



Education and Culture DG

Lifelong Learning Programme  
LEONARDO DA VINCI



**Comportamiento frente al fuego de sistemas de forjado colaborante de acero**

*Revisión de ensayos frente al fuego a gran escala e incendios reales*

Olivier VASSART - Bin ZHAO

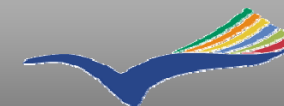
Oct. 2010



- **Ensayos de fuego de Cardington**
  - Ensayo de vigas con quemadores
  - Ensayo de estructuras con quemadores
  - Ensayos de esquinas con piletas de madera
  - Ensayos de demostración con mobiliario de oficina real
- **Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**
  - Ensayos localizados de fuego en vehículos
- **Pruebas de incendios accidentales en edificios reales y otros ensayos de fuego fuera de Europa**
  - Incendios accidentales
  - Otros ensayos frente al fuego



## Ensayos de fuego de Cardington



- Edificio de estructura de acero de ocho plantas

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



Unión viga con viga



Unión viga con columna



- **Parámetros principales del edificio**

- **Longitud: 42 m en 5 luces de 9 m**
- **Anchura: 21 m en 3 luces de 6 m, 9 m y 6 m**
- **Altura por planta: 4,2 m**
- **Elementos de acero: VD para vigas y CD para columnas**
- **Forjado colaborante: hormigón ligero con profundidad total de 130 mm y cubierta trapezoidal de acero**
- **Malla de acero: 142 mm<sup>2</sup>**
- **Juntas de acero: uniones con cartela para juntas viga-viga y uniones con chapa de borde flexible para juntas viga-columna**
- **Carga aplicada: sacos de arena**

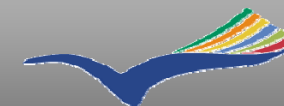
Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



# Ensayos de fuego de Cardington

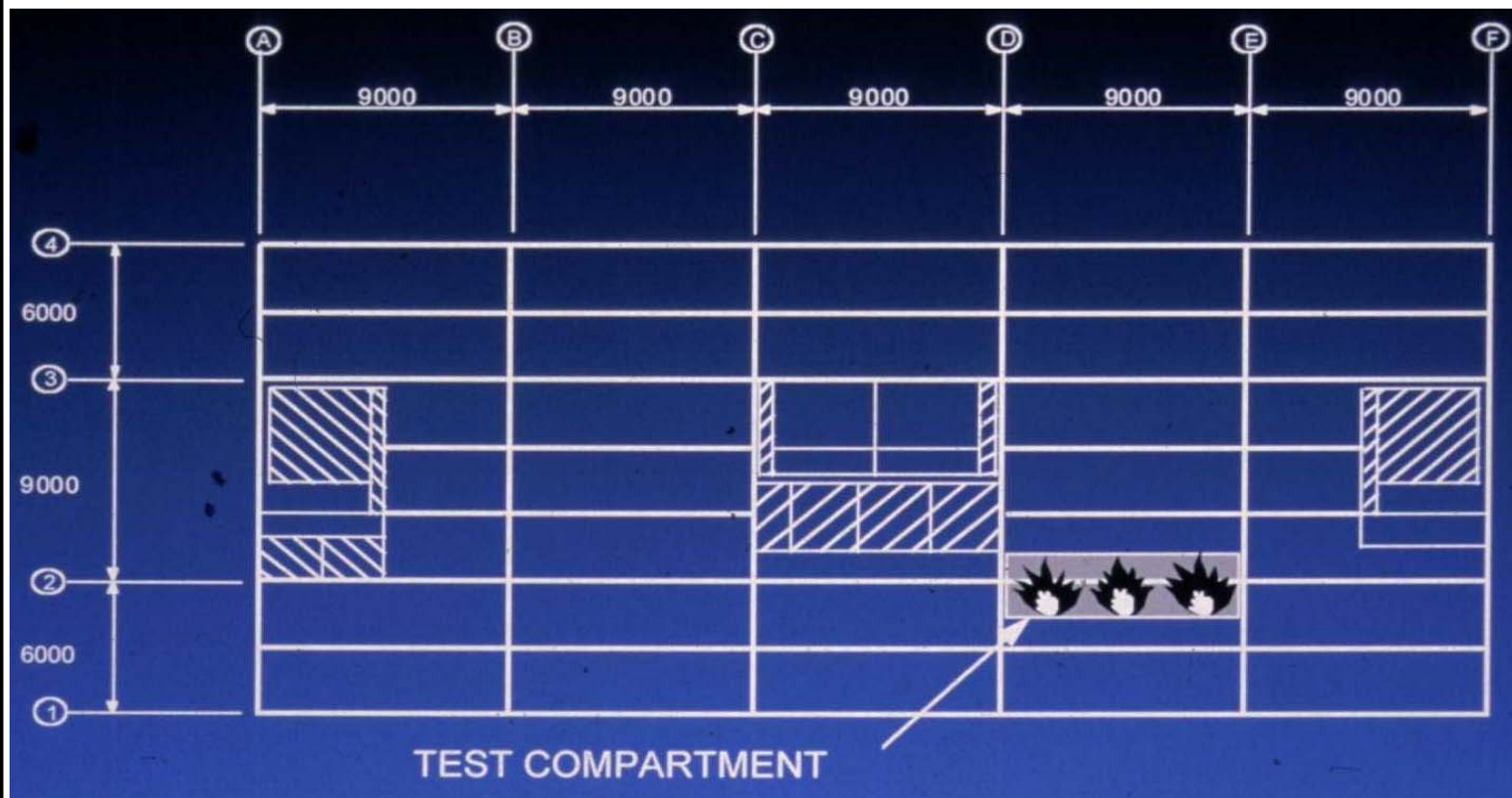


- Ensayo de viga arriostrada: luz = 9,0 m

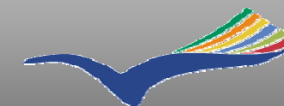
Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

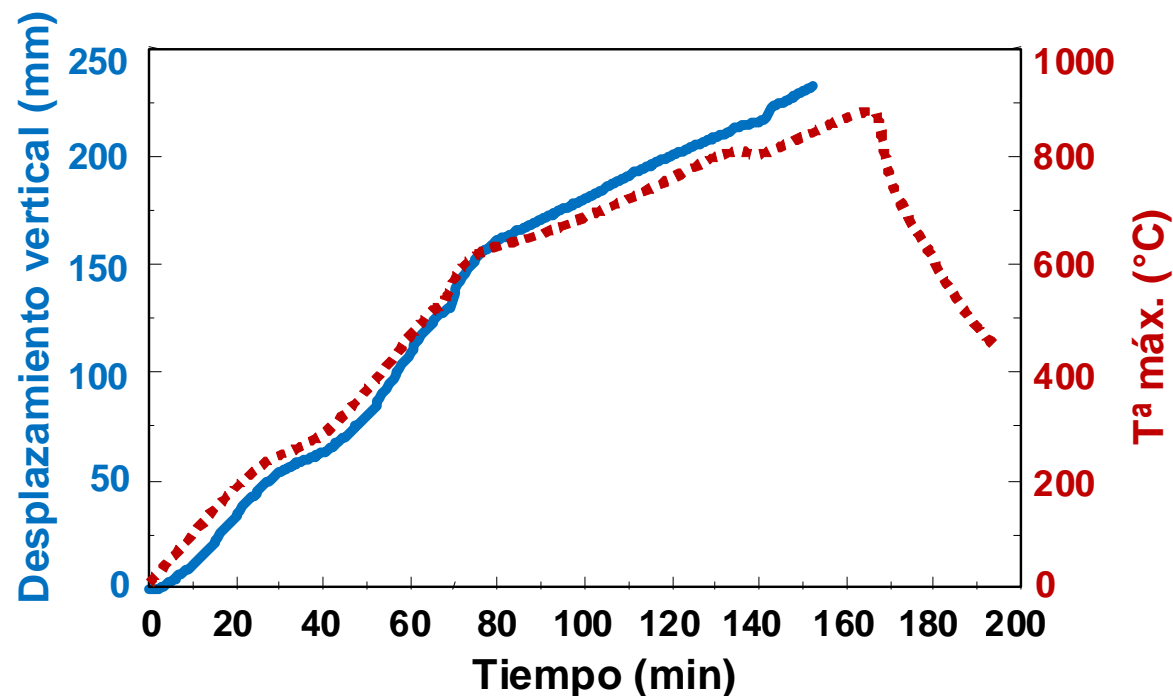
Pruebas de  
incendio  
accidental







- **Ensayo de viga arriostrada: resultados experimentales**



- **Observación**

- Calentamiento máximo  $\approx 900$  °C
- Flecha de la viga:  $< 250$  mm

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

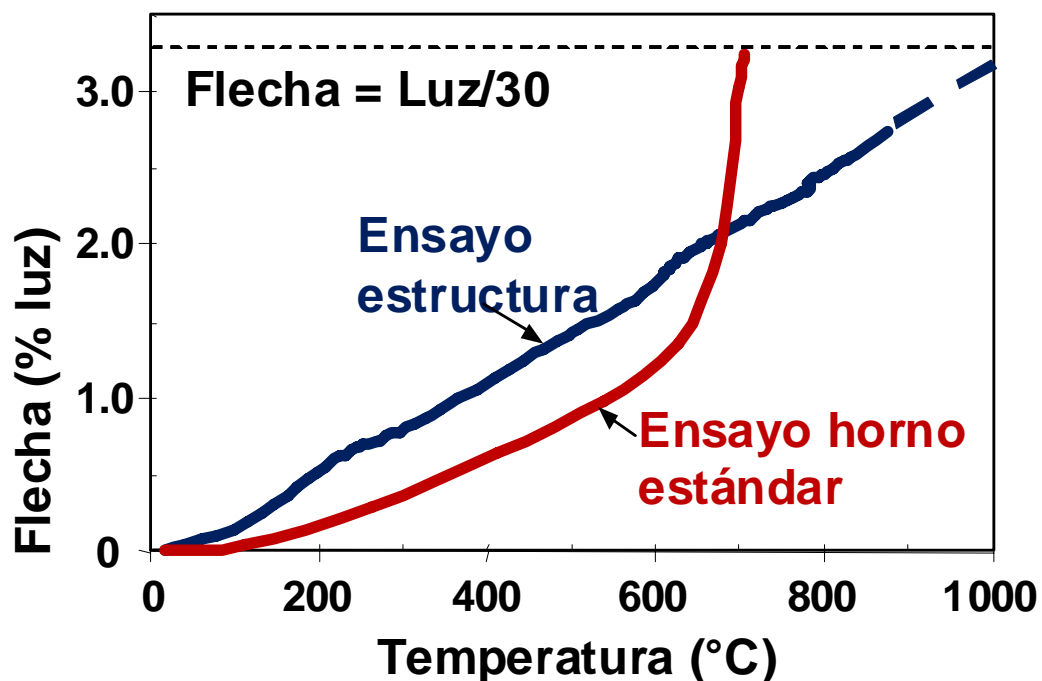
Pruebas de  
incendio  
accidental



## Ensayos de fuego de Cardington



- Comparación con ensayo de fuego en horno estándar



- **Conclusión**
  - No hay signos de fallo en el sistema global de forjado colaborante
  - Se produce colapso a  $\theta \approx 650$  °C si existe un soporte sencillo

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



# Ensayos de fuego de Cardington

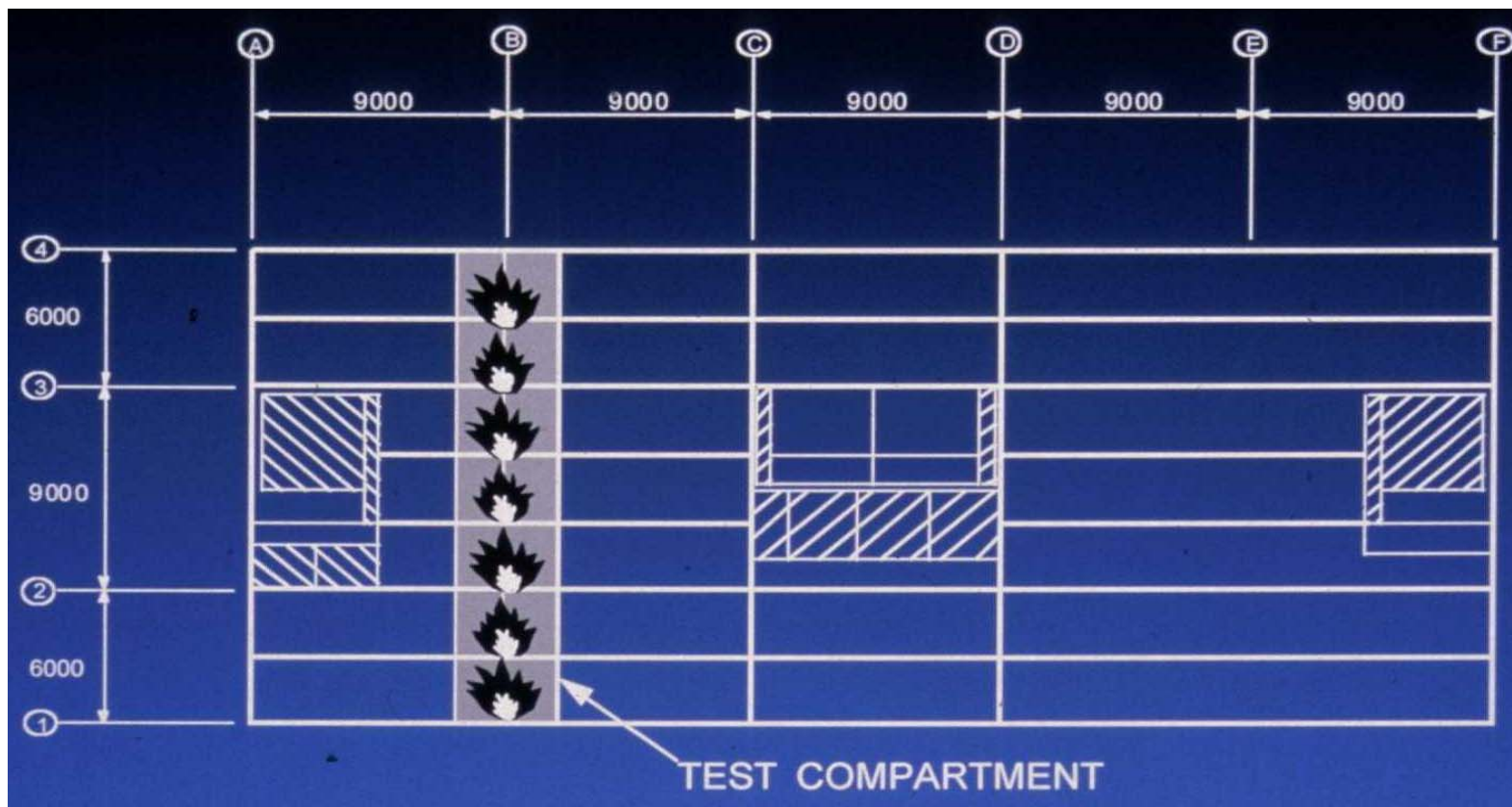


- Ensayo de viga de estructura plana

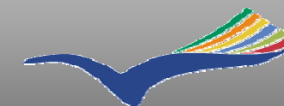
Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

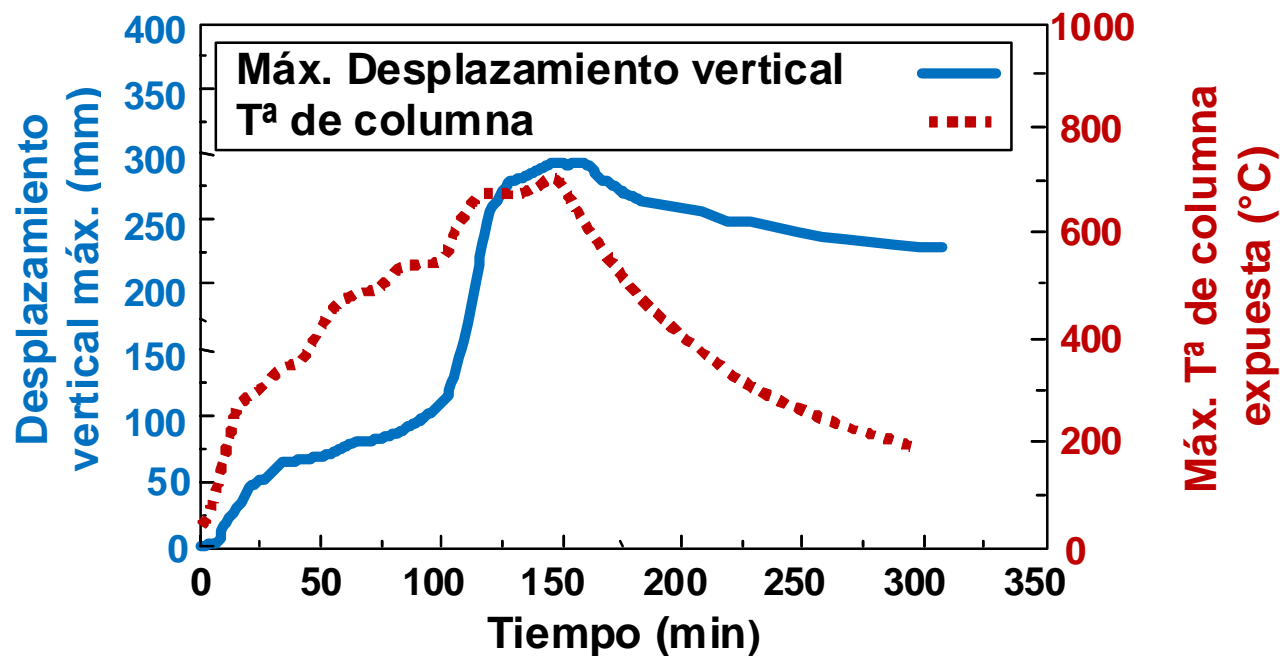
Pruebas de  
incendio  
accidental







- Ensayo de estructura plana: resultados experimentales



- Observación
  - Calentamiento máximo  $\approx 750$  °C
  - Flecha de la viga  $\approx 300$  mm

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



## Ensayos de fuego de Cardington



- Estado deformado de la parte caliente del forjado



Ensayos de  
fuego de  
Cardington

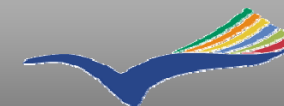
Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

- **Conclusión**
  - Aplastamiento de la parte desprotegida de la columna
  - No hay colapso adicional a pesar del fallo local anterior



# Ensayos de fuego de Cardington

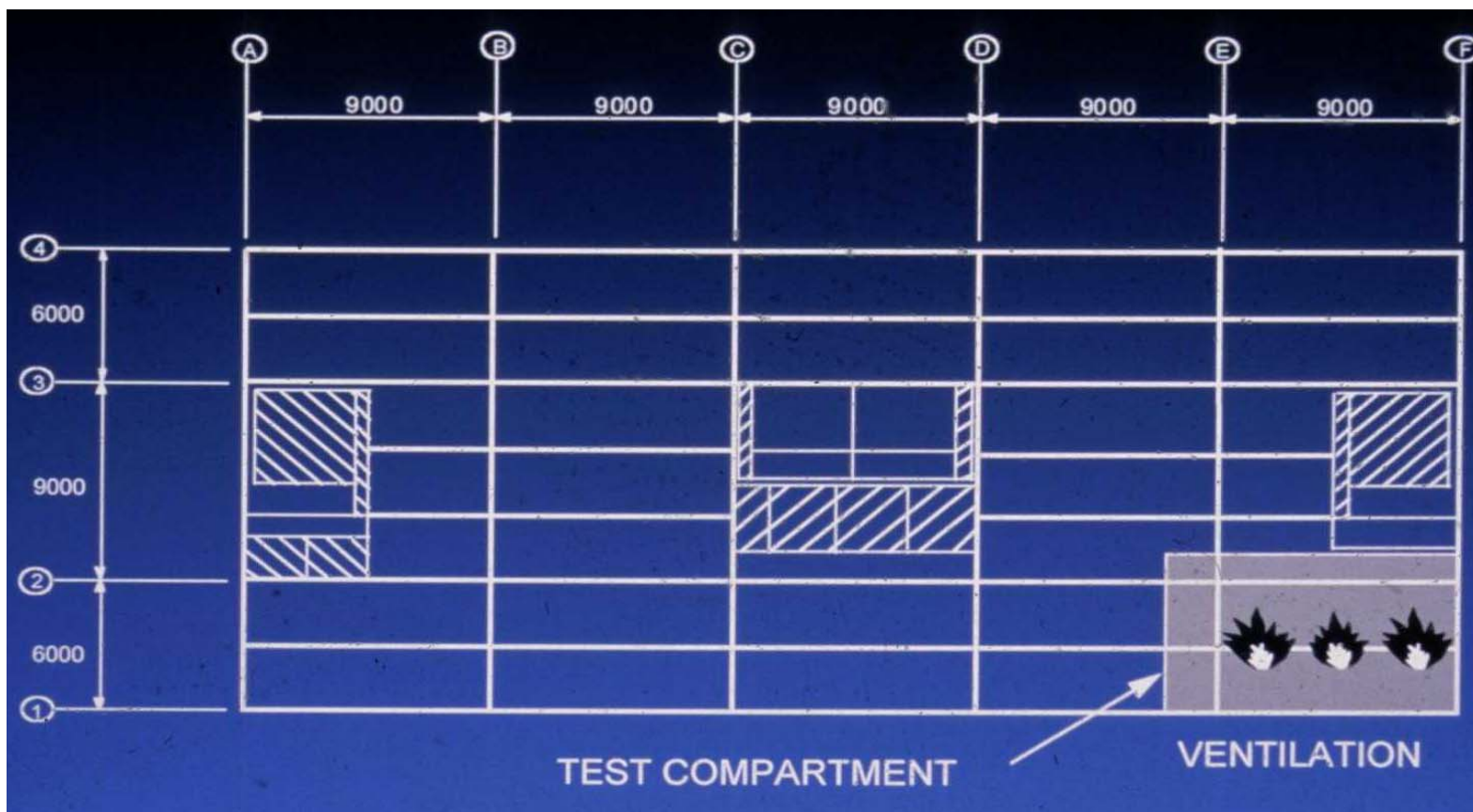


- Ensayo del sector de esquina

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental





## Ensayos de fuego de Cardington



- **Ensayo del sector de esquina: configuración**

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

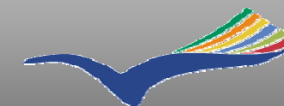


**Muros del sector con  
bloques de hormigón  
huecos**

**La carga de fuego con  
piletas de madera es igual  
a 45 kg/m<sup>2</sup>**







- **Ensayo del sector de esquina: resultados experimentales**

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



**Fuego durante el  
ensayo**

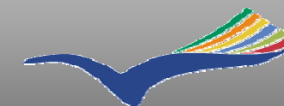
**Forjado  
deformado tras el  
ensayo**



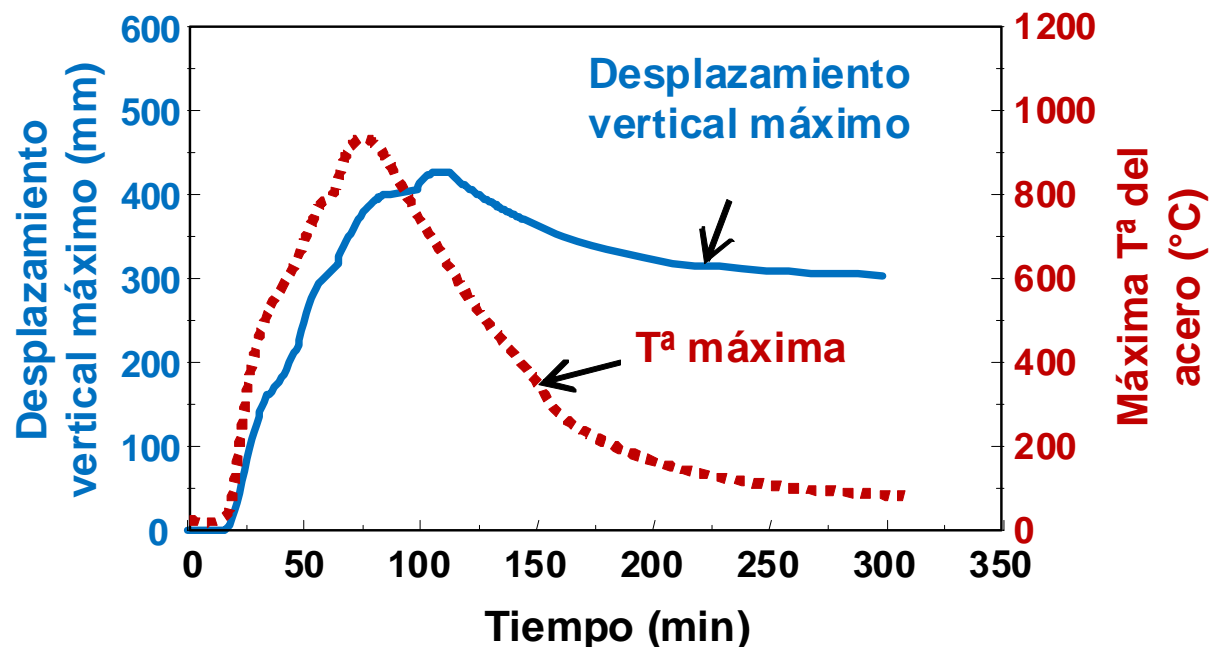




## Ensayos de fuego de Cardington



- Ensayo del sector de esquina: resultados experimentales



Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

- Observación
  - Calentamiento máximo del acero  $\approx 1014$  °C
  - Flecha máxima del forjado  $\approx 428$  mm



## Ensayos de fuego de Cardington



- **Ensayo del sector de esquina: estructura tras el ensayo**



Estado deformado de la parte caliente del forjado colaborante



Estado deformado de los elementos de acero alrededor de la columna de acero protegida

- **Conclusión**
  - **No hay signos de fallo global ni de flecha limitada del forjado a pesar del calentamiento significativo del acero**

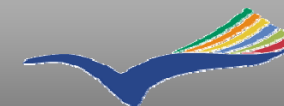
Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



## Ensayos de fuego de Cardington

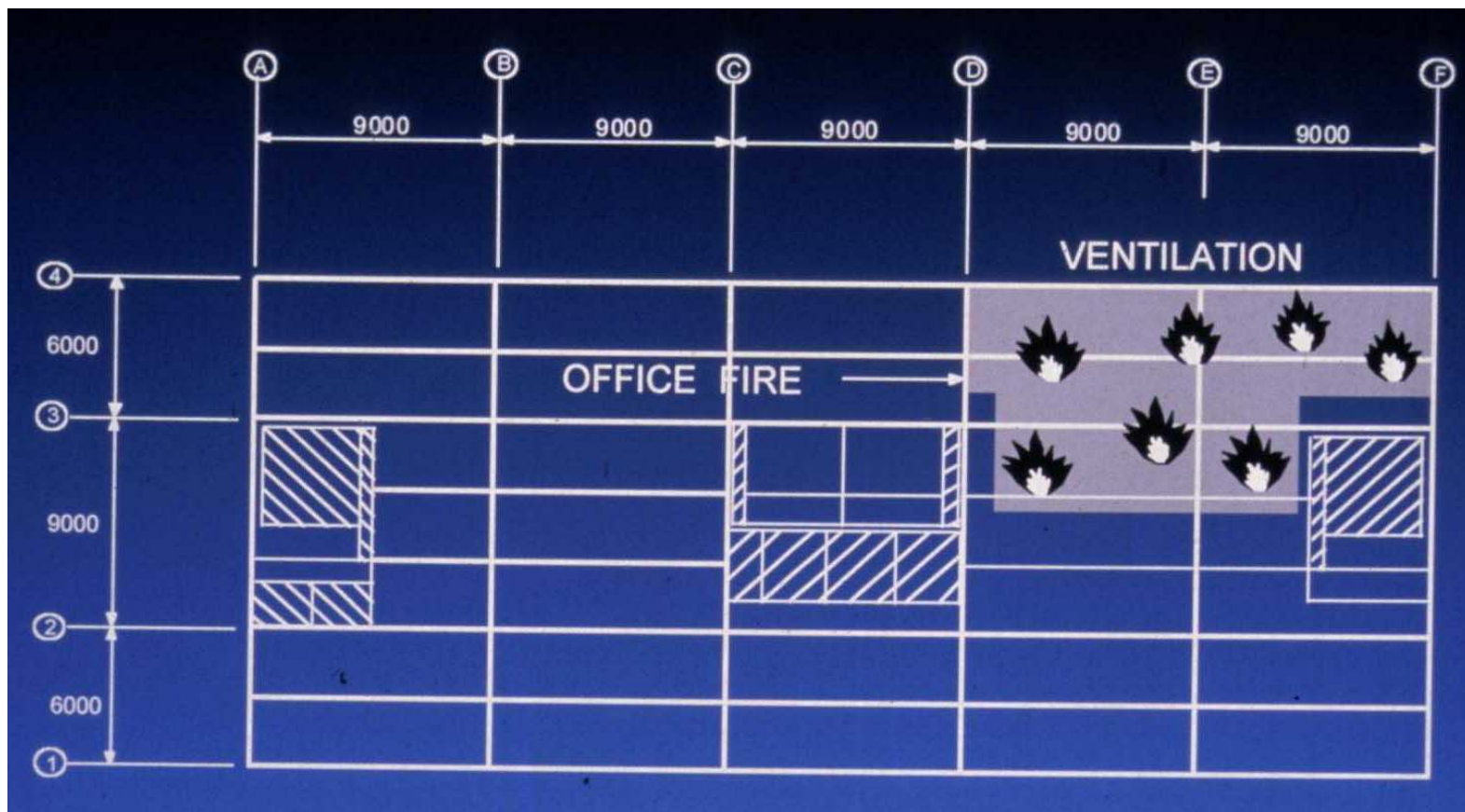


- Ensayo de demostración (superficie superior a 130 m<sup>2</sup>)

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental





## Ensayos de fuego de Cardington



- **Ensayo de demostración: configuración**

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

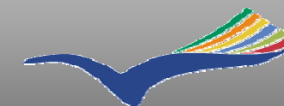


**Carga de fuego  
con mobiliario de  
oficina real**

**Aperturas con ventanas  
de acristalamiento  
normal**







- **Ensayo de demostración: resultados experimentales**

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

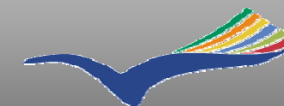


**Fase temprana del  
incendio**

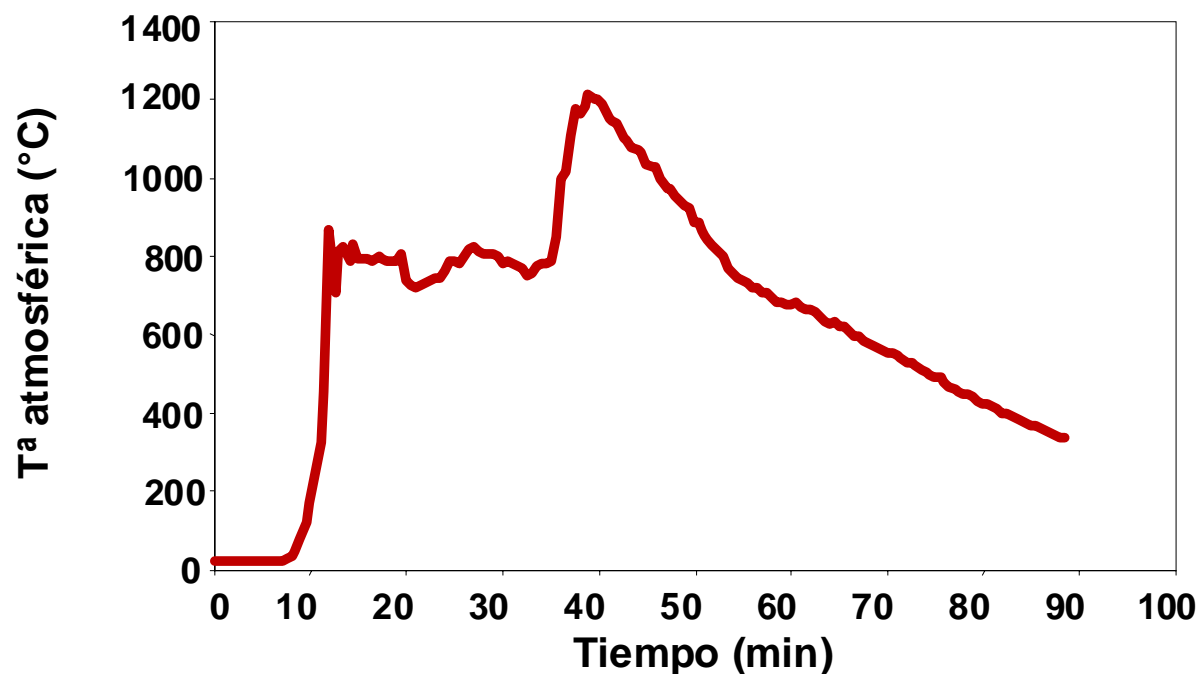
**Incendio de desarrollo  
completo**







- **Ensayo de demostración: resultados experimentales**



- **Observación**
  - Temperatura máxima del gas  $\approx 1200$  °C
  - Calentamiento máximo del acero  $\approx 1150$  °C

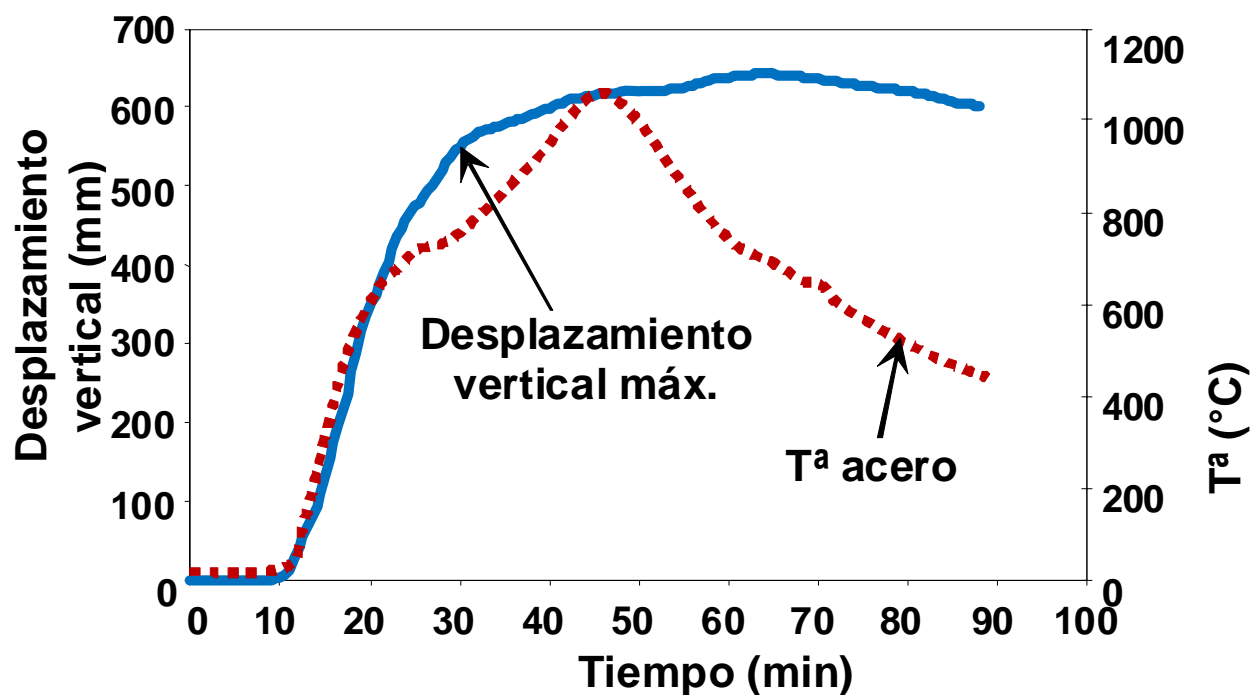
Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



- **Ensayo de demostración: resultados experimentales**



- **Observación**

- Flecha importante del forjado  $\approx 640$  mm
- No se produce colapso del forjado

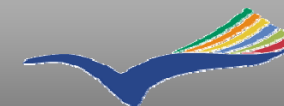
Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental



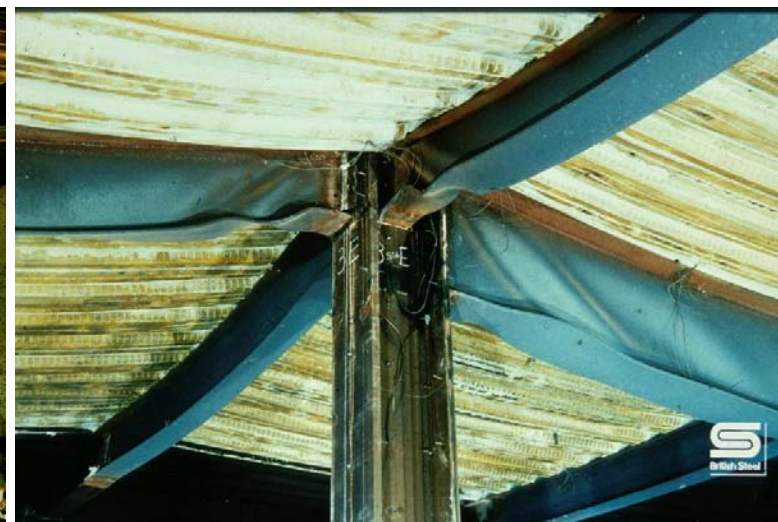
## Ensayos de fuego de Cardington



- **Ensayo de demostración: estructura tras el ensayo**



Estado deformado de la parte caliente del forjado colaborante



Estado deformado de los elementos de acero alrededor de la columna de acero protegida

- **Conclusión**
  - **No hay señal de fallo global del forjado a pesar del calentamiento significativo del acero y de la flecha del forjado**

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

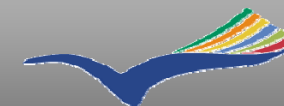


Ensayos de  
fuego de  
Cardington

Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental

- **Otros ensayos frente al fuego**
  - **Ensayo de la segunda esquina**
  - **Ensayo de sector de incendios grande**
  - **Ensayo de sector de incendios central**



- **Observaciones generales**

- Se realizaron gran cantidad de ensayos de incendios graves en este edificio de estructura de acero sin producirse colapso de la estructura global
- **Se observó un mejor comportamiento frente al fuego que con ensayos de fuego estándar con elementos de acero aislados**
- **Comportamiento global excelente de los forjados colaborantes, incluso si las vigas de acero se calientan por encima de los 1000 °C**
- **Mejora sustancial de la resistencia al fuego del forjado colaborante gracias al efecto membrana inducido por una gran flecha**
- Buena resistencia estructural del sistema de forjado colaborante ante un agrietamiento importante del hormigón

Ensayos de  
fuego de  
Cardington

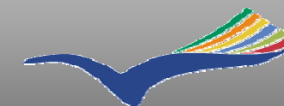
Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre

Pruebas de  
incendio  
accidental





## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- Edificio de estructura de acero de una planta



Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

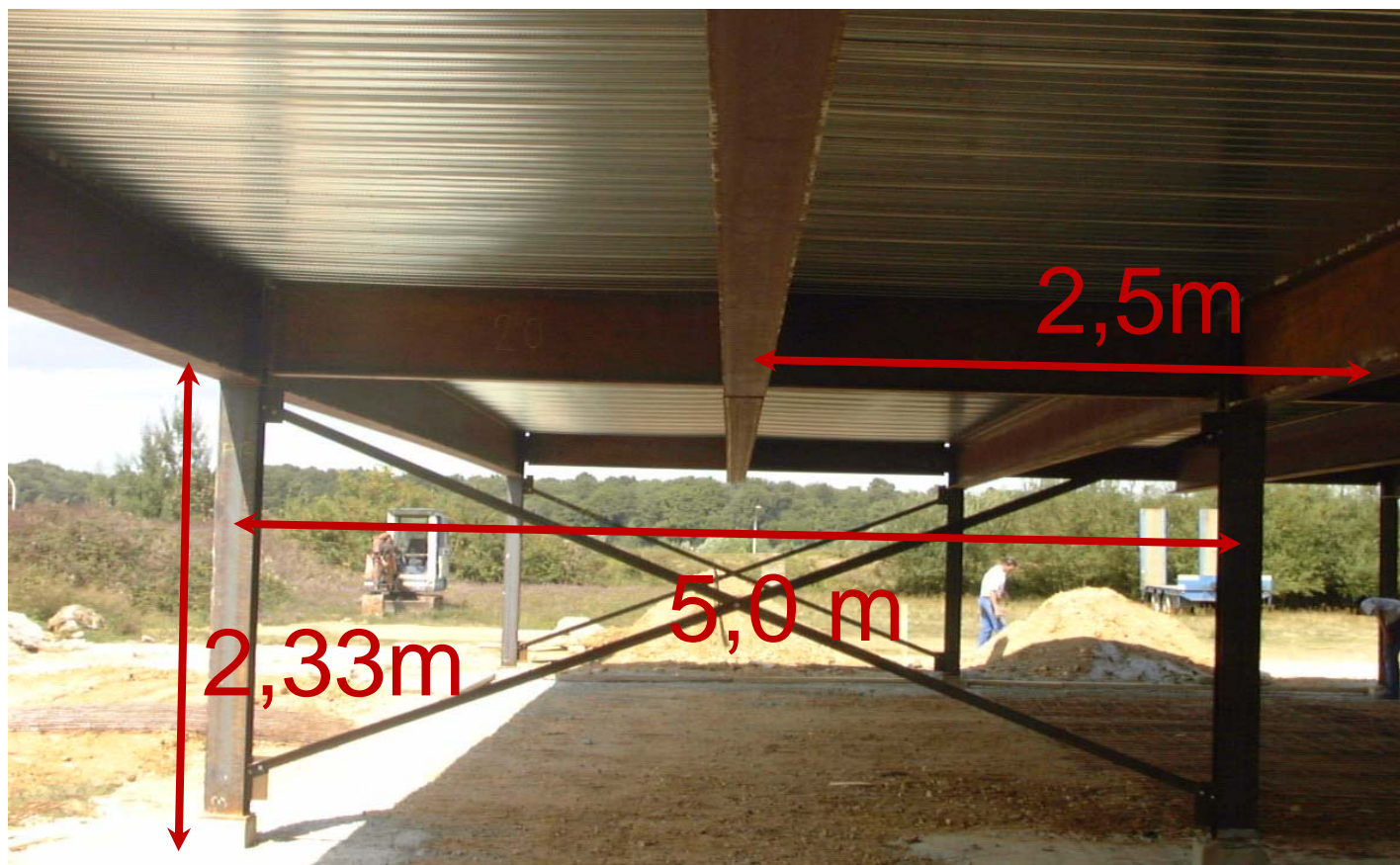
Pruebas de incendio accidental



## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- Edificio de estructura de acero de una planta



Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

Pruebas de incendio accidental



## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Parámetros principales de la estructura**

- **Longitud: 32 m en 2 luces de 16 m**
- **Anchura: 15 m en 3 luces de 5 m**
- **Altura de la planta: 3,0 m**
- **Elementos de acero: IPE para vigas y H para columnas**
- **Forjado colaborante: hormigón ligero con profundidad total de 120 mm y cubierta de acero entrante**
- **Malla de acero:**
- **Juntas de acero: uniones angulares dobles de entramado para juntas viga-viga y uniones con chapa de borde flexible para juntas viga-columna**
- **Carga aplicada: coches reales**

Ensayos de fuego  
de Cardington

**Ensayos de  
fuego en  
aparcamientos al  
aire libre**

Pruebas de  
incendio  
accidental



# Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



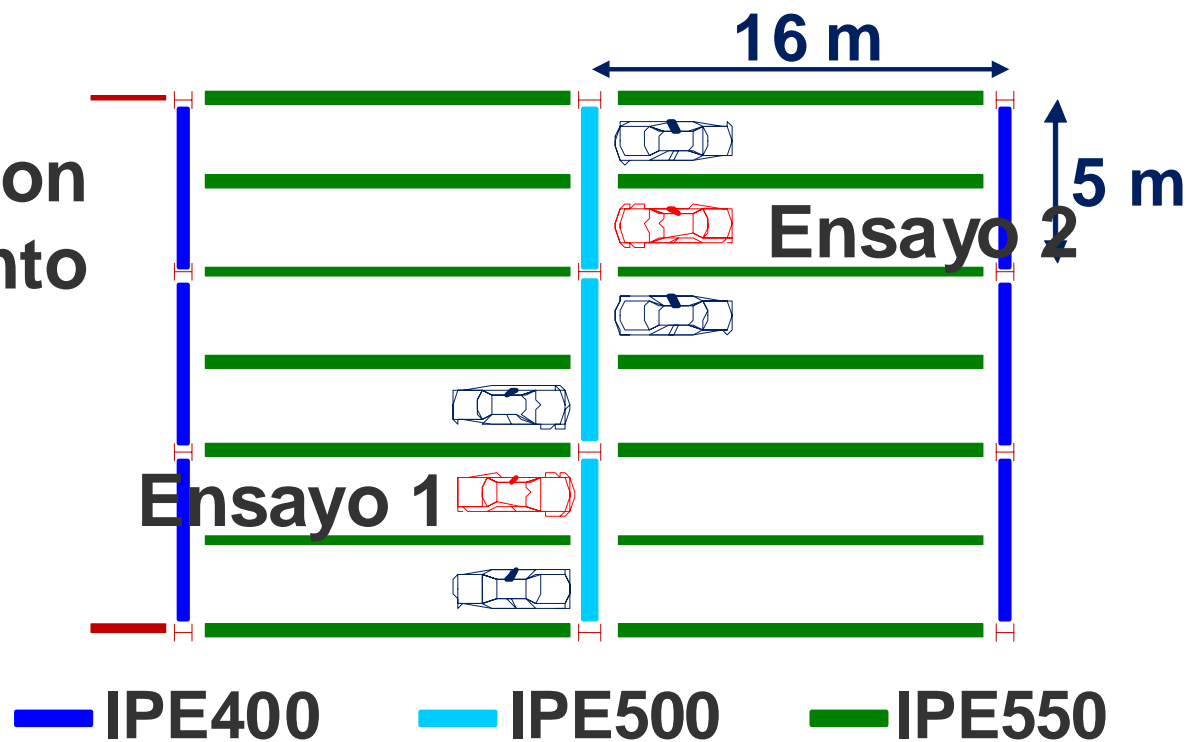
- Dos ensayos de fuego con tres coches cada uno

Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

Pruebas de incendio accidental

Dirección del viento

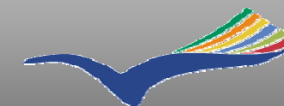


Edge columns: HEA 180  
Central columns: HEB200





## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 1)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

Pruebas de incendio accidental

**0 min**





## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 1)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

Pruebas de incendio accidental

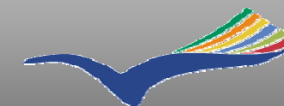
**10 min**







## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 1)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

Pruebas de incendio accidental

**33 min**





## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 1)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

Pruebas de incendio accidental

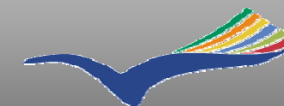
**62 min**







## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 2)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

Pruebas de incendio accidental

**0 min**





## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 2)**

Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

Pruebas de incendio accidental

**10 min**







## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 2)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

Pruebas de incendio accidental

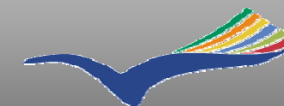
**25 min**







## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales (ensayo 2)**

Ensayos de fuego de Cardington

**Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre**

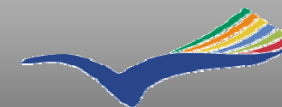
Pruebas de incendio accidental

**44 min**

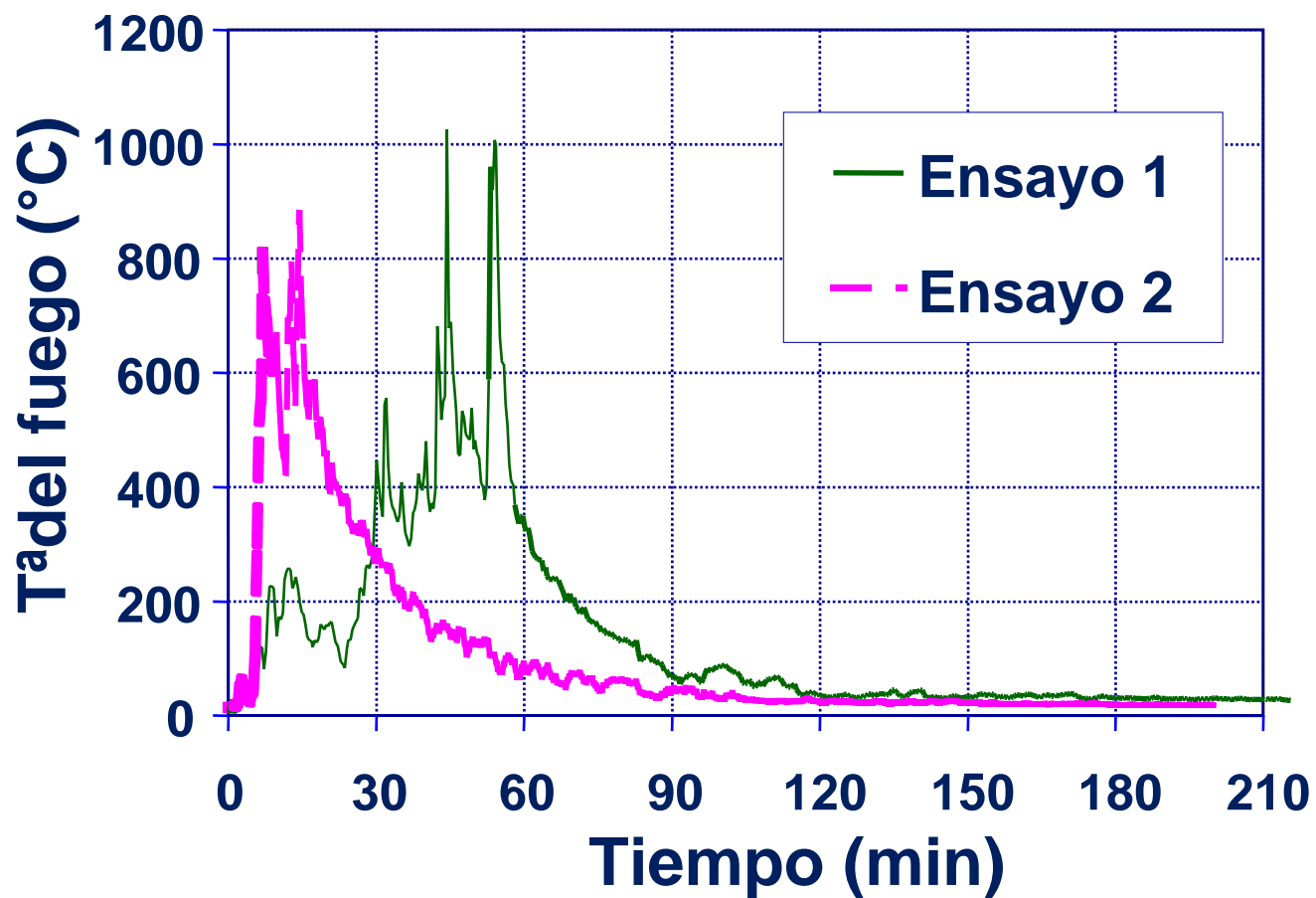




## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales:**  
temperatura del gas



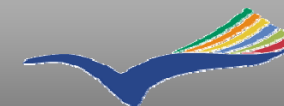
Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

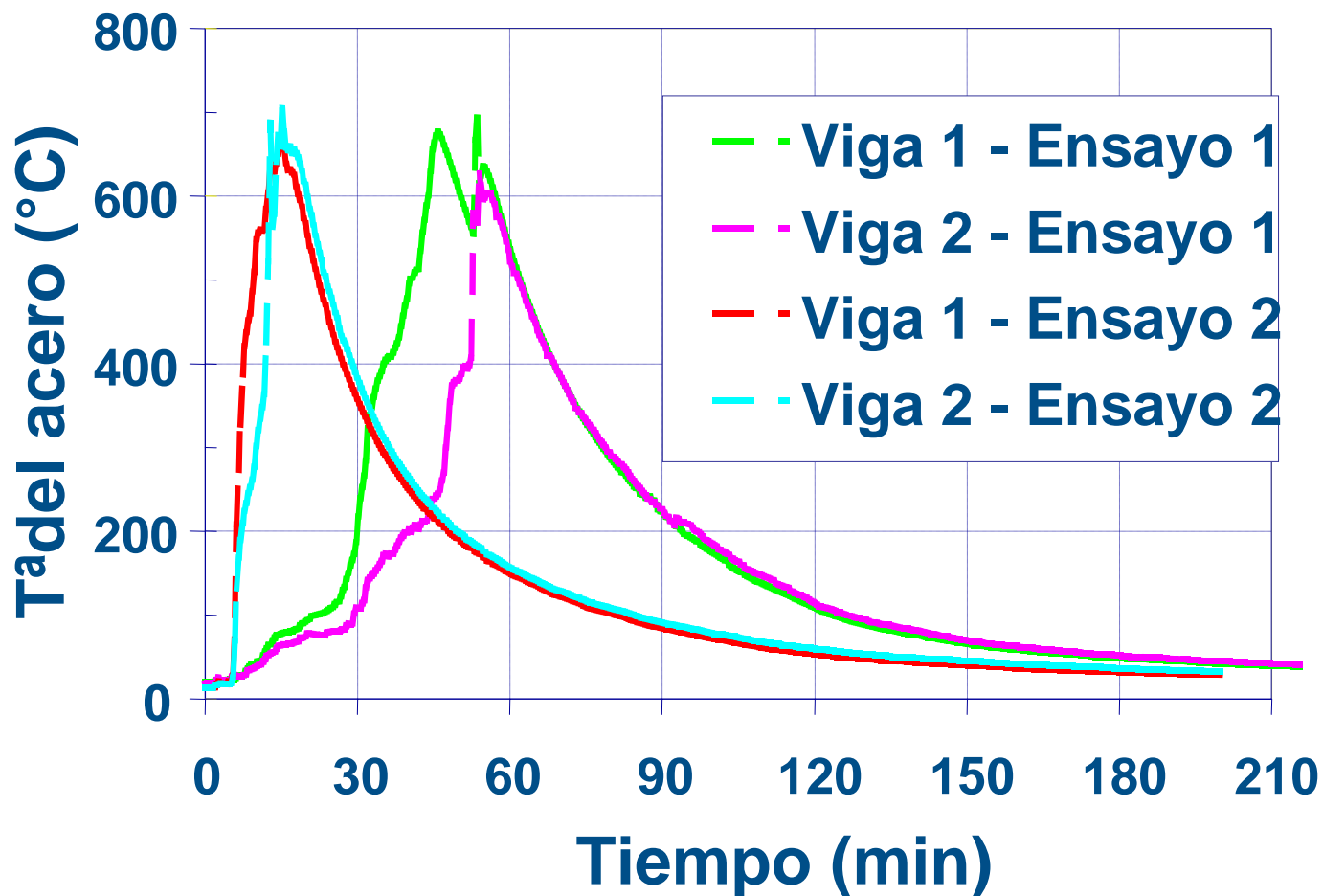
Pruebas de incendio accidental



## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- **Resultados experimentales:**  
temperatura del acero



Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

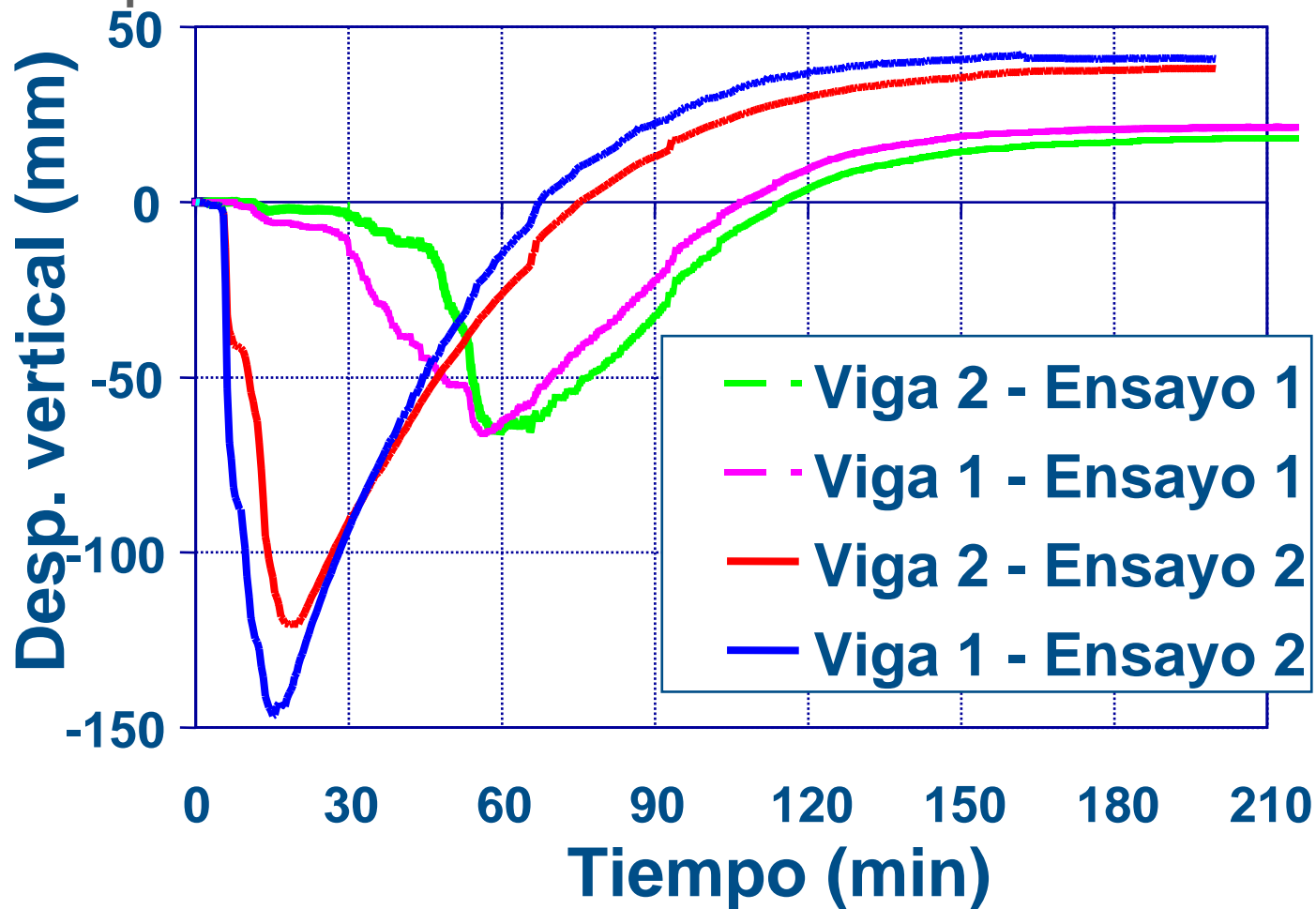
Pruebas de incendio accidental



## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- Resultados experimentales:  
temperatura del acero



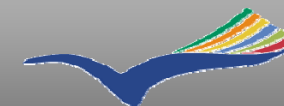
Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

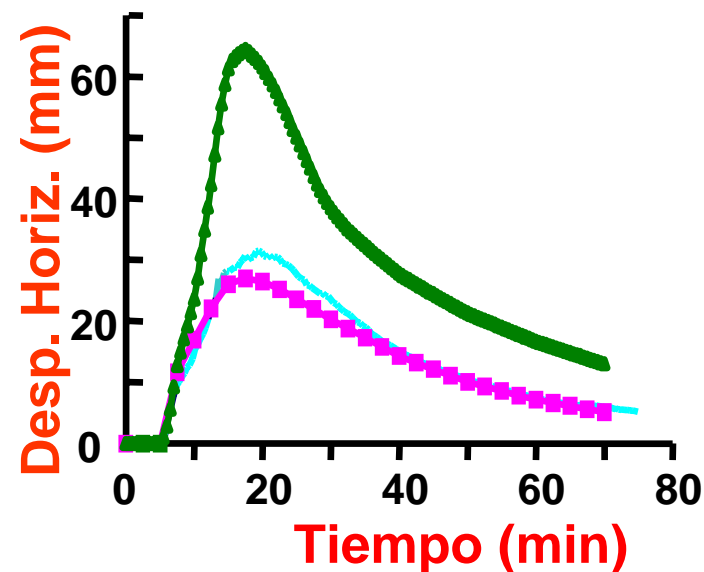
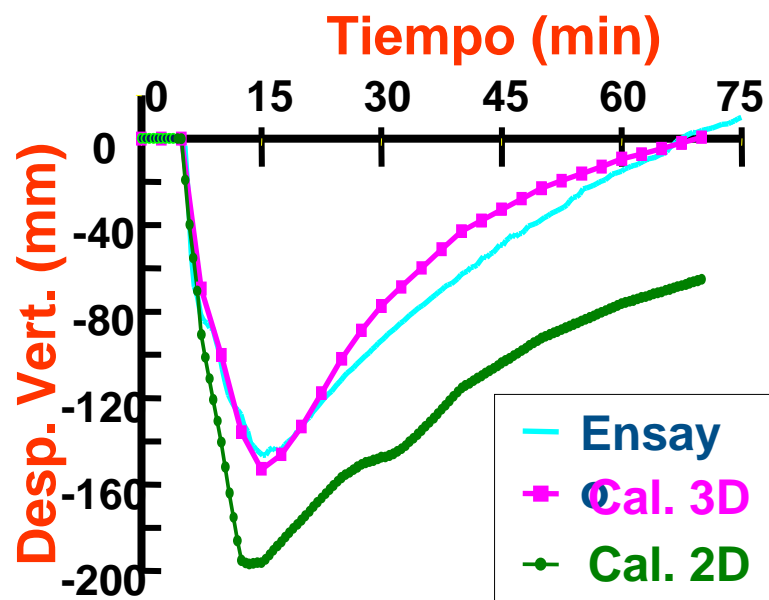
Pruebas de incendio accidental



## Ensayos de fuego en aparcamiento al aire libre



- Consecuencias del efecto membrana en 3D



- **Conclusión**

- Reducción de desplazamientos con el efecto de membrana en 3D frente al comportamiento de la estructura del portal en 2D





## Incendios accidentales y otros ensayos de fuego



- **Incendio de Broadgate**
  - Edificio de oficinas de 14 plantas con sistema de forjado colaborante
  - Temperatura del fuego superior a 1000 °C
  - Flecha importante del forjado (más de 600 mm) pero sin colapso alguno

Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

**Pruebas de incendio accidental**





## Incendios accidentales y otros ensayos de fuego



- **Ensayos de fuego en Australia**
  - Sistema de forjado colaborante a gran escala
  - Carga de fuego: 52 kg/m<sup>2</sup> de piletas de madera
  - Temperatura del fuego superior a 1228 °C
  - No se produce colapso del forjado

Ensayos de fuego de Cardington

Ensayos de fuego en aparcamientos al aire libre

Pruebas de incendio accidental

