



Senior Webinars de ALCONPAT/HOLCIM



Comportamiento al Fuego de Concretos Coloreados y de Alta Resistência. 140 MPa



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

Paulo Helene

Director PhD Engenharia
Director Presidente do IBRACON
Ex Presidente ALCONPAT Internacional
Prof. Titular Universidade de São Paulo
Member fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design
Consejero de la CNTU y SEESP

Mérida

24 de noviembre de 2020

Yucatán/México

1

Las estructuras de concreto deben ser idóneas y sostenibles:

- ✓ Fáciles de construir (construtibilidade)
- ✓ Pasibles de control
- ✓ Resistentes (estables cargas, viento, huracanes)
- ✓ Soportar fuego (incendio)
- ✓ Durables
- ✓ Funcionales
- ✓ Bonitas
- ✓ Estables

2

Concreto Armado: como empezó? *propaganda de la época*

patente en Bélgica del
concreto armado en
8 agosto de 1892



**François
Hennebique**

Système Hennebique de béton armé. Installe son entreprise avec le slogan:

« plus d'incendies désastreux »

nunca más incendios desastrosos

3



Système Hennebique

Paris, Rue Danton 1

7 pisos

Francia 1.900

30 m

$f_{ck} = 12$ MPa (?)

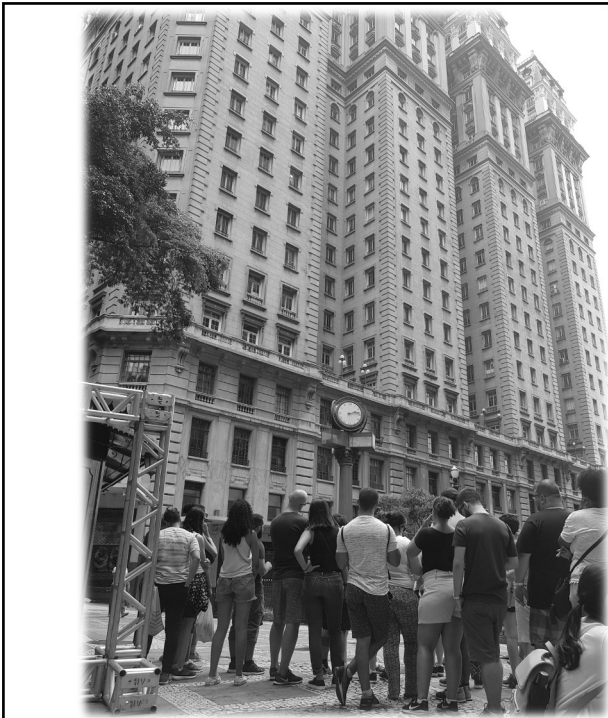
120 años !

*edificio de concreto armado más
antiguo del mundo*

4



5



Edifício

Martinelli

São Paulo

1929

106 m

30 pisos

$f_{ck} = 15 \text{ MPa}$

6



Edifício Leopoldo, São Paulo

2019 → 126 m

$f_{ck} = 90$ MPa



7

f_{ck} de

12 MPa a 90 MPa

...una larga trayectoria

superando muchos

Mitos

8

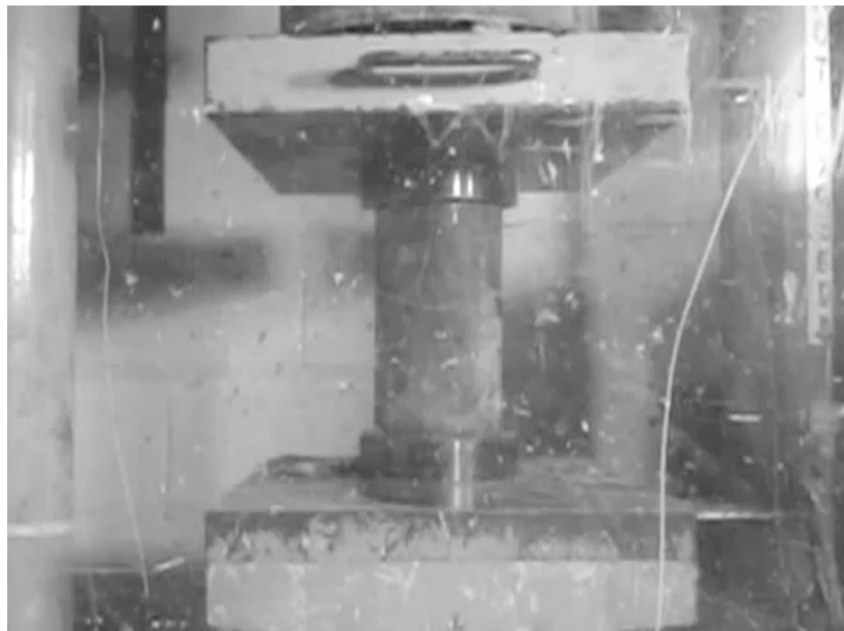
HSC o HPC

EXPLOTA !

**.. y no se puede utilizar
em estructuras...**

9

HPC o HSC explotando ...video de los años 90 !...



10

otro Mito
HPC o HSC
> 50 MPa

...consume mucho cemento
y no es SOSTENIBLE !...

11

VERDAD

al revés, puede consumir más cemento
por m³, pero la cantidad de CO₂, de
Energía e de H₂O, de la estructura,
reduce mucho con MPa alto

CO₂ / MPa

12

columna para 500 t

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$$

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

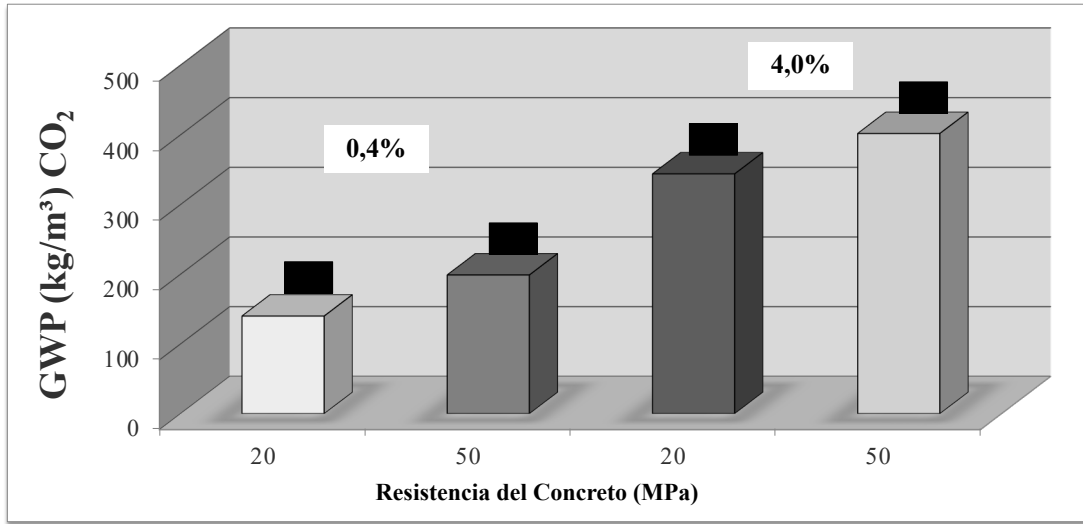
13

considerando una columna central típico de un edificio de 22 pisos sección cuadrada, 3 m de altura, armadura principal

fuerza normal característica = 500 tf			
f_{ck} (MPa)	cuantía de refuerzo (%) → total de la columna	sección (cm)	adoptado (cm)
20	0.4 → 49 kg	71.8 x 71.8	72 x 72
50	0.4 → 24 kg	46.9 x 46.9	50 x 50
20	4.0 → 255 kg	51.2 x 51.2	52 x 52
50	4.0 → 151 kg	39.5 x 39.5	40 x 40

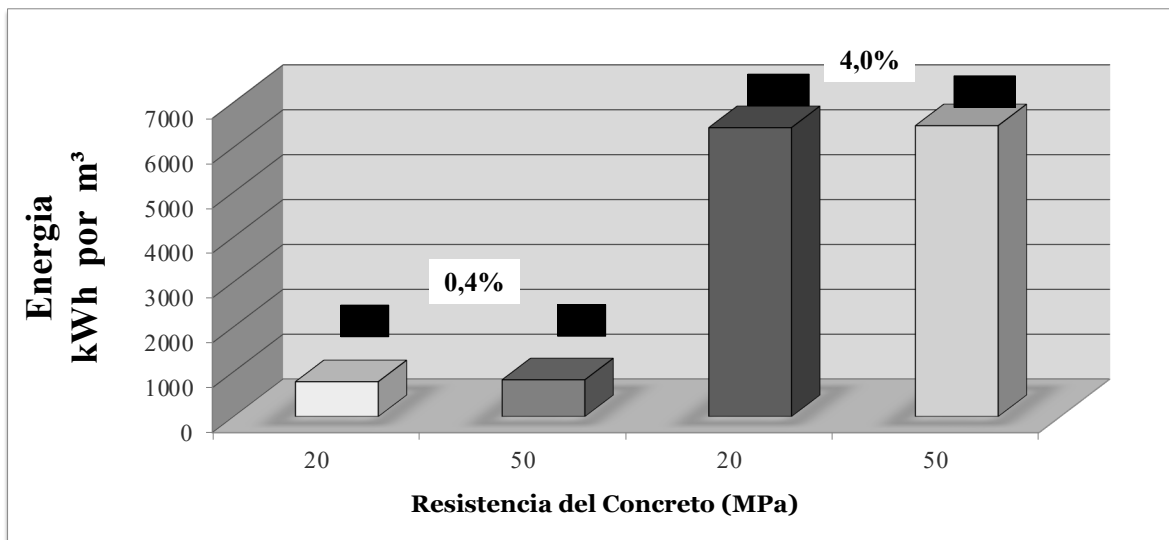
14

**1 m³ de concreto estructural →
CO₂ (cemento con escoria)**



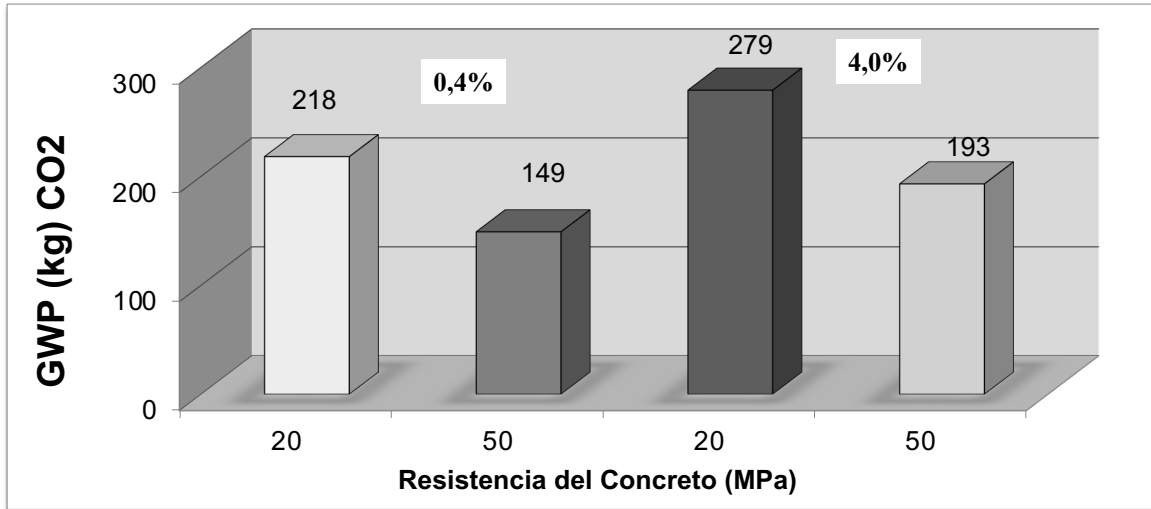
15

**1 m³ de concreto estructural
kWh / m³**



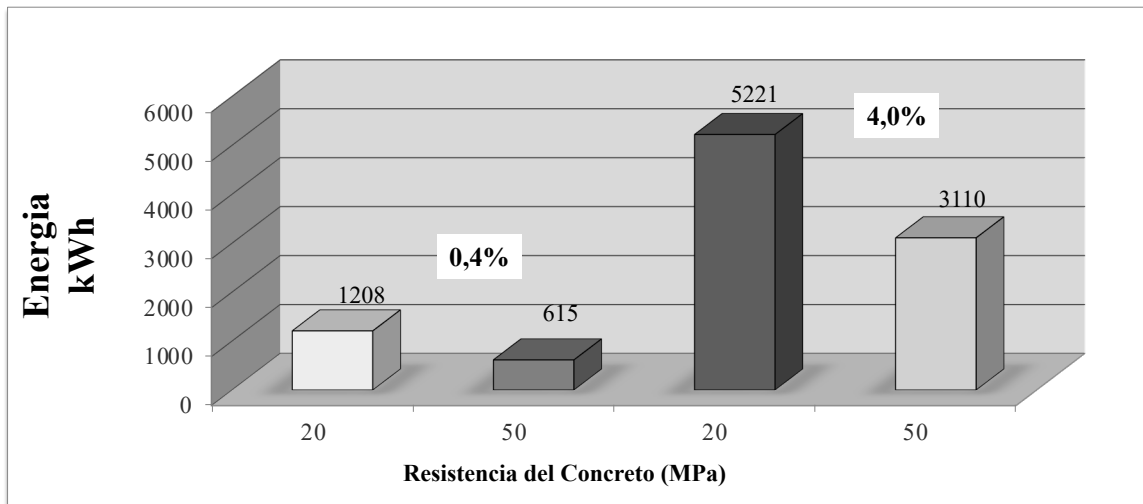
16

columna con 3 m de altura, sección cuadrada, 500 tf
liberación de CO₂ (kg/columna)



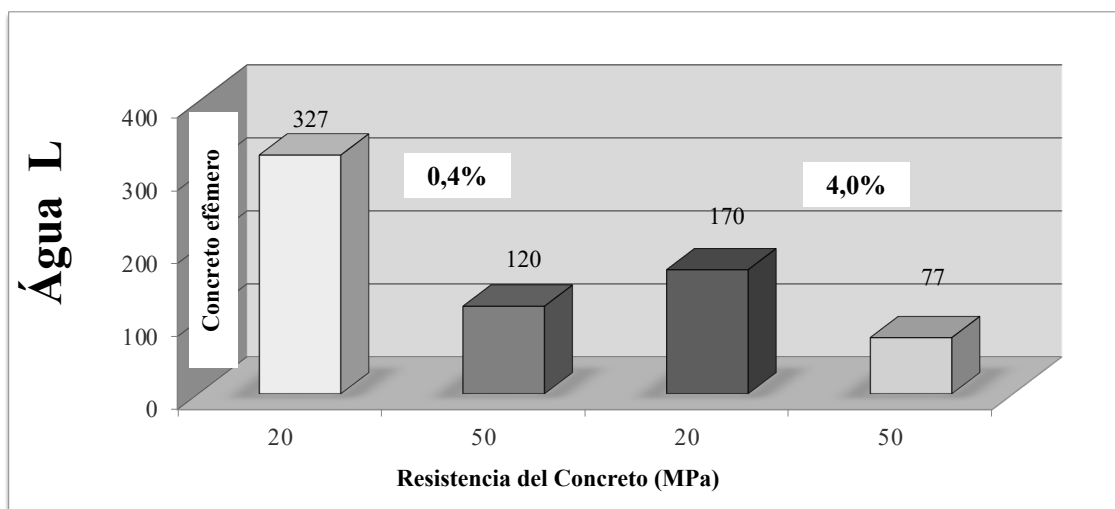
17

columna con 3 m de altura, sección cuadrada, 500 tf
consumo de energía kWh / columna



18

columna con 3 m de altura, sección cuadrada, 500 tf
contenido de agua (L/columna)



19

Las estructuras de concreto deben ser
idóneas:

**soportar fuego
(incendio)**

20

Mito

...los concretos HSC y HPC
explotan con altas
temperaturas de incendio ! ...

21

video de 2019 !!! en internet... You Tube →
mas de 6 mil accesos !!!



22

INVESTIGACIÓN
Universidad de São Paulo
BRASIL
2002 → 2010



PhD student: Carlos Brites
Supervisor: Paulo Helene

23

hechos



Edifício e-Tower

São Paulo Brasil

2002

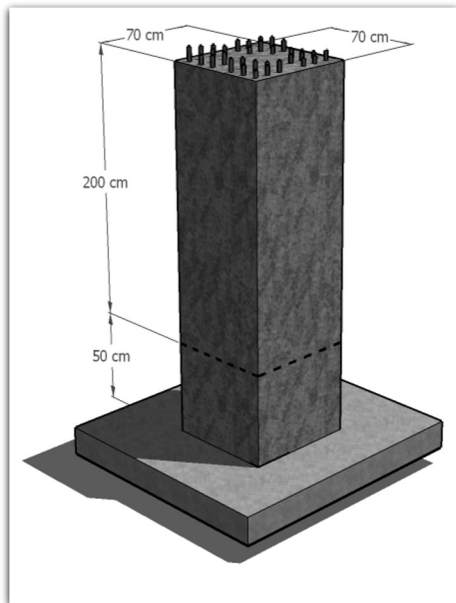
$f_{cm} = 125 \text{ MPa}$ $f_{ck,est} = 112 \text{ MPa}$

world record

6 columnas en 7 pisos

24

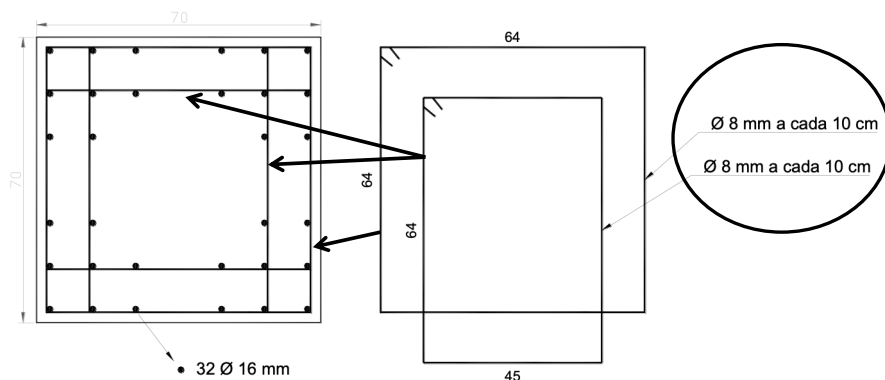
Columna Ensayada



- ✓ **70 cm x 70 cm**
- ✓ **altura: 2 m**
- ✓ **peso: 2.500 kg**
- ✓ **edad: 8 años**
- ✓ **$f_c = 140$ MPa**
- ✓ **recubrimiento: 25 mm**

25

sección transversal



26

Concreto bajo condiciones muy severas de exposición

HSCRC
High Strength Colored Reinforced
Concrete Column

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

pigmento rojo a base de oxido de hierro (inorgánico)

3 h (180 min) fuego estándar en horno

27



columna
similar a las
reales
mantenida
en ambiente
externo

28

originalidad de la investigación

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

29

columna → corte y transporte



hilo de diamante

30

testigos extraídos

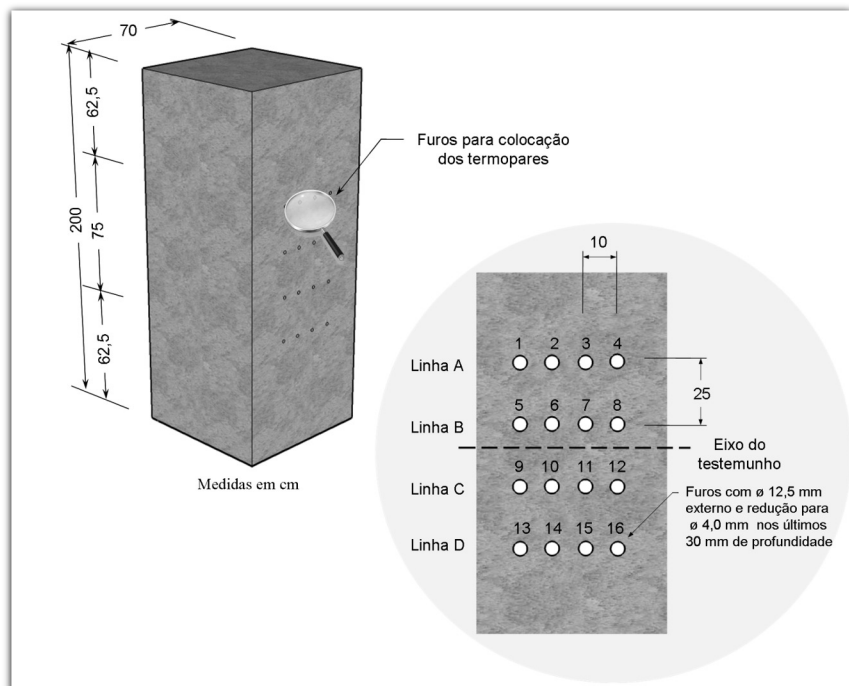


140 MPa



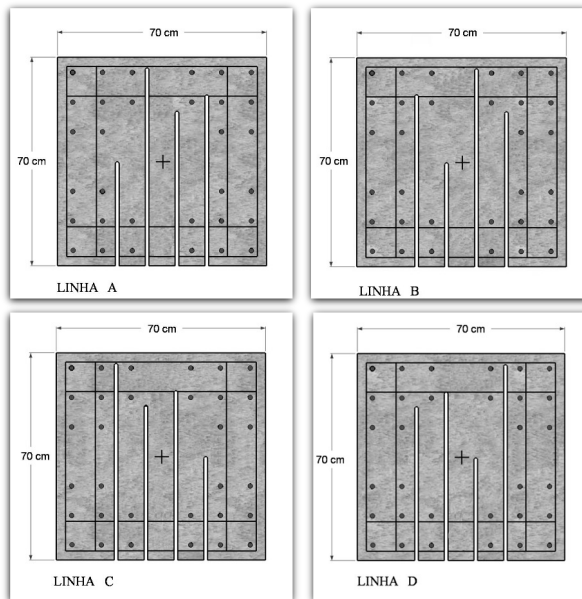
31

16 termopares



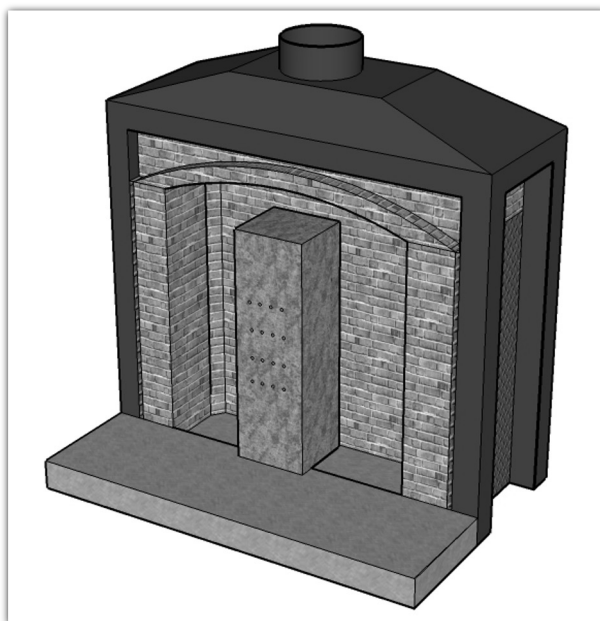
32

Insertando termopares



33

Laboratório (horno)



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

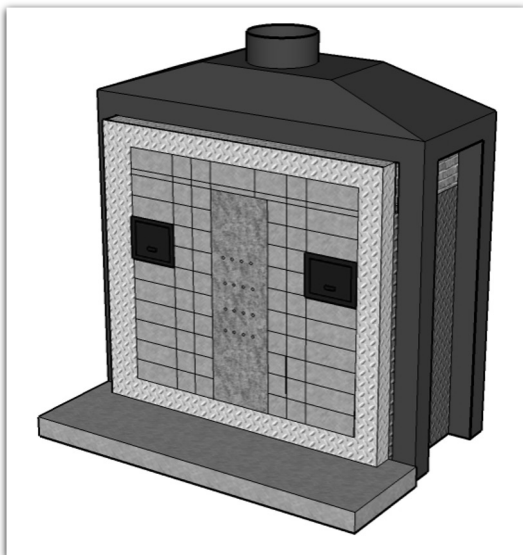
34

protección con fibras cerámicas refratárias



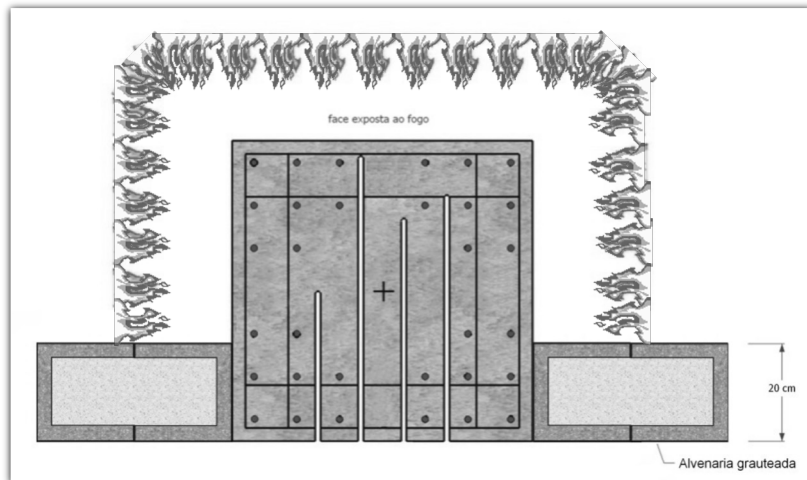
35

Laboratório
horno de alta temperatura



36

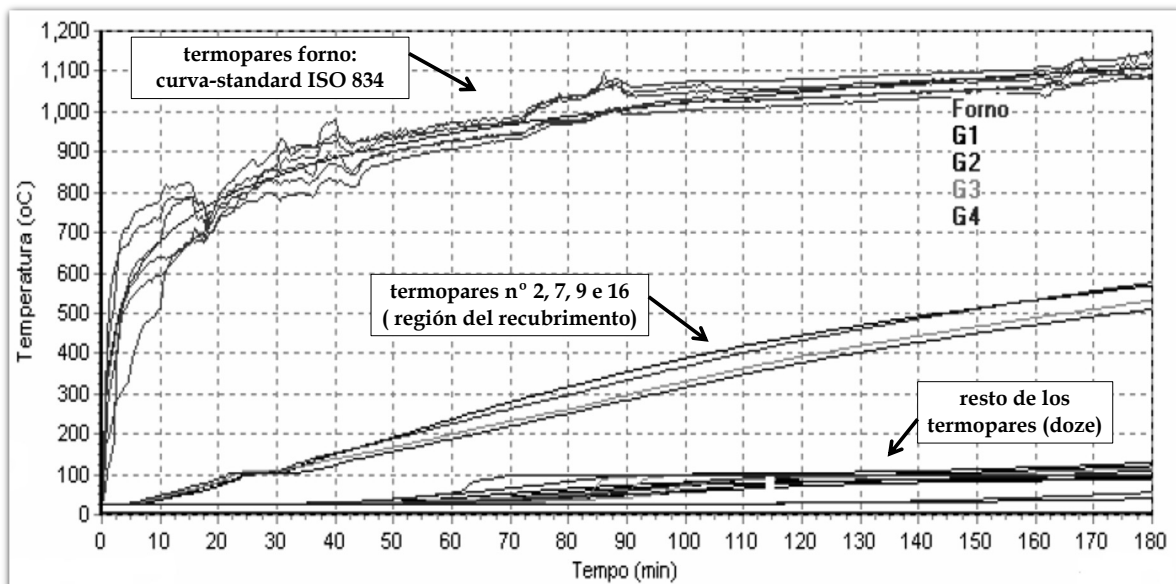
condiciones de ensayo (3 caras)



ISO 834 standard fire

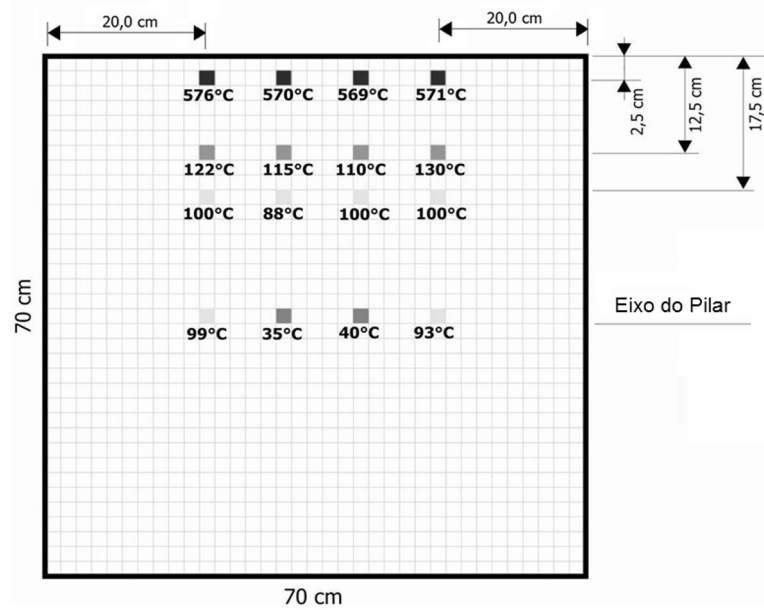
37

evolución de las temperaturas



38

temperaturas a los 180 min (3 h)



39

*después
del
ensayo*

*resfriar
3 h fuego
+ 3 días*



40



Integridad después de 180 min (3 h)

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

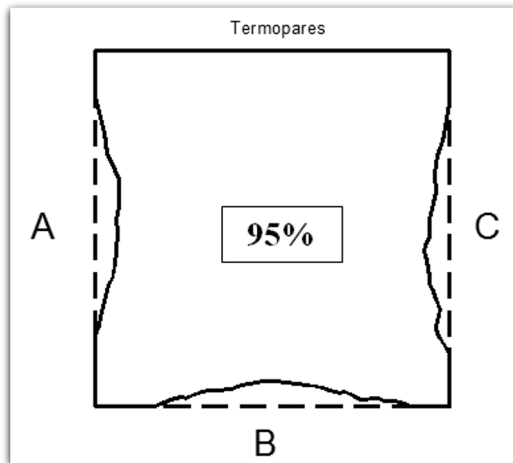
41

Integridad



42

Integridad



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

43



44

Qué dicen los “ensayos” o
los “laboratórios de
ensayo de fuego reales” ?!

45

Muertes en situación de incendio

1. Asfixia / intoxicación
2. Pánico / pisotearse
3. Quemaduras

4. Colapso (evacuación, rescoldo “bomberos”)
protección al “patrimonio”

46

Incendio o Fuego en las Estructuras

1. Protección activa: extintores, señalización, sprinklers, ...
2. Protección pasiva: mortero, pinturas intumescente,..
3. Resistencia al fuego (ensayos en él Laboratorio);
- 4. Estructura resistente al fuego (diseño y construcción);**
5. Inspección y diagnóstico;
6. Rehabilitación

47



Edificio ANDRAUS

**São Paulo, Brasil
1972**

Estructura de Concreto Armado

**32 pisos de oficinas
115 m**

Construcción: 1957-1962

Incendio: 24 Feb. 1972

***duración: 4 h
240 min***

***hoy día en uso
nada colapsó***

48



49

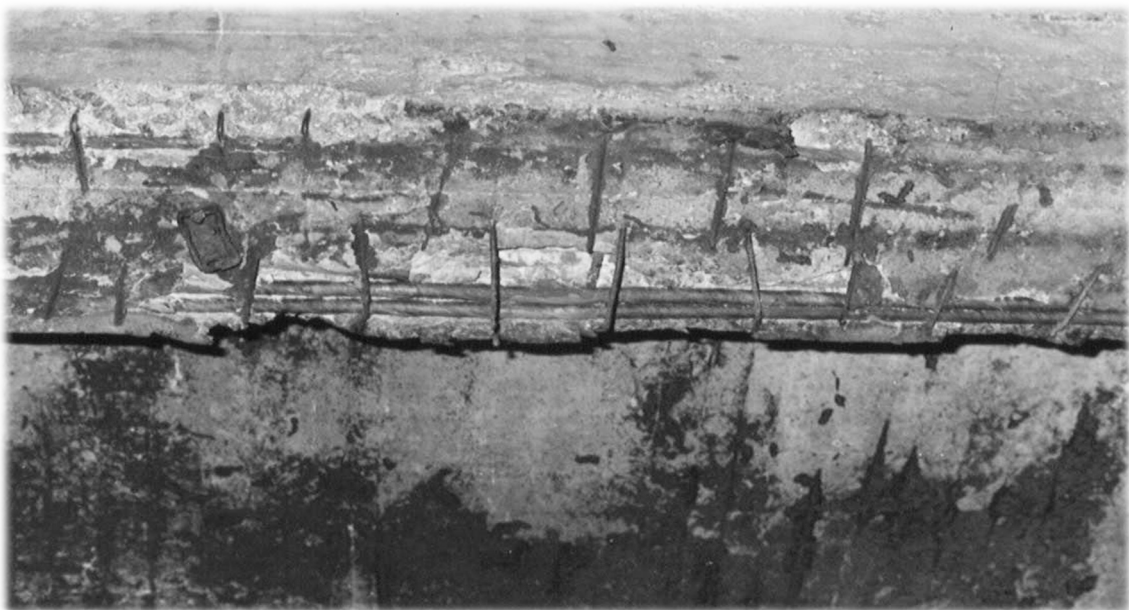


50



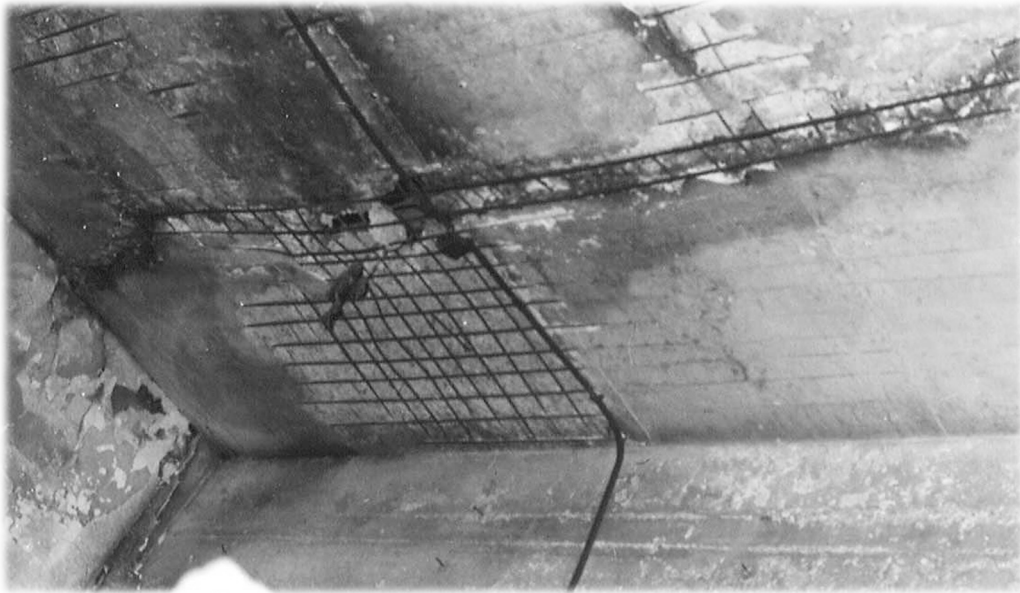
**aspecto
típico de las
columnas
después del
incendio**

51



aspecto típico de las vigas

52



aspecto típico de las losas

53



Edificio JOELMA

**São Paulo, Brasil
1974**

Estructura de Concreto Armado

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

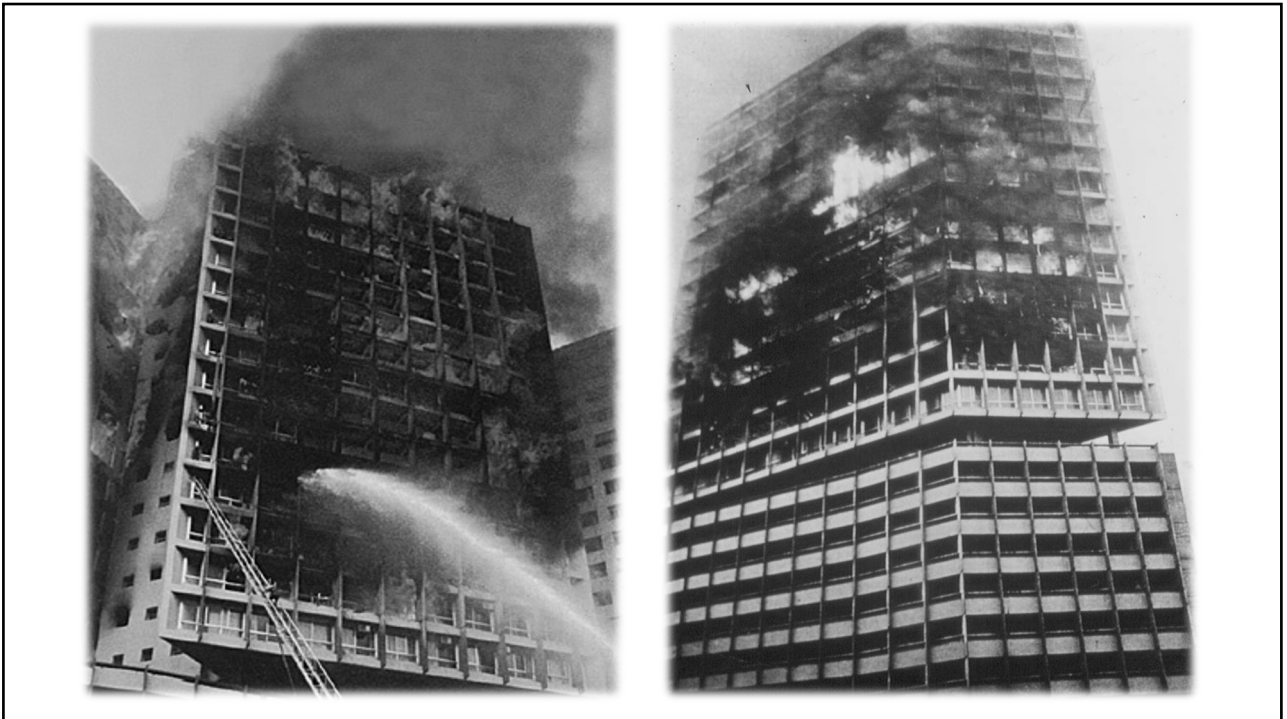
Construcción: 1969-1971

Incendio: 1 Feb. 1974

**duración: 6 h 30 min
390 min**

**hoy día en uso
nada colapsó**

54



55

Edifício Grande Avenida

**São Paulo, Brasil
1981
Estructura de Concreto Armado**

**22 pisos
+ mezanino**

Construcción: 1962-1966

Incendio: 14 Feb. 1981

***duración: 4 h 40 min
280 min***

***hoy día en uso
nada colapsó***



http://f5.folha.uol.com.br/saiunop/2015/01/1574606-incendio-no-grande-avenida-deixa-17-mortos.shtml#_=_

56

Incendio de 1981



57

Incendio de 1981



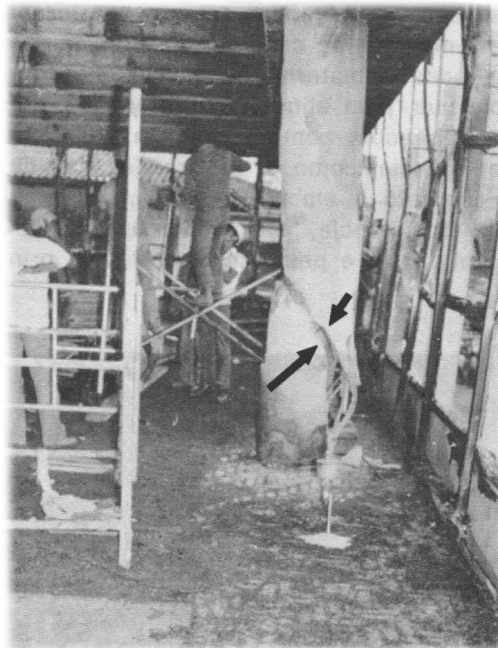
58



<https://pt.slideshare.net/macielsirlene/incendios-top-10>

59

Incendio de 1981



60

Edificio WINDSOR

**Madrid, España
2005**

Estructura mixta acero-concreto

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

Construcción: 1991

Incendio: 12 Feb. 2005

***Duración: 16 h
960 min***

***colapso parcial (acero)
implosión***



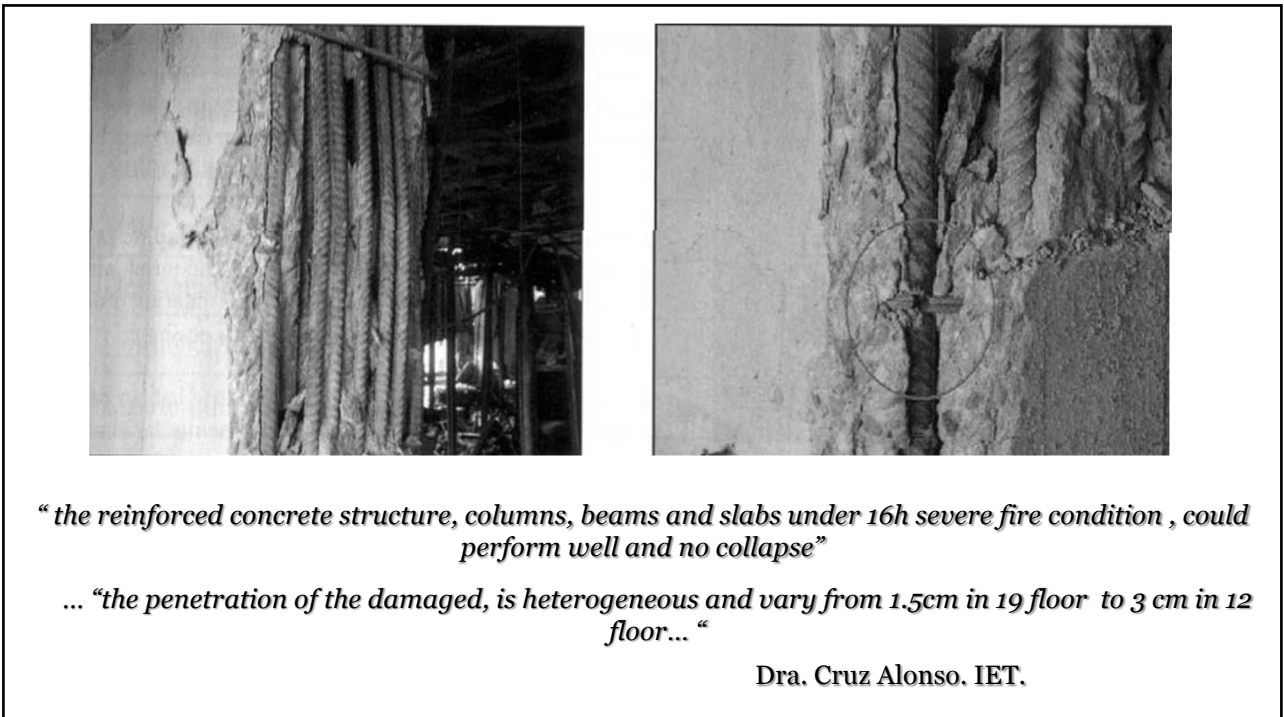
61



62



63



“ 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.

64



**Parque Central Torre
*Este***

**Caracas, Venezuela
2004
Estructura de concreto armado
221 m, 56 pisos**

Construcción: 1979

Incendio: 17.10.2004

**Duración: 20 h
Zona sísmica: IV**

***concreto no colapsó
recuperado y en uso***

65



66

El domingo, 17 de octubre de 2004 a las 12 de la noche, el incendio inicio en el piso 34° de la Torre "Este" del Parque Central, Caracas, Venezuela. El fuego se extinguió por si mismo acabando el domingo, cerca de 8 h de la noche.

El incendio atravesó una macro losa para rigidizar, construída en concreto en el piso 39° y permaneció descontrolado hasta el piso 56°, hasta agotarse el material combustible.

67



68



69



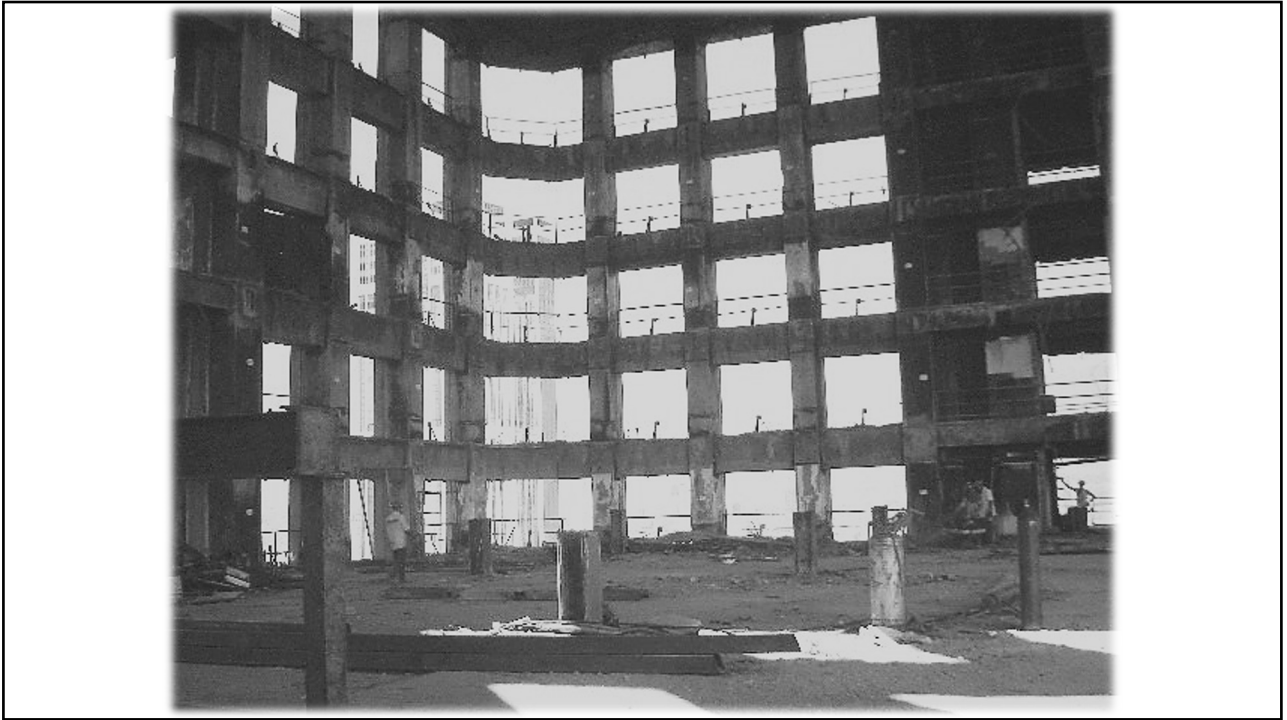
70



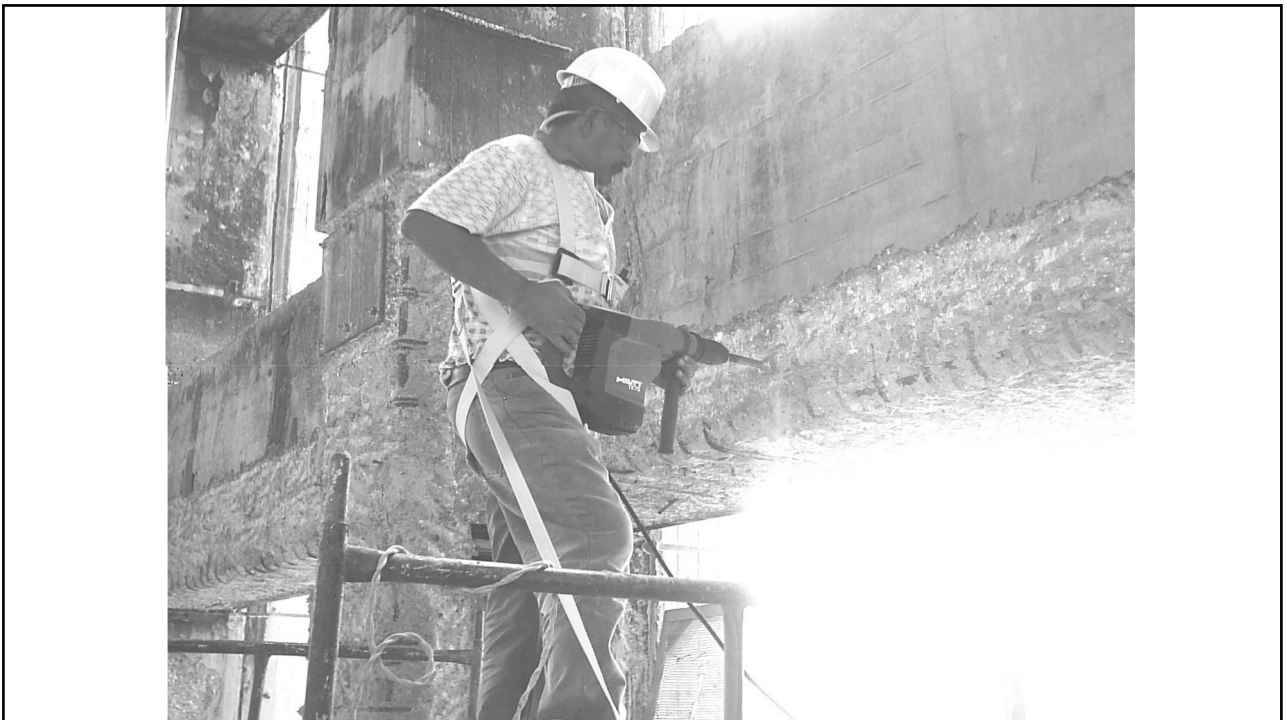
71



72



73



74

World Trade Center

**New York, EUA
2001**

**Estructura Metálica
110 pisos
6 niveles de subsuelos**

Construcción: 1966 al 1973

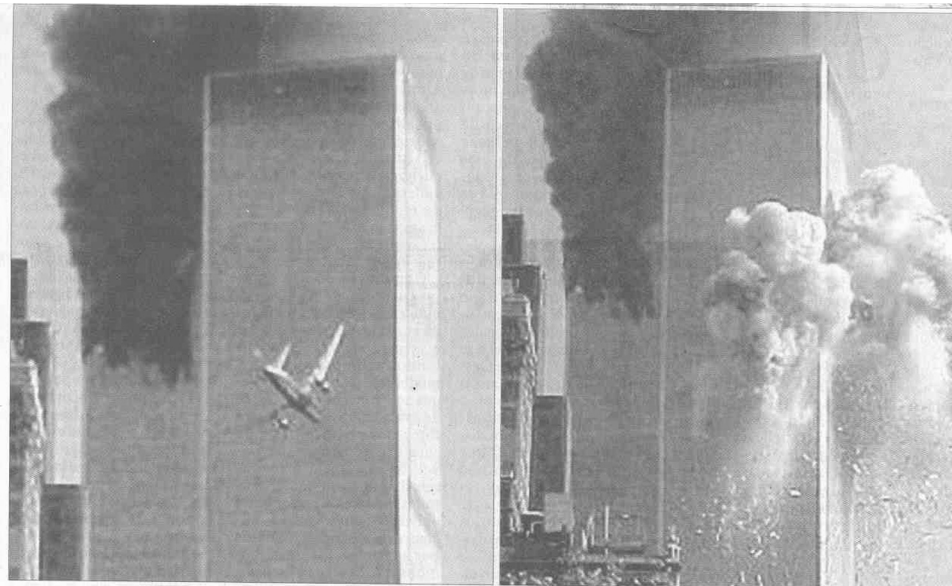
Incendio: 11 Set. 2001

Duración del incendio
Torre NorteWTC1: 102 min
Torre SulWTC2: 56 min
TorreWTC 7: 8 h

colapsaron



75



11 de Septiembre de 2001

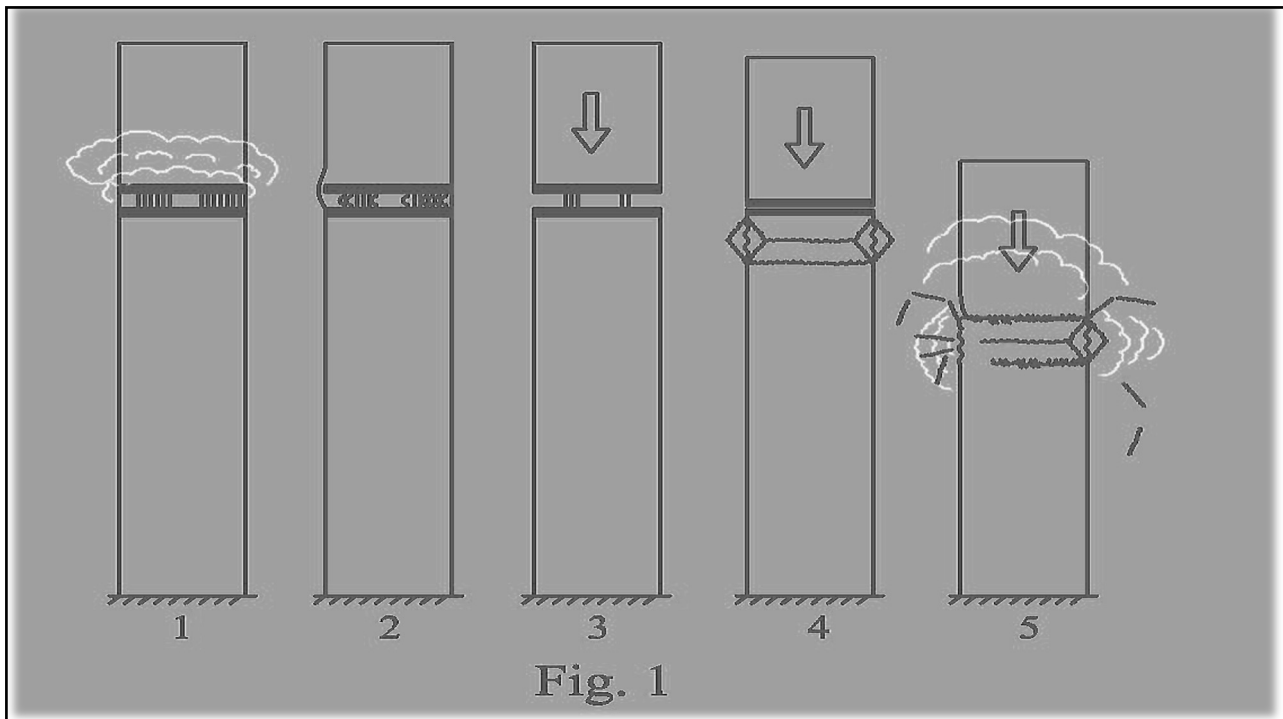
76

Resistencia y Estabilidad

Medidas indicaron que el impacto del Boeing 767-200 sometió al edificio a vibraciones semejantes a las de un sismo de índice 2,4 escala Richter

Esa vibración inducida tubo una amplitud del orden de la mitad de la máxima considerada por el efecto del viento

77

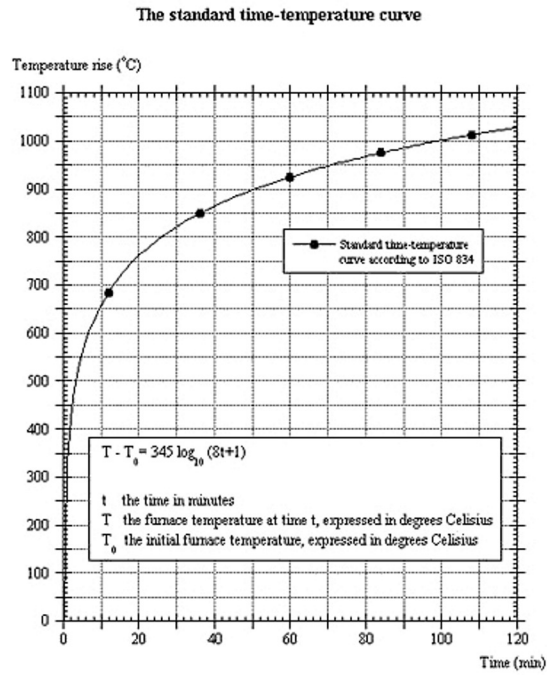


78

**Incendio
standard**

**Crecimiento
de la
temperatura**

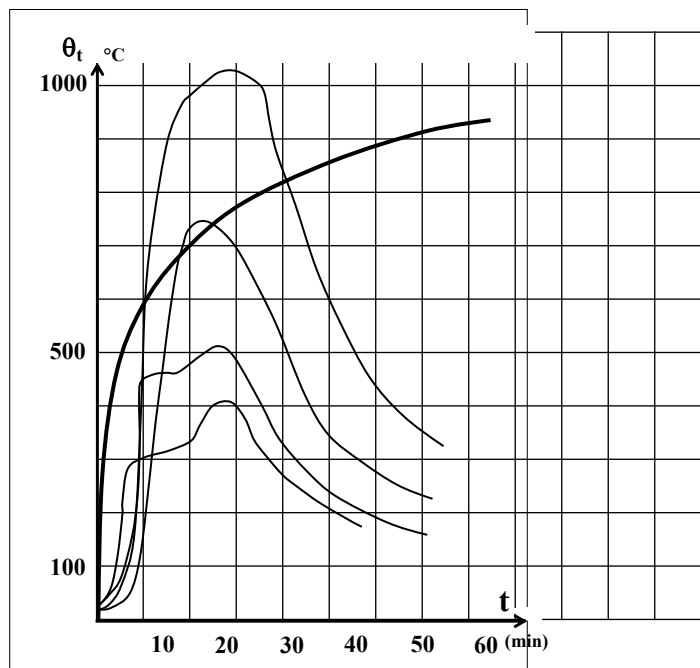
Curva ISO 834



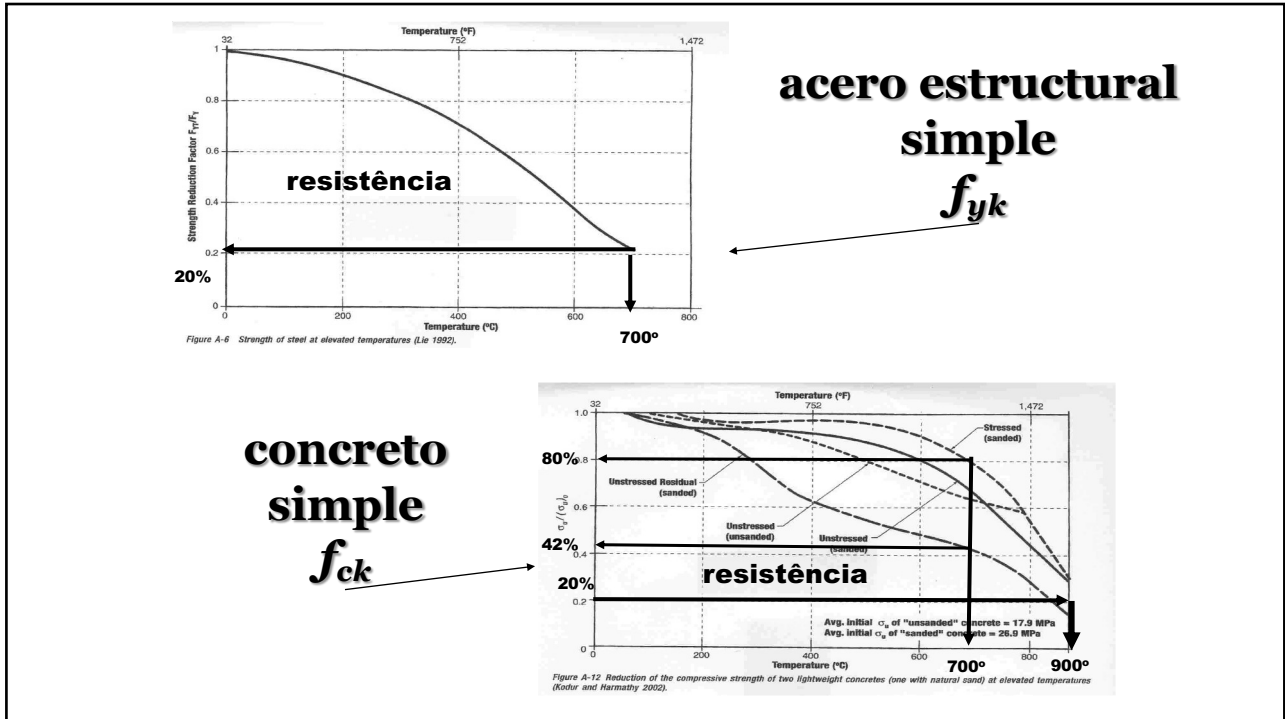
79

Incêndio real

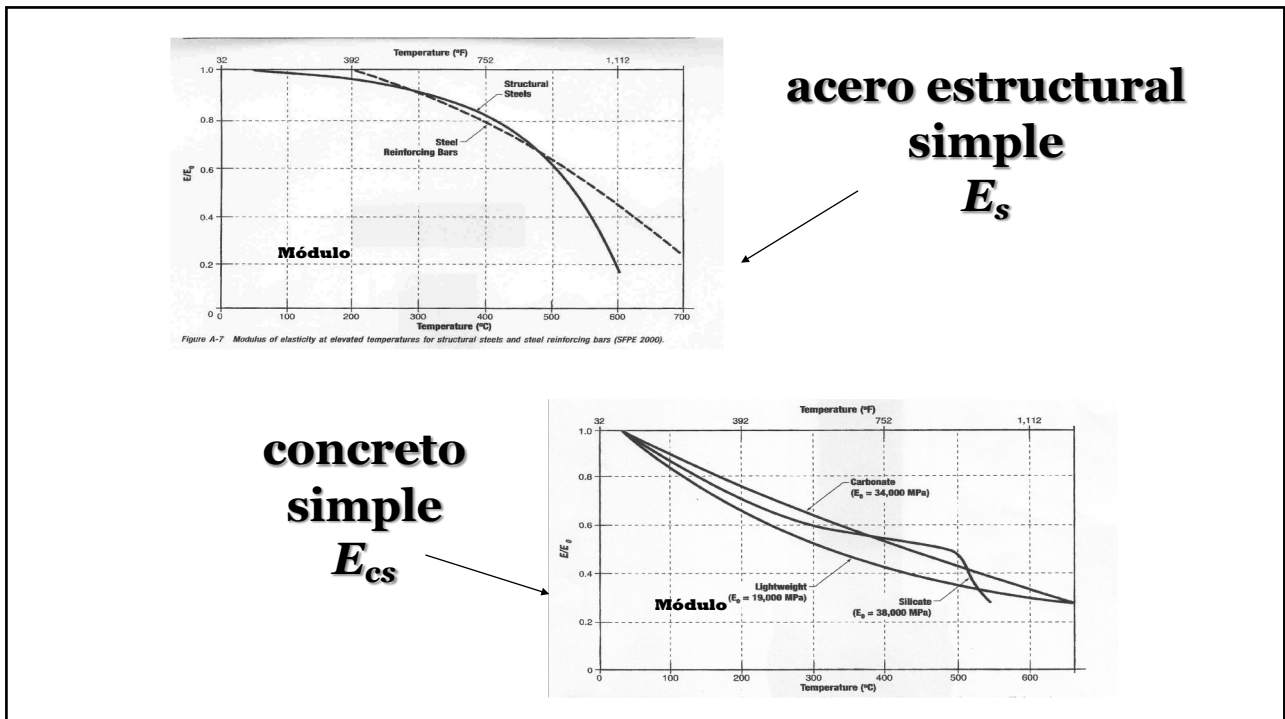
**depende de las
dimensiones,
forma, naturaleza
y volumen de la
carga térmica, y
de la ventilación,
ventanas, puerta,
aberturas...**



80



81



82

Distribución de la temperatura en perfiles de acero

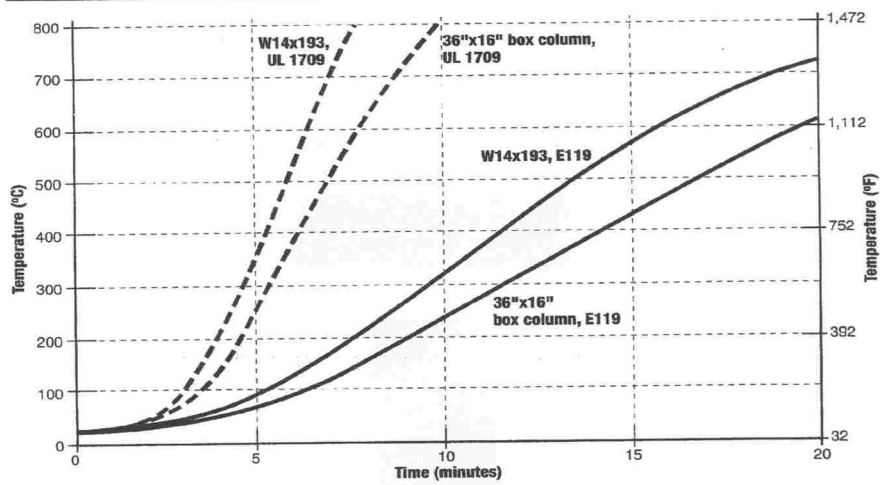


Figure A-9 Steel temperature rise due to fire exposure for unprotected steel column.

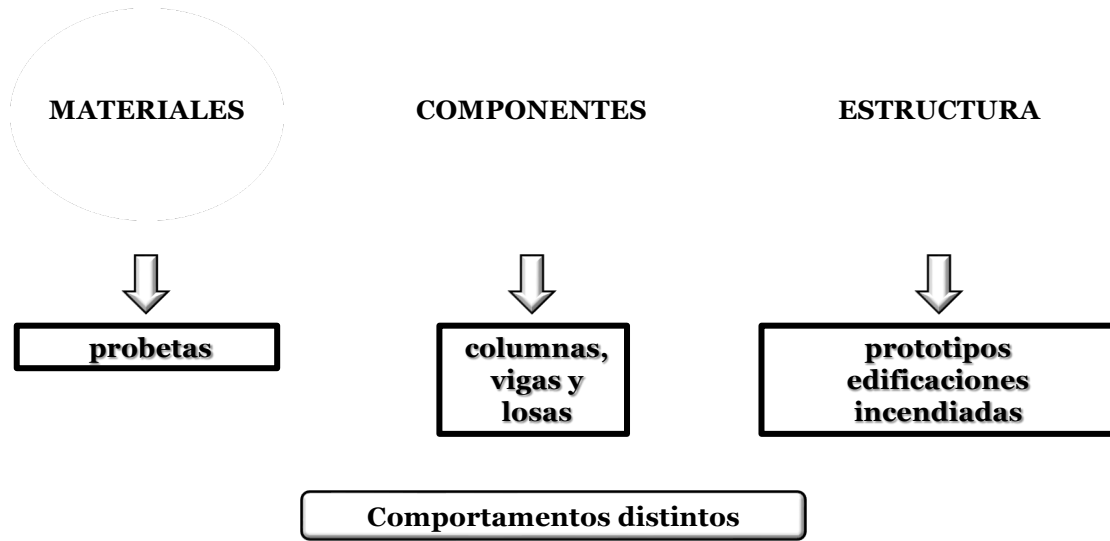
83

Distribución de la temperatura en una columna de concreto de 50 x 50 cm



84

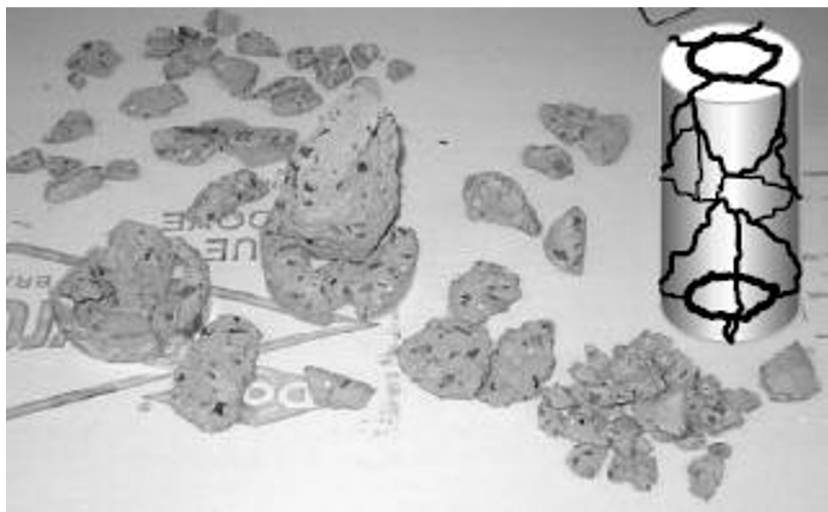
Ensayos



85

Constataciones

ensayos
en
probetas !



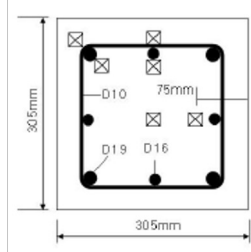
ensayos < 91 dias

(Phan, 2002)

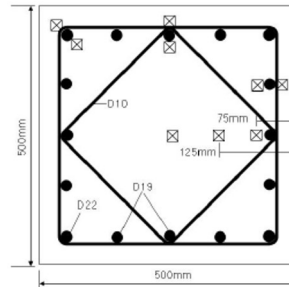
86

Constataciones

dimensiones/sección transversal



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



50 cm x 50 cm x 3,4 m

**columnas de 120 MPa
(mismo concreto, cuantía de
acero e intensidad de
cargamento)**

ensayos < 91 días

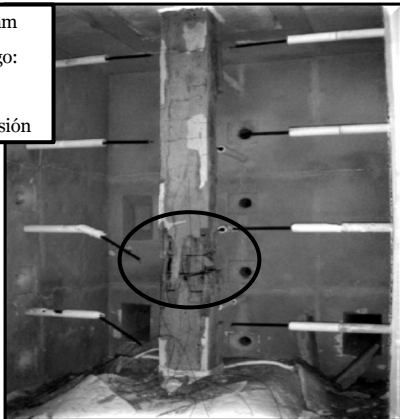
(Park et al., 2007)

87

Constataciones

dimensiones / sección transversal
 f_{ck} 120 MPa

Spalling: até 13 mm
Resistencia al fuego:
176 min
colapso por compresión



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



Spalling: de 0mm
até 5mm
Resistencia ao fogo:
240 min
no hubo colapso

50 cm x 50 cm x 3,4 m

ensayos < 91 días

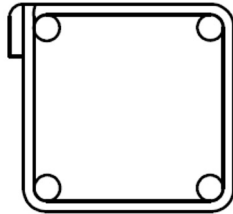
(Park et al., 2007)

88

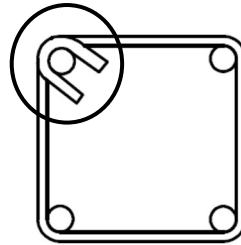
Constataciones

detalles / **armadura**

Elemento de concreto armado (columna)



(a) Configuração convencional de estribos



(b) Configuração modificada de estribos

**distribución de estribos:
0,75 veces del convencional**

ensayos < 91 días

(Kodur, 2005)

89

Constataciones

detalles / **armadura**



Configuração Convencional de Estribos

(Kodur, 2005)

f_{ck} 83 MPa

ensayos < 91 días



Configuração Modificada de Estribos

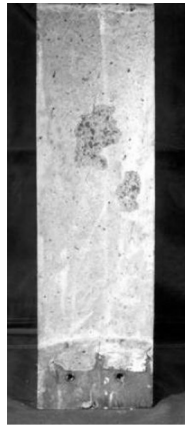
90

Constataciones

fibras de polipropileno



Sem.fibras



Com.fibras

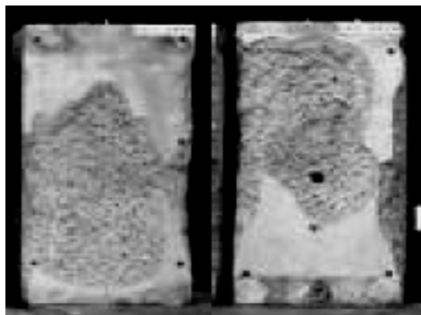
mayores
cantidades,
menores diámetros
y fibras más largas,
disminuen el
spalling

ensayos < 91 días

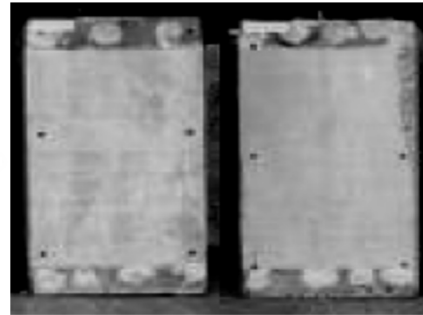
(Kawai, 2005)

91

Constataciones experimentales



63 días



1 año

influencia de la edad, del grado de hidratación y de la humedad

(Morita et al, 2002)

92

The Cardington Fire Test

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

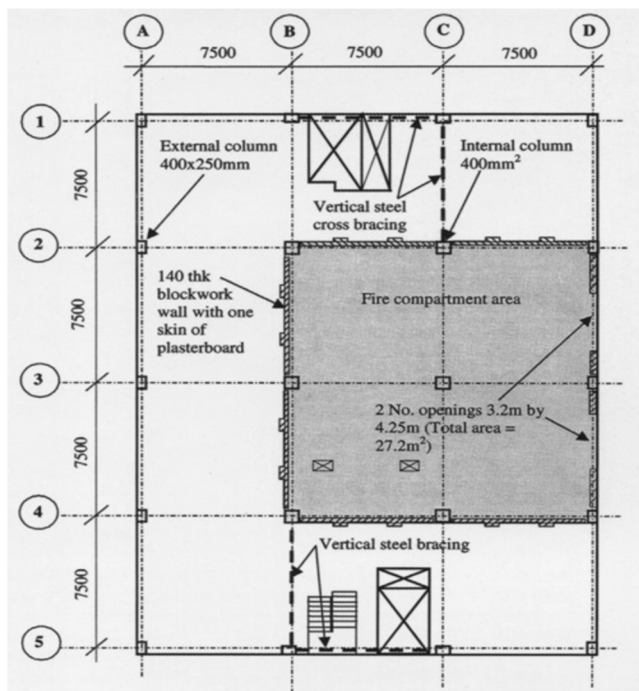
[Email this article](#)
[Printer friendly page](#)

- ✓ 7 pisos
- ✓ 25m de altura
- ✓ 3 x 4 de 7,5 m por 7,5 m
- ✓ Losa → espesor 15 cm
- ✓ Losa → $f_{ck} = 37$ MPa
- ✓ Vigas → $f_{ck} = 74$ MPa
- ✓ Recubrimiento → 2 cm
- ✓ Columnas → $f_{ck} = 100$ MPa
- ✓ Recubrimiento → 4 cm
- ✓ Agregados calcita y granito
- ✓ 2,7% fibras propileno
- ✓ Humedad alta



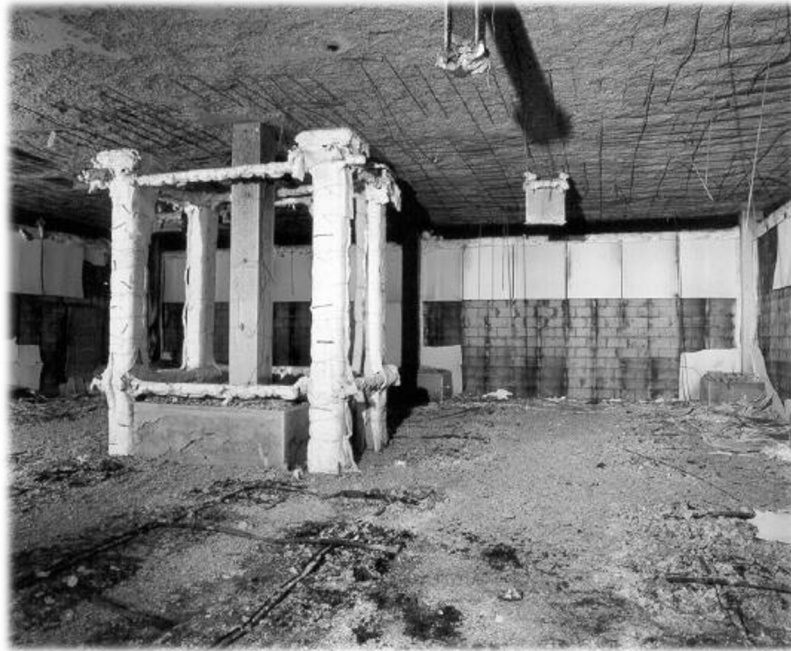
Cardington Concrete Building Frame

93



coquí mostrando la
localización del
compartimento de
incendio en el
prototipo

94



120 minutos de incêndio

95

Conclusiones

Investigación basada solamente en el comportamiento de los materiales no es suficiente para explicar el efectivo comportamiento de las estructuras bajo incendio

Columnas de concreto de alta resistencia (140 MPa), con 8 años de edad, bien armados, y recubrimiento nominal **$c = 25$ mm** y con **$c_1 = 47$ mm** resisten bien al incendio standard por hasta 3 h (180 minutos)

96



97



98



Fonte: Google Earth Pro / Marcos Carnaúba

99



Fonte: Google Earth Pro / Marcos Carnaúba

100

Paradoja!

- El Edificio Wilton Paes de Almeida, era de concreto armado y tenia cerca de 50 años de buenos servicios prestados a la comunidad.
- Edificios proyectados y construidos en concreto armado, no colapsaron frente a incendios.
- Pero.... el Edificio Wilton Paes de Almeida colapsó en apenas 80 minutos después del inicio del incendio !
 - Cual es la lección a aprender?

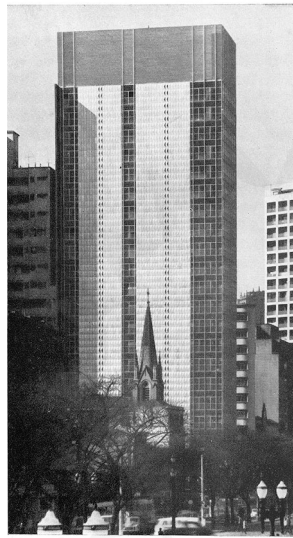
101

16h do dia 1 de mayo de 2018 !



102

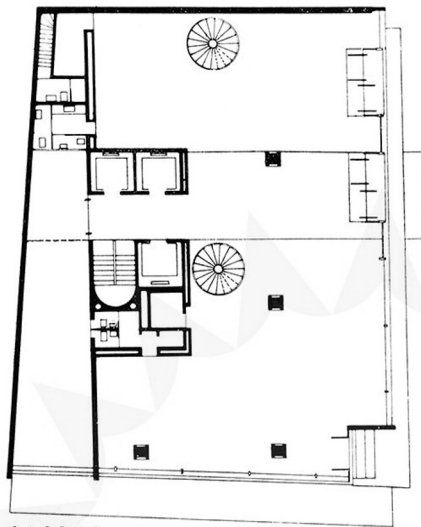
anamnesis *investigación*



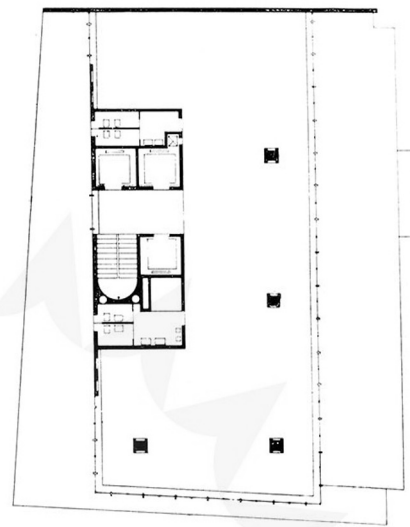
Revista Acrópole Número 323 Año 27 Noviembre 1965

103

anamnesis *investigación*



0 1 2 3 4 5 M
Pavimento térreo



Pavimento tipo

Revista Acrópole Número 323 Año 27 Noviembre 1965

104

anamnesis investigación



105



106



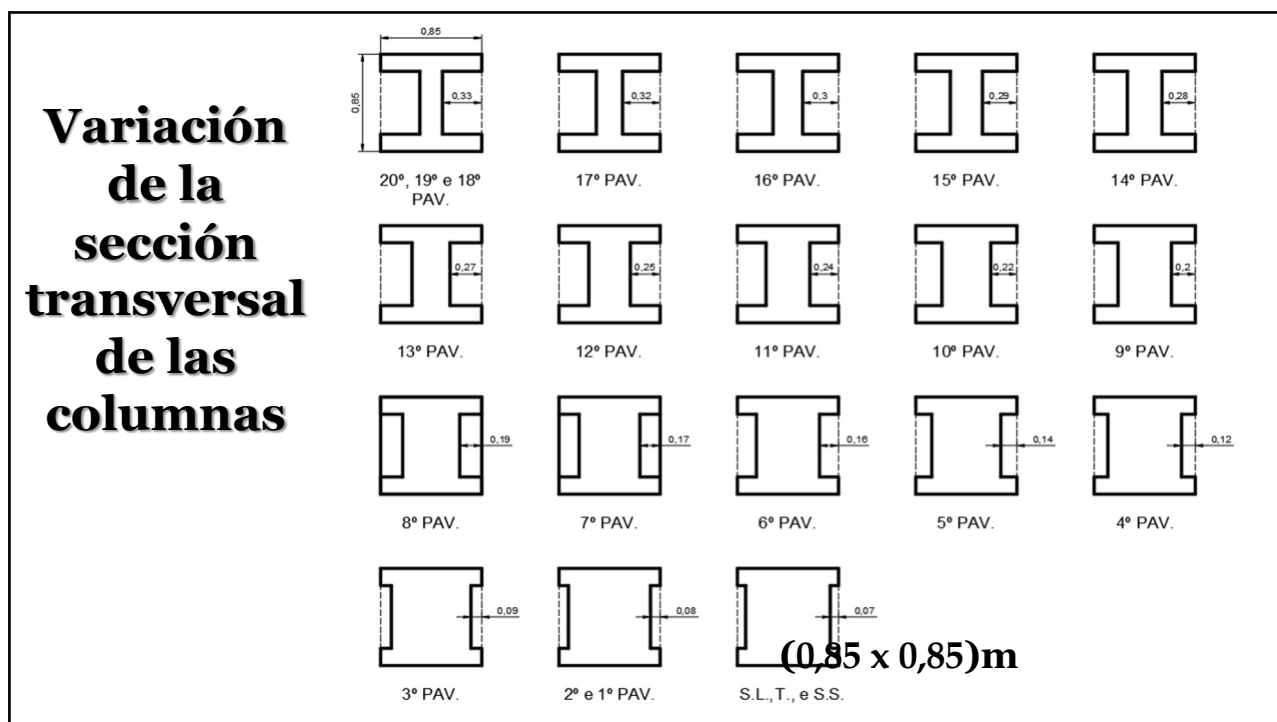
107



108

Geometría de las columnas

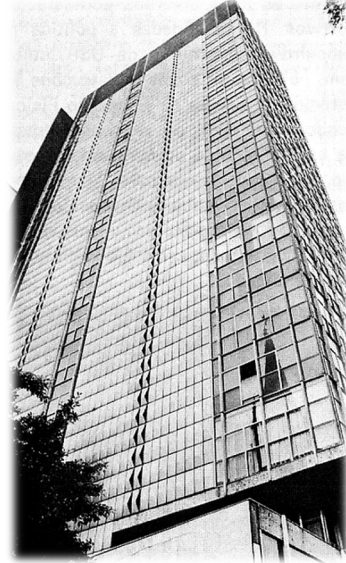
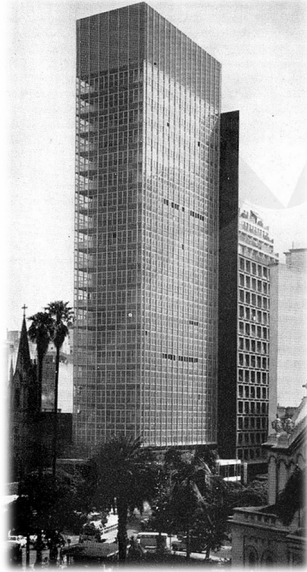
109



110

Arquitectura osada ?!

<http://www.arquivo.arq.br/edificio-wilton-paes-de-almeida>



111

Inició a la 1 h 30 (vídeo)



112



113



114

Después del desplóme...



115

coleta de muestras para ensayos



116

Plan de ensayos e investigación

- Levantamiento geométrico losa, viga y columna
- Conocimiento de la armadura: ensayo de tracción, doblado, alargue y ductilidad, composición química y metalografías
- Caracterización mineralógica del árido
- Extracción y ensayo de resistencia a la compresión, a la tracción y módulo de elasticidad
- Pacometría
- Ultrasonido y módulo dinámico
- Absorción de agua, índice de vacíos permeables y masas específicas
- Caracterización mineralógica por difracción de rayos X y análisis térmicos por ATD-TG
- Reconstitución de dosificación y consumo de cemento
- Profundidad de carbonatación
- Análisis del material granular
- Verificación (“especulación”) estructural

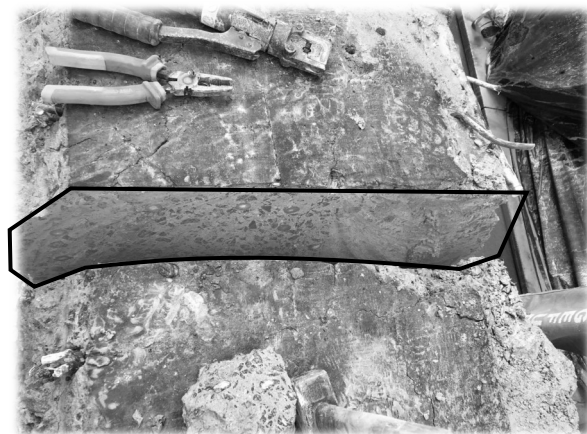


117

preparación de la muestra



- ✓ Corte de las barras con soplete de acetileno
 - ✓ Corte del concreto con hilo diamantado
- UPM Universidade Presbiteriana Mackenzie



118

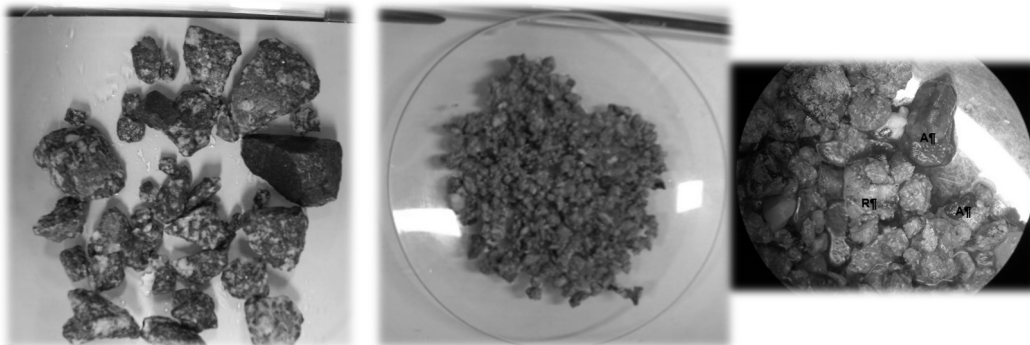
extracción de testigos



**Universidade
Presbiteriana
Mackenzie
UPM**

119

análisis petrográfica *Cláudio Sbrighi Neto*



- granito britado: roca ígnea, $D_{max} = 25$ mm
- arena gruesa lavada de río
- cuarzo preservado: el concreto debe haber experimentado temperaturas inferiores a 573°C ;
- áridos no estaban fisurados o fragmentados

120

reconstitución de dosificación

Las muestras de concreto fueron sometidas al tratamiento térmico y químico, siguiendo procedimientos de la ABCP (POT-GT 3016).

TABELA 1- Reconstituição do traço em partes de massa

Identificação da amostra	Composição	
	Cimento	Agregados
Pilar	1	5,9
Estrutura	1	6,2

121

contenido de cemento y propiedades del concreto

TABELA 2 – Determinação da absorção, índice de vazios e massa específica – NBR 9778

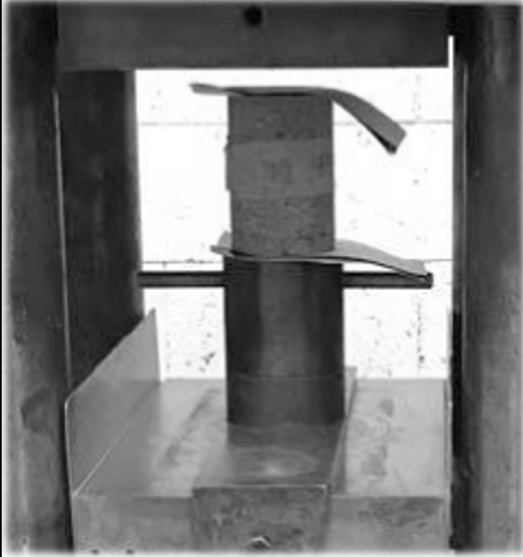
Ensaio	Amostra		
	Pilar	Estrutura	Concreto Carlos Brites
Absorção após imersão e fervura (%)	6,52	6,68	
Índice de vazios após saturação e fervura (%)	14,75	15,21	17,75
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	2,26	2,28	2,21

considerando grado de hidratación química correspondiente a

$0,3*(a/C) \rightarrow$ contenido de cemento de **309 kg/m³**

122

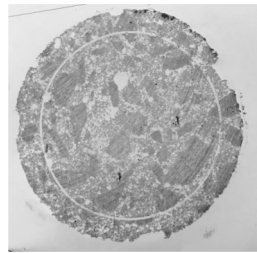
compresión



- ✓ ABNT NBR 7680 e NBR 5739
- ✓ Resistencia promedio de 21,8 MPa

$$f_{ck} = 15 \text{ MPa}$$

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland



123

tracción



- ✓ ABNT NBR 7222
- ✓ Resistencia promedio de **2,1 MPa**

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland



124

ultrasonido y módulo de elasticidad

Laboratorio de la PhD Engenharia, ensayo de ultrasonido y calculado el módulo de elasticidad dinámico, que en promedio fue de

27 GPa (equivalente a $E_{ci\ 0,3\ fc} = 24\text{GPa}$)

CP	Elongitudinal (GPa)	±	Eflexional (GPa)	±	Ultrassom (m/s)
08	19,8	0,13	12,31	0,13	3663
09	-	-	-	-	3788
10	-	-	-	-	3669

$$Vp = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 - 2\nu)(1 + \nu)}}$$

donde:

- ✓ Vp es la velocidad de ola longitudinal,
- ✓ E es el módulo de elasticidad,
- ✓ ν es el coeficiente de Poisson, y
- ✓ ρ es la masa específica del concreto.

125

espesura de carbonatación



2,5 cm a 3,0 cm

**Universidade
Presbiteriana
Mackenzie
UPM**

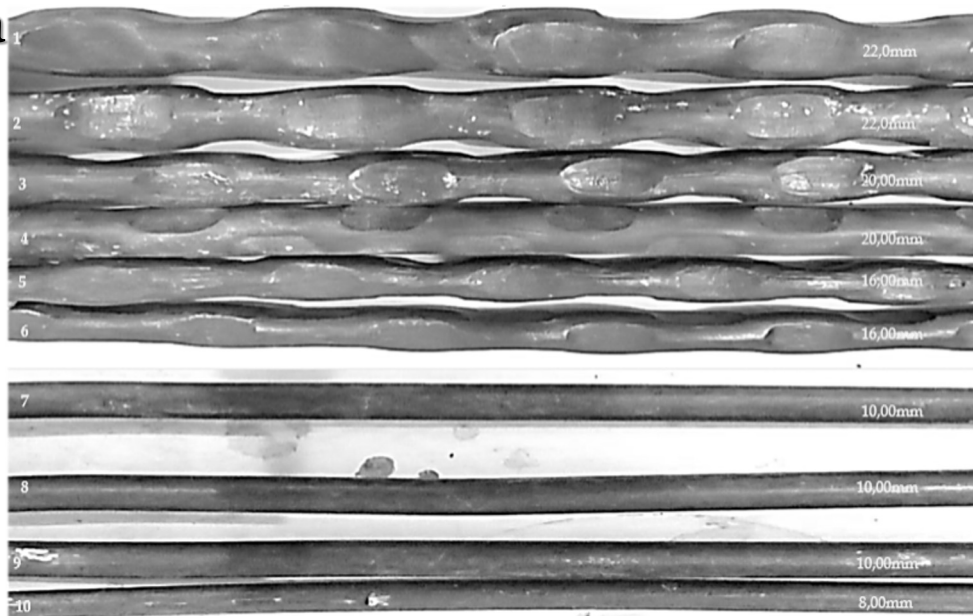
126

armadura

Barras longitudinais dentadas com diâmetro de 22, 20, e 16 mm.
CA 50B

Barras transversais lisas com diâmetro de 10 mm
CA 32 A

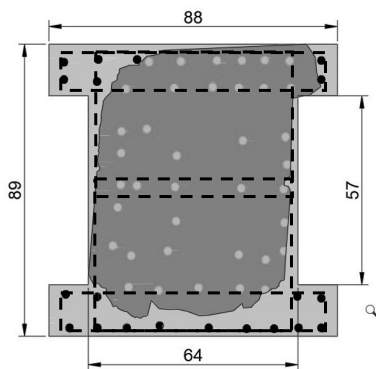
Barras complementares lisas com diâmetro de 8 mm.
CA 32 A



Laboratórios da ArcelorMittal

127

reconstituição de la sección transversal



- Seção da amostra
- Possível seção original
- Barras presentes na amostra
- Possível posição das barras faltantes

$A_c \sim 6464 \text{ cm}^2$
 $A_s \sim 216,7 \text{ cm}^2$ (CA-60 57 ϕ 22 mm)

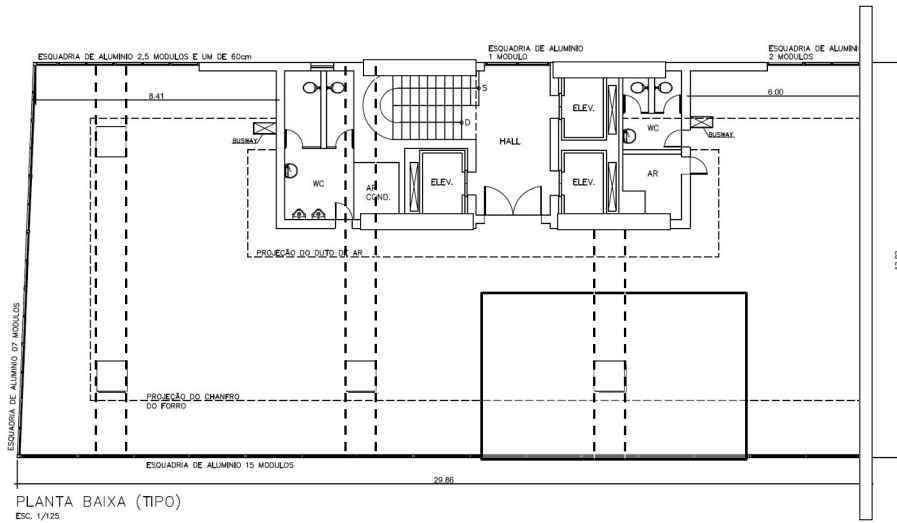
$c = 0,5 \text{ cm a } 4,0 \text{ cm}$
tramo de columna del 5º piso

espesor calcinado
obtido por análise
termogravimétrica,
termogravimétrica y difracción
de rayos X

$< 1,0 \text{ cm}$

128

verificación estructural

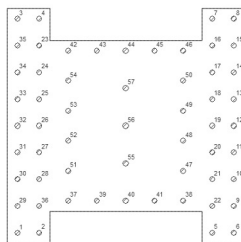


PLANTA BAIXA (TIPO)
ESC. 1/125

área de influencia (CAD) = ~47,4 m²

129

verificación estructural



$$N_d = A_c \times \sigma_{cd} + A_s \times \sigma_{sd}$$

$$\sigma_{sd} = E_s \times \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_{sd} = 21.000 \times 2\text{‰}$$

$$\sigma_{sd} = 42 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_d = 6464 \times 0,85 \times \frac{1,5}{1,4} + 216,7 \times 42$$

$$N_d = 13.800 \text{ kN ou } 1.380 \text{ tf}$$

$$N_k = 9.857 \text{ kN ou } 986 \text{ tf}$$

130

verificación estructural

capacidad de la columna sin momentos:

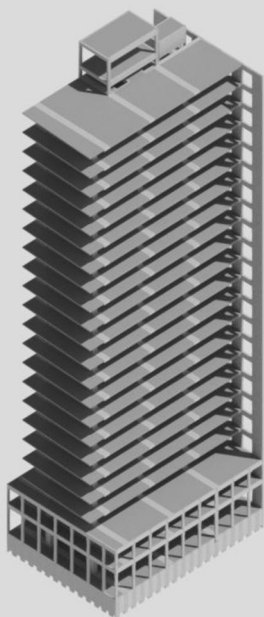
$$N_k \approx 986 \text{ tf}$$

correspondiente a cerca de 25 pisos →

geometría condice con tramo

entre 4º e 5º piso

131



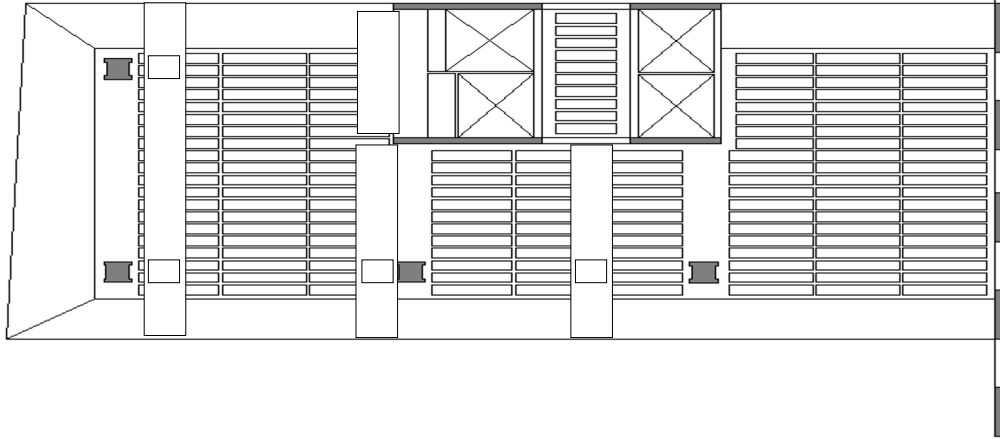
Modelo numérico de cálculo,
o pórtico espacial, simplificado,
elástico lineal, referente a las
solicitaciones, considerando
 $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ y módulo de
elasticidad de acuerdo con el
ensayo

$$E_{ci} = 24 \text{ GPa}$$

132

Vigas planas

Av. Rio Branco

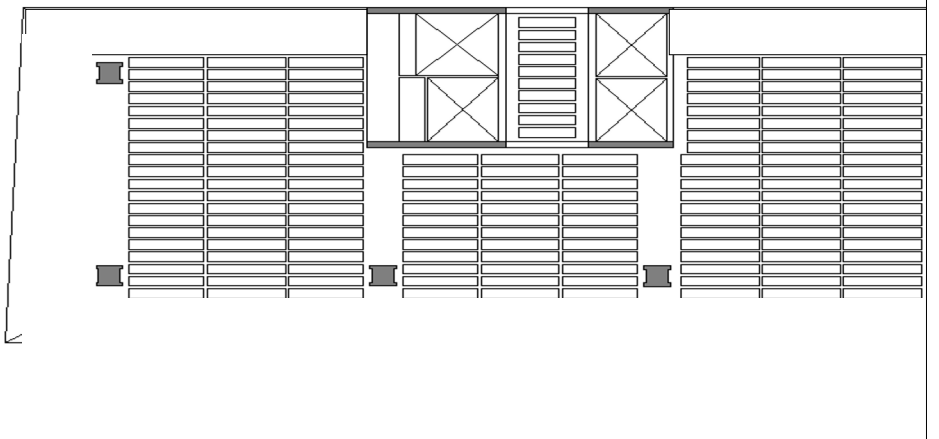


Av. Antônio de Godói

133

Losa maciza en voladizo

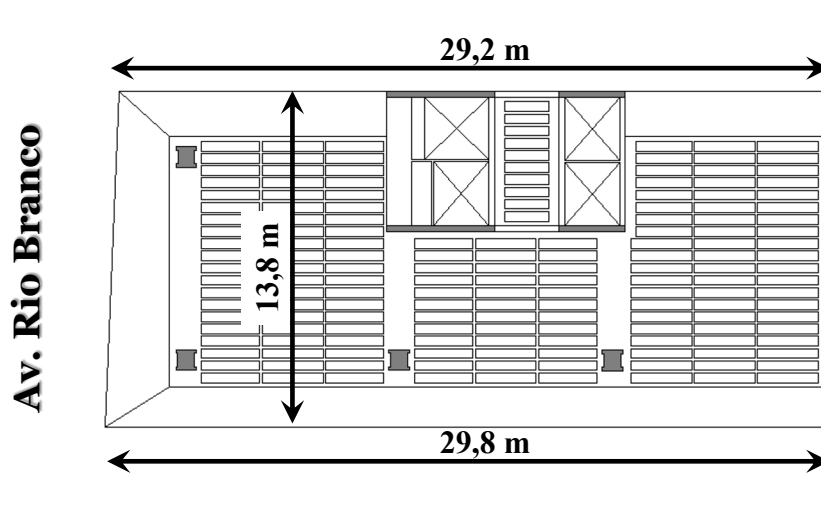
Av. Rio Branco



Av. Antônio de Godói

134

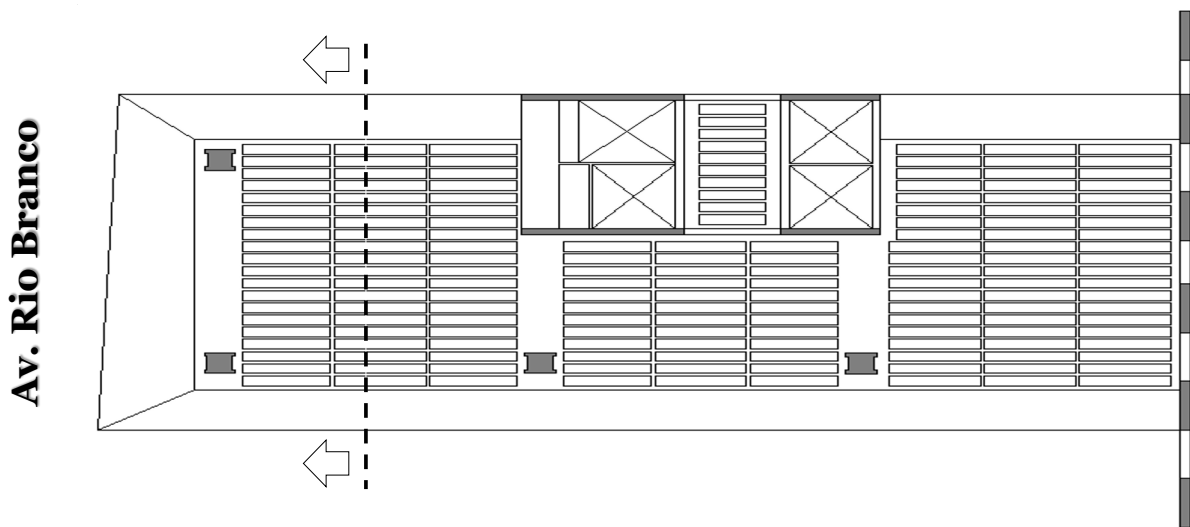
Geometría en planta



Av. Antônio de Godói

135

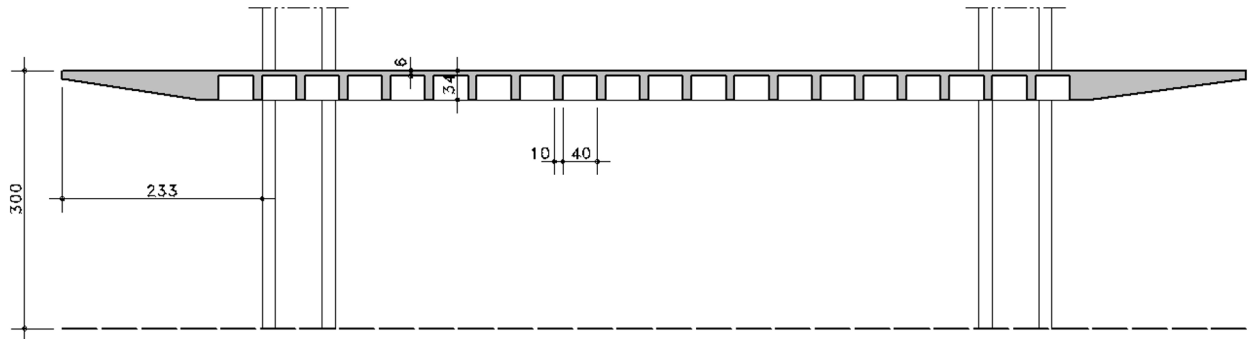
corte de la losa casetonada



Av. Antônio de Godói

136

corte de la losa casetonada



137

DEFORMACIONES ÚLTIMAS

***modelo ELU ($\gamma_F = 1,4$) con
variación térmica y con viento del
día 01.05.2018***

138

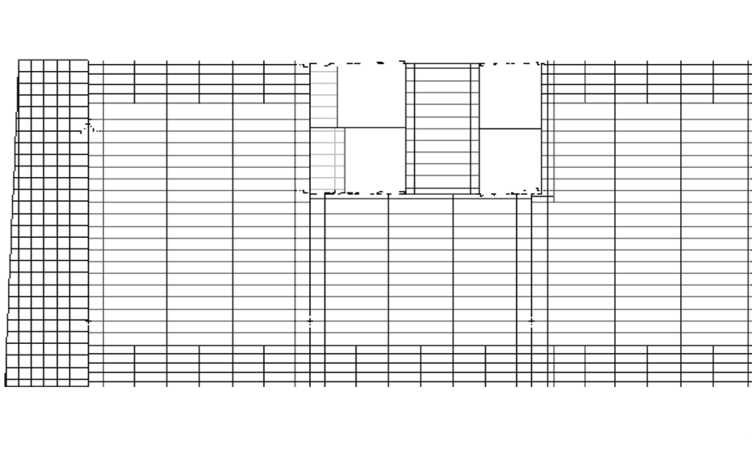


139



140

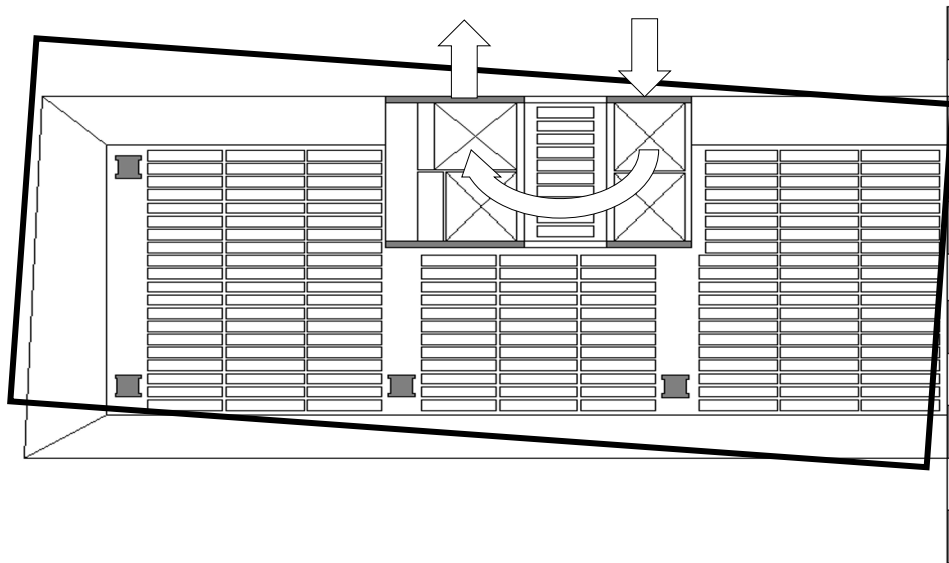
Restricción del edificio vecino adyacente



***Ed.
Caracu***

141

Hipótesis de la mecánica del colapso



142

Variación de 200° C:

ELU -> 28 cm

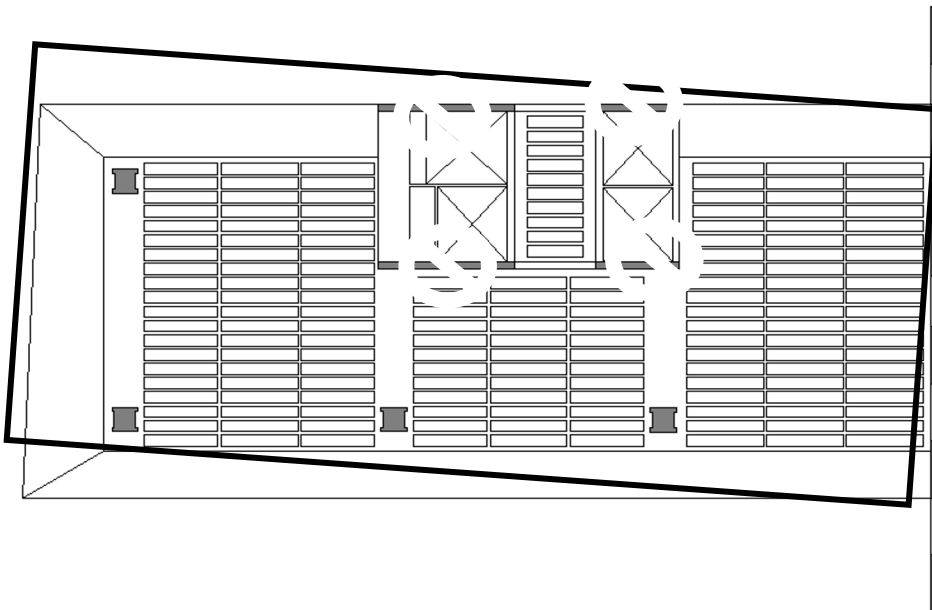
Variación de 500° C:

ELU -> 58 cm

temperatura → ocasionó aumento de 10 veces en el momento de las columnas de la caja de elevador, cuando comparado con el momento apenas debido a carga vertical.

143

Hipótesis de la mecánica del colapso



144



145

Lecciones aprendidas

1. Hay diferencias importantes entre comportamiento de material y de estructura
2. Estructura de Concreto mal proyectada puede colapsar en poco tiempo;
3. Revisar el diseño estructural bajo temperaturas elevadas (250° C)

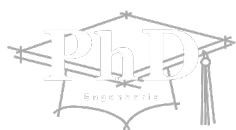
146

download free

www.phd.eng.br. → Publicações → Parecer Técnico → 2019.abr Ed.Wilton Paes...

→ Publicações → Teses Doutorado → 2008. Carlos Brites

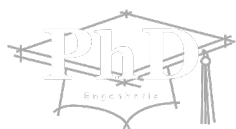
→ Publicações → Reportagem → → 2011. FAPESP incendio



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

147

MUCHAS GRACIAS !



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

paulo.helene@concretophd.com.br

www.concretophd.com.br

www.phd.eng.br

55.11.2501.4822

55.11.9.5045.4940

148