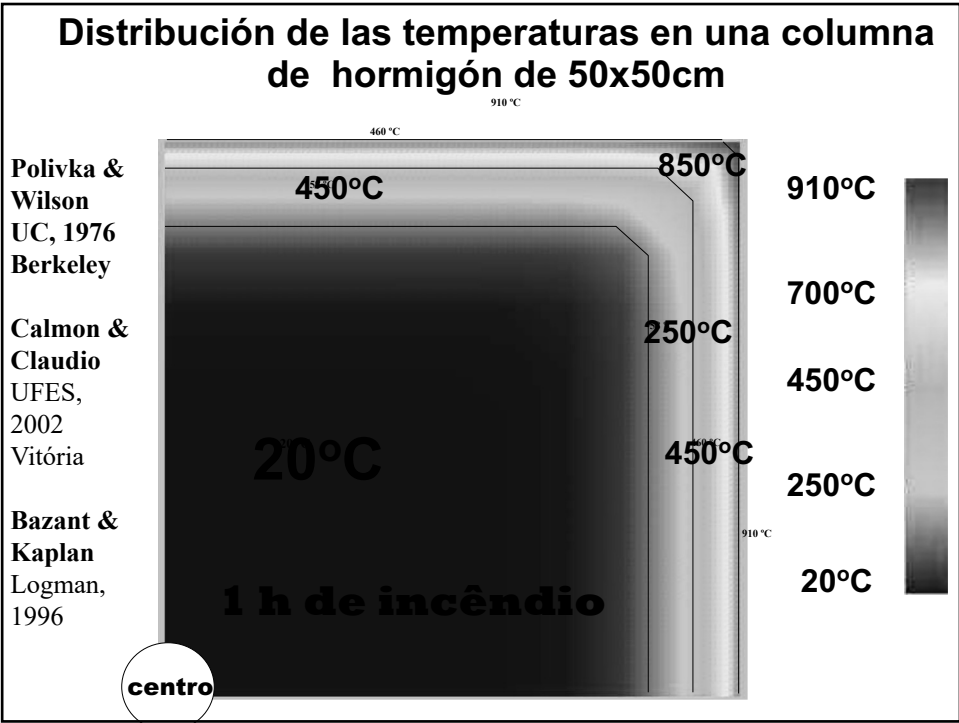
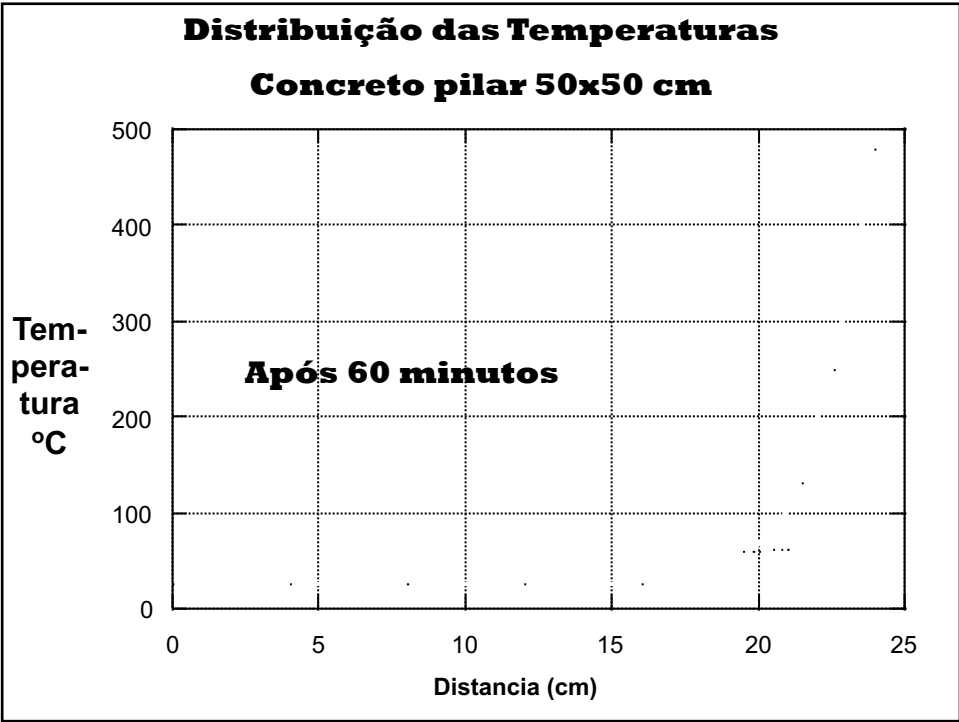


Figure A-9 Steel temperature rise due to fire exposure for unprotected steel column.

57



58



59

The Cardington Fire Test

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

[Email this article](#)
[Printer friendly page](#)

- ✓ 7 pisos
- ✓ 25m de altura
- ✓ 3 x 4 de 7,5m por 7,5m
- ✓ losa → espessura 15cm
- ✓ losa → $f_{ck} = 37\text{MPa}$
- ✓ losa → $f_{ck} = 74\text{MPa}$
- ✓ recubrimiento → 2cm
- ✓ pilares → $f_{ck} = 100\text{MPa}$
- ✓ recubrimiento → 4cm
- ✓ áridos calcita y granite
- ✓ 2,7% fibras propileno
- ✓ umidade alta



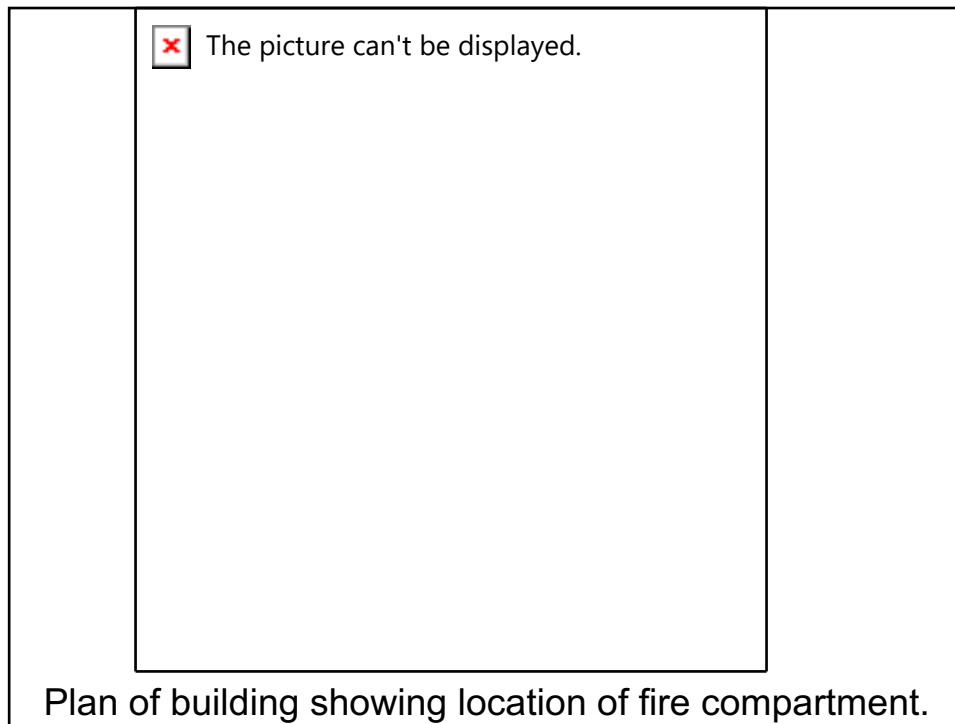
Cardington Concrete Building Frame

60

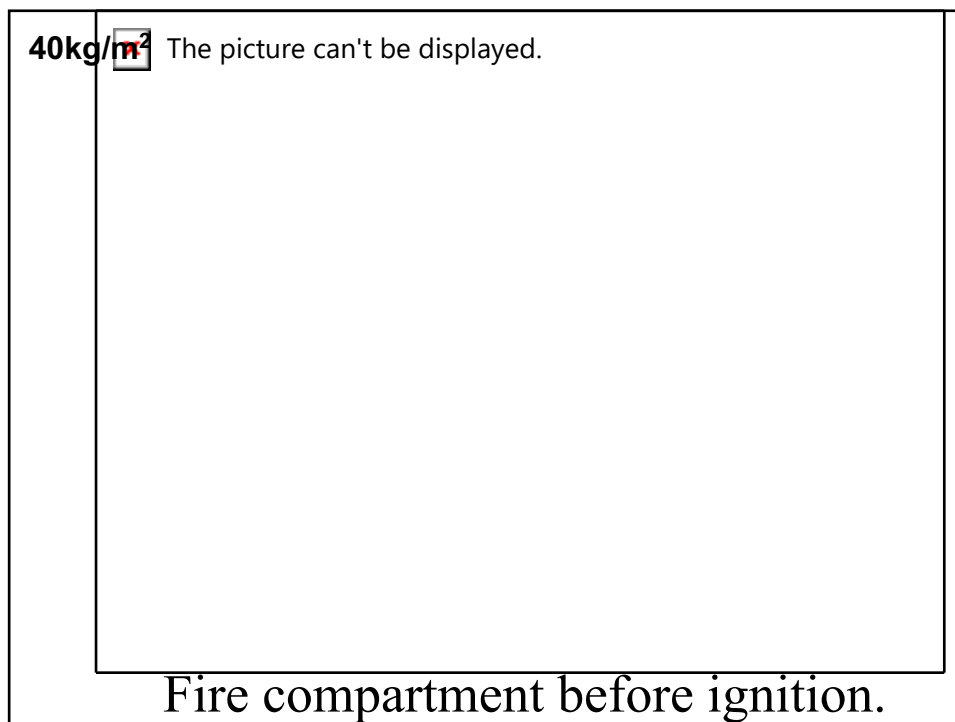
Concepto

1. A materials-based approach is not sufficient on its own to explain the performance of a real concrete structure in a fire.
2. Additional factors, such as the influence of loads and the three-dimensional behaviour of the concrete structure as a whole, are also significant.
3. Modern codes of practice such as in the forthcoming Eurocode 2 for fire design, EN 1992-1-215, allow a performance-based approach to be used in design.
4. This code uses the fire safety engineering principles to take into account actual fire-loading scenarios, physical material parameters, and analysis of the whole structure.

61



62



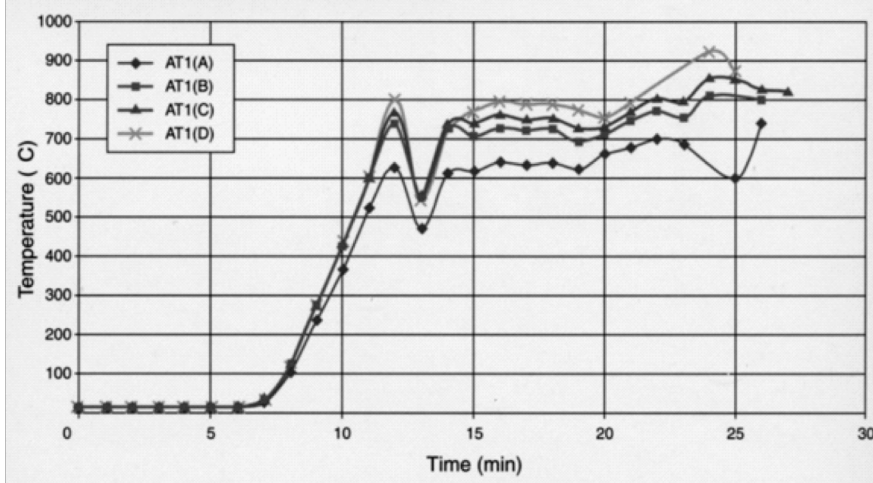
63

Instrumentation was installed to measure horizontal and vertical displacements of the slab and columns, atmospheric temperatures, surface temperatures, temperatures within the slab, and surface strains on the slab.

 The picture can't be displayed.

Fully developed fire.

64



Tiempo total = 120minutos

65



66

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

67

Lecciones Apreendidas

- **soluciones innovadoras**
- **ensayos**
- **colapso progresivo**
- **compartimentación**
- **evacuación**

68

Conclusiones

▼ Adoptar estructuras de concreto de alta performance es:

- **garantía de vida útil**
- **mejor performance estructural**
- **mejoría arquitectónica**
- **menor costo de la estructura**
- **ganancia de área útil**
- **más grande constructibilidad**
- **preservación de los recursos naturales**

c q d

69



70