

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESARROLLO DEL INCENDIO DEL EDIFICIO WINDSOR DE MADRID

Recibido: 04/06/07

Aceptado: 11/07/07

SIMULATION AND ANALYSIS OF THE FIRE OF WINDSOR BUILDING IN MADRID

Jorge A. Capote Abreu¹
Dr. Ingeniero de C.C. y P.

Daniel Alvear Portilla¹
Dr. Ingeniero Industrial

Mariano Lázaro Urrutia¹
Ingeniero Industrial

Pablo Espina Santos¹
Ingeniero Industrial

José L. Torero²
Dr. Profesor

Stephen Welch²
Dr. Lecturer

Ian Fletcher²
PhD

¹Grupo GIDAI. Dpto. de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria.

²BRE Centre for Fire Safety Engineering. School of Engineering and Electronics. The University of Edinburgh.

RESUMEN

El 12 de febrero de 2005, en el Edificio Windsor en Madrid se produjo un incendio que tuvo por consecuencia la afección de la práctica totalidad del edificio. La magnitud de este incendio ha convertido este siniestro en uno de los más relevantes en edificios de gran altura a escala internacional. En respuesta a tal evento, un equipo integrado por investigadores del Grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria y del BRE Centre for Fire Safety Engineering de la Universidad de Edimburgo, se propuso iniciar un trabajo que analizara los factores que influyeron en el rápido desarrollo del incendio así como sus efectos en los diferentes componentes estructurales del edificio.

El objeto del Estudio es (1) analizar las condiciones de crecimiento del incendio a fin de comprender los mecanismos que participaron en su propagación por el edificio, mediante el empleo del Modelado y Simulación computacional, y (2) evaluar el comportamiento de los elementos estructurales del edificio bajo las solicitaciones generadas en el incendio a través de técnicas de elementos finitos.

Los trabajos sobre la propagación del incendio en la planta origen del mismo han permitido obtener las manifestaciones térmicas alcanzadas como consecuencia de la contribución al incendio de los diferentes elementos combustibles presentes. A partir de estos resultados, se determinaron curvas paramétricas de velocidad de cesión de calor representativas del incendio real, de forma que pudiesen estudiarse las solicitaciones generadas (temperaturas, flujos de calor, etc.) en la superficie de los elementos estructurales. Para los trabajos de investigación se empleó el modelo de simulación computacional de incendios 'Fire Dynamics Simulator (FDS)', versión 4.07 desarrollado por el Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology - NIST (USA), modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) LES concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio. Los resultados de esta primera fase del Estudio permitirán en etapas posteriores analizar la respuesta mecánica (tensiones y deformaciones) de la estructura en interacción con modelos de elementos finitos (MEF).

Palabras clave: Modelado y simulación computacional, Seguridad contra incendios, Solicitaciones térmicas, Edificios de gran altura.

ABSTRACT

The Windsor Tower in Madrid was involved in a major fire, on 12-13 February 2005, which caused extensive structural damage to the upper floors of the building. This fire has provoked intense interest amongst researchers hoping to better understand the performance of concrete structures in fire. A research team integrated for Group GIDAI (University of Cantabria - Spain) and BRE Centre for Fire Safety Engineering (The Edinburgh University) has begun a study with the purpose of properly characterising the fire and the performance of the structure.

The objectives of the study are (1) to analyze the fire growth conditions in order to understand the fire propagation mechanisms between floors of the building, using computational fire modelling, and (2) to evaluate the response of the structure to the fire.

The research undertaken on the fire propagation on the 21st floor, the origin of the fire, has allowed assessment of the severity conditions reached as consequence of the fully-developed fire, due the combustion of the present flammable materials. Starting from these results, characteristic curves of heat release rate representative of the real fire have been determined, to facilitate study of the thermal attack (temperatures, heat flux, etc.) on the structural elements. The tools used for this purpose were the Fire Dynamics Simulator (FDS) LES code, developed at the National Institute of Standards and Technology (NIST), and the SOFIE RANS code. These results will allow, in the next stages, to make use of finite element methods to obtain the corres-



Fig. 1 Visualización del Edificio Windsor después del incendio. (Fuente: Cuerpo de bomberos de la Comunidad de Madrid).

ponding thermal and mechanical state (stress and strain) of each element due to these conditions.

Key Words: Computer Modeling, Fire Safety, Thermal Fields, Tall Buildings.

1.- INTRODUCCIÓN

El sábado 12 de febrero de 2005, ya entrada la noche, se inició un incendio en el piso 21 de la Torre Windsor en Madrid. Este incendio afectó a todos los niveles sobre la cuarta planta y se desarrolló de manera incontrolable durante cerca de 16 horas. Los severos daños causados en el edificio incluyeron un derrumbamiento parcial de los pisos superiores de la torre de 106 m de altura.

El edificio, perteneciente a la Inmobiliaria Asón, se construyó durante los años 1974 a 1978 para un uso como espacios de oficinas comerciales. Está localizado en el 65 de la Calle Raimundo Fernández Villaverde en el corazón comercial y financiero de Madrid, en el norte del centro de la ciudad. La torre fue originalmente diseñada por Alas Casariego Arquitectos y construida por OTEP Internacional S.A. En el momento de su construcción, era el edificio más alto de Madrid, pero cuando se produjo el incendio era el octavo más alto.

El edificio estaba en proceso de una importante restauración diseñada para adaptar la estructura a las regu-

laciones nacionales actuales de la seguridad contra incendios. Para ello se debían de instalar mejoras en la seguridad pasiva y activa contra incendios. Estas mejoras se habían introducido ya en los pisos inferiores pero muchos de los trabajos, especialmen-

te de los pisos superiores, estaban todavía por comenzar.

Los bomberos llegaron al edificio poco después de que se iniciara el incendio e intentaron apagarlo. Sin embargo, se retiraron rápidamente porque no conseguían detener el incendio y estaban poniendo en peligro su seguridad. El incendio se propagó rápidamente a los pisos superiores, pero también lo hizo a los pisos inferiores del foco del incendio produciendo un efecto espectacular en la noche madrileña y descendiendo hasta la quinta planta a la mañana siguiente. Debido a la intensidad y a la longitud del incendio, hubo preocupación de un derrumbamiento global.

La sincronización de los acontecimientos que ocurrieron durante el incendio se puede tomar de varias fuentes. No obstante, los valores varían según la fuente que se tome aunque de forma consistente en lo que respecta a la aparición de los mismos. Los tiempos de la tabla siguiente se han tomado de la información disponible de diversas fuentes:

11:05 am	El sistema de vigilancia del edificio señala una alarma en la oficina 2109 de la planta 21.
11:20 am	Se llama al Cuerpo de bomberos.
11:24 am	Llegada de los primeros bomberos.
11:35 am	Comienza la actuación de los bomberos subiendo por las escaleras hasta la planta 21.
12:20 am	El incendio ha alcanzado la planta 28.
01:15 am	Colapsa la sección noreste del edificio en los pisos superiores.
02:00 am	Se ven llamas azules ocasionales en las fachadas este y sur del edificio. El incendio se desarrolla por debajo del piso 21.
02:13 am	El suelo perimetral sobre el piso 25 se derrumba, produciéndose un gran derrumbamiento de la sección central en el vigésimo piso.
03:00 am	El incendio va disminuyendo en pisos superiores pero todavía siguen cayendo segmentos grandes de la estructura tanto por el interior como por el exterior.
03:30 am	El incendio alcanzó la planta 16, descendiendo la planta técnica 2.
04:00 am	La intensidad del incendio se incrementa en los pisos por debajo del foco del incendio, especialmente en los pisos 14 y 15. Los pisos de los niveles superiores colapsan.
05:30 am	El incendio llega al piso 12.
07:00 am	Los servicios de emergencia consideran que el incendio está bajo control aunque todavía existen numerosos focos calientes.

Tabla 1. Sincronización de los acontecimientos (Fuente: 'Fire in the Windsor building, Madrid. Survey of the fire resistance and residual bearing capacity of the structure after the fire', Intermac Report NIT 2-05, December 2005 and <http://www.structuralfiresafety.org/>).

En este trabajo se presenta un resumen de los trabajos de investigación realizados. Se estudió el desarrollo del incendio en la oficina origen del incendio, 2109, y la siguiente etapa fue el estudio de la propagación del incendio en la totalidad de la planta 21. Esto ha permitido analizar las posibles condiciones de severidad alcanzadas como consecuencia del incendio completamente desarrollado, debido a la combustión de los materiales inflamables presentes en la misma.

A partir de estos resultados, se calcularon unas curvas paramétricas de la velocidad de cesión de calor, representativas del incendio que se produjo realmente, para facilitar el estudio del ataque térmico (temperaturas, flujo del calor, etc.) contra los elementos estructurales.

2.- EL MODELO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE INCENDIOS: FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

Como se ha comentado anteriormente, el Modelo de Simulación Computacional de Incendios empleado para llevar a cabo los trabajos es el 'Fire Dynamics Simulator (FDS)', versión 4 [1], desarrollado por el Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology - NIST (USA) con la colaboración del VTT Building and Transport en Finlandia. Para generar las imágenes y animaciones que se obtienen a partir de los resultados obtenidos por el modelo, se emplea el programa Smokeview [2].

Este es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio. FDS resuelve numéricamente un tipo de ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para baja velocidad y flujo considerado desde un punto de vista térmico con énfasis en el transporte de humo y calor derivados de incendios.

El algoritmo principal tiene un esquema predictivo-corrector explícito, de segundo orden de exactitud en el espacio y en el tiempo. La turbulencia es tratada por medio de la forma Smagorinsky de Simulación de Grandes Remolinos (*Large Eddy Simulation*, LES). Es posible realizar una Simulación Directa Numérica (*Direct Numerical Simulation*, DNS) si la rejilla numérica es lo suficientemente fina. LES es el modo de operación por defecto.

Para la mayoría de las aplicaciones, FDS utiliza un modelo de combustión de fracción de mezcla. La fracción de mezcla es una cantidad escalar que se define como la fracción de gas en un punto dado del campo fluido combustible. El modelo asume que esta combustión está controlada por la mezcla, y que la reacción del combustible y el oxígeno es infinitamente rápida.

La transferencia de calor por radiación se incluye en el modelo mediante la solución de la ecuación de la transmisión por radiación para un gas gris que no se dispersa, y en algunos casos limitados empleando un modelo de banda ancha. La ecuación se resuelve utilizando una técnica si-

milar a la de los métodos de volúmenes finitos (*Finite Volume Method*, FVM).

3.- ANÁLISIS DEL DESARROLLO DEL INCENDIO EN LA OFICINA 2109

Antes de tratar de establecer un estudio que permitiera comprender el desarrollo del incendio a través del interior del edificio, se decidió focalizar la atención en cómo pudo ser el desarrollo del mismo en la habitación en la que éste se inició y la velocidad de cesión de calor total que se produjo en la misma. Algunas características de materiales representativos fueron establecidas de la literatura. Esto no permitirá realizar una interpretación forense de los resultados pero permitirá realizar un primer análisis de los posibles mecanismos de crecimiento y de los tiempos del incendio. Además, las características materiales y otras condiciones (ej. tiempos de rotura de la ventana) se pueden variar fácilmente para estudiar su influencia en el progreso del incendio.

Los elementos técnicos resultantes de este análisis, además de permitir continuar con el análisis en toda la planta y entre plantas, facilitarían poder avalar la hipótesis de origen del incendio, y determinar la importancia de los diferentes factores que influyen en el crecimiento en un recinto cerrado: dimensiones del recinto, potencia de la fuente de ignición, características, distribución y tipos de elementos combustibles, condiciones de ventilación, etc.

En la figura 2 se muestra una representación del modelo de la habitación realizado con el modelo FDS. En

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad \text{Ec. Conservación de la Masa}$$

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i \quad \text{Ec. Conservación de las Especies}$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u \vec{u} = -\nabla p + \rho f_T + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad \text{Ec. Conservación de Momentum (Navier-Stokes)}$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}'' - \nabla \cdot \vec{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_j h_j (\rho D_j) \nabla Y_j \quad \text{Ec. Conservación Energía}$$

$$p_0 = R \rho T \sum_j \frac{Y_j}{M_j} \quad \text{Ec. de Estado}$$

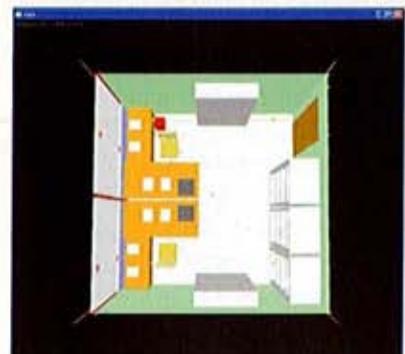


Fig. 2 Visualización de la planta recinto origen del incendio.

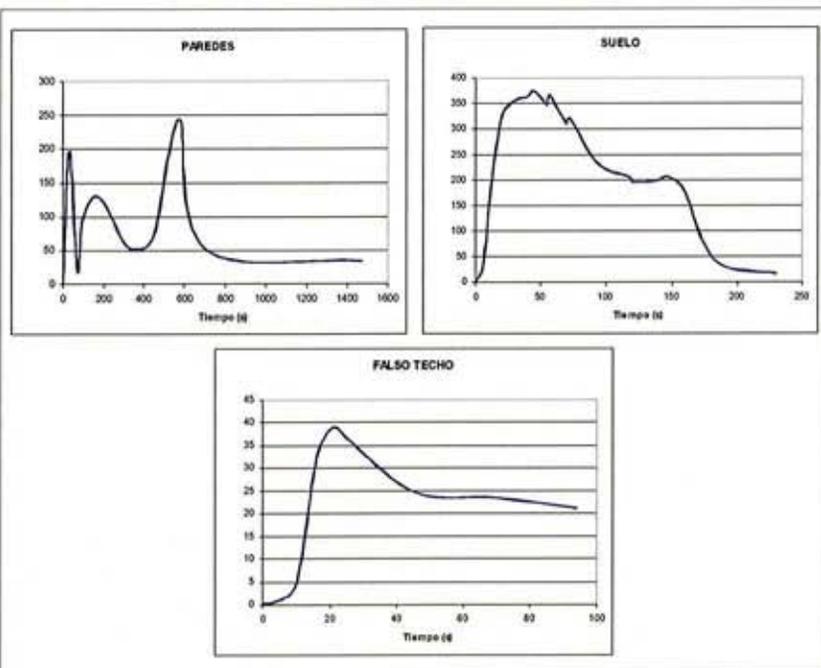


Fig. 3. Velocidad de cesión de calor por unidad de área de los revestimientos. (Fuentes: 'Firestarr Project CEN TC256'. 'Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations; D. Madrzykowski and W.D. Walton; NIST (USA)'.)

este modelo se han representado las condiciones de la habitación antes del incendio con una rejilla de 5 cm en todos los ejes coordenados, y un total de 512.000 celdas. Este despacho disponía de dos mesas con sus respectivas alas en la posición de la figura, tres armarios en la pared frente a la cristallera y otros dos armarios laterales. Además cada puesto de trabajo contaba con un ordenador y una bandeja con papeles, junto con una papelera.

Los forjados se introdujeron de hormigón, estando tapados por un falso techo de placa de fibra de mineral cuya curva de incendio se tomó de los ensayos de cono calorimétrico realizados por el NIST para el estudio 'Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations' [5]. La velocidad de cesión de calor por unidad de área de este falso techo tiene un pico de área de 38,92 kW/m² a los 22 s según los ensayos de cono calorimétrico del citado documento. En el suelo se colocó una moqueta con un pico de velocidad de cesión de calor por unidad de área de

374 kW/m² a los 45 s, valor obtenido de los ensayos de cono calorimétrico de la misma referencia anterior.

Para las paredes se introdujo un material *Plywood* cuya curva de velocidad de cesión de calor por unidad de área con un pico de 243,36 kW/m² a los 575 s. Las propiedades de este material se han obtenido del programa *Firestarr Project CEN TC256* [7] y pueden observarse en la figura 3 junto con las curvas de los diferentes materiales de revestimiento.

En la Tabla 2 se puede ver un resumen de las propiedades de los materiales de revestimiento empleados en la simulación del escenario.

Ref.	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	Calor esp. (kJ/kg°K)	Tlg. (°C)
Paredes ¹	9.5	440	1,47	326
Suelo ²	6	750	---	290
Falsos techos ²	13	1.440	---	325

Tabla 2 Características de los materiales de revestimiento. (Fuentes: 1Firestarr Project CEN TC256. 2Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations; D. Madrzykowski and W.D. Walton; NIST (USA).)

Una vez introducidas las características de los materiales de revestimiento, se procedió a analizar las características del mobiliario presente. El puesto de trabajo abarca tanto la mesa de trabajo como la mesa auxiliar, el ordenador y las bandejas de papeles de ambas mesas.

Para definir esta curva, se estudió el ensayo del **National Institute of Standard and Technology NIST** (USA) sobre 'Two Panel Workstation Fire Test' [6]. Esta curva puede verse en la figura 3. Para caracterizar este elemento se añadió, además, entre otros parámetros, una temperatura de ignición de 200 °C. Para la introducción de las características del armario, se tomaron los datos de la base de datos de ensayos del NIST [6], proponiéndose un pico de velocidad de cesión de calor de 3.6 MW a los 425 s.

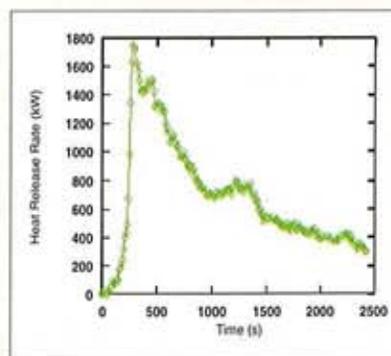


Fig. 4. Velocidad de cesión de calor de los puestos de trabajo. (Fuente: NIST Standard Reference Database)

Se seleccionó el inicio del incendio en la papelera que se encuentra cercana al ala de la mesa. Para definir

su curva de velocidad de cesión de calor se emplearon varios documentos, aunque principalmente se seleccionó la forma del ensayo mostrado en [3] pero con unos valores de pico un poco menores al tener en cuenta el resto de documentos. En la figura 5 se muestra la curva de velocidad de cesión de calor seleccionada para la misma.

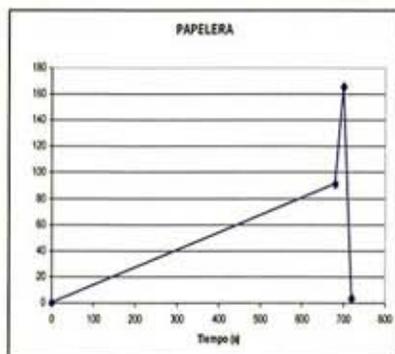


Fig. 5. Curva de velocidad de cesión de calor de la papelerera. (Fuente: "Heat Release Rate Tests of Plastic Trash Containers", D.W. Stroup and D. Madrzykowski, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, REPORT OF TEST FR 4018, April 24, 2003.)

Una vez definidas las características de todos los materiales combustibles, se definió el muro cortina como las cristalerías, tomando sus características de la base de datos de FDS, con unos pilares perimetrales de acero, cuyas características también se tomaron de la base de datos de FDS. Además, en la parte inferior de la ventana se disponía en algunas zonas del edificio elementos de protección al fuego, por lo que se consideró en esa zona del despacho objeto de estudio material 'Marinite' tomando como referencia los parámetros de la base de datos del modelo.

La definición de los tiempos de rotura de los cristales es un factor muy importante en el estudio, pero, a falta de más datos en esta fase inicial del estudio, se optó por analizar dos situaciones de ventilación: en primer lugar, se pusieron unos detectores de calor a lo largo del cristal que provocarían su

ruptura al alcanzar los 150 °C, y como segunda opción se eliminaron los cristales desde un primer momento.

Los resultados en ambos casos fueron similares como se puede observar en las figuras 6 y 7.

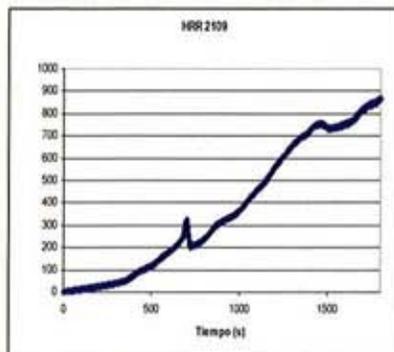


Fig. 6. Velocidad de cesión de calor total de la habitación con cristales.

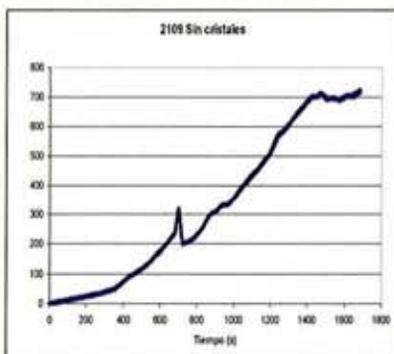


Fig. 7. Velocidad de cesión de calor total de la habitación sin cristales.

Los resultados de este primer análisis demostraron que era posible alcanzar estadios de incendio completamente desarrollado en el despa-

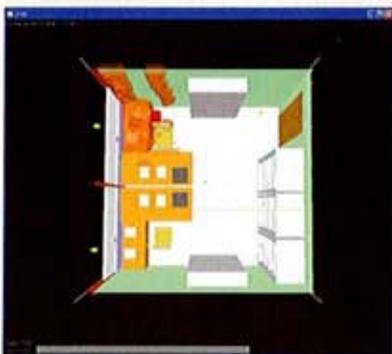


Fig. 8. Visualización en Smokeview de la velocidad de cesión de calor por unidad de volumen en el desarrollo del incendio (1800 s).

cho a partir de pequeñas fuentes de ignición, tales como la papelerera. Durante el desarrollo del incendio se comprobó la ignición de forma generalizada en el ala de la mesa que se encuentra al lado de la papelerera antes de los 30 min. y la rotura de los cristales superiores en este intervalo de tiempo, así como la propagación a los recintos adyacentes al despacho 2109 por medio de la pared más cercana a la papelerera.

4.- ANÁLISIS DEL DESARROLLO DEL INCENDIO EN LA PLANTA 21

La planta objeto de estudio pertenece a un edificio de gran altura de estructura mixta, hormigón y acero. El edificio está dividido en dos cuerpos realizados mediante estructura de hormigón armado de soportes apantallados que recorren la totalidad del edificio en sentido longitudinal, conformando en su zona central un conjunto rígido en donde se ubicaban los núcleos de comunicación vertical, ascensores y escaleras, además de varios pórticos paralelos a las fachadas norte y sur. Los pórticos tienen vigas de acero y columnas de hormigón y la estructura de las fachadas está constituida por pilares metálicos.

En la figura 9 puede observarse una representación de la planta que será objeto del estudio con su layout inicial con una rejilla de 20 cm en todos los ejes coordenados y un total de 729.000 celdas en el dominio computacional. La oficina analizada en el punto anterior, y que es en la que se inicia el incendio, se encuentra marcada en la figura.

La planta está estructurada en una serie de oficinas perimetrales que se encuentran divididas a través de paneles de aglomerado de madera, una serie de puestos de trabajo en la parte central izquierda según la figura anterior y de un núcleo central de hormigón en el que se localizan los ascensores, las escaleras, los baños y una serie de salas de reuniones.

A efectos de los estudios preliminares en la planta 21 se focalizaron en dos objetivos específicos, por un lado (1) estudiar y analizar del desarrollo del incendio en esa planta y, por otro (2), permitir el cálculo de



Fig. 9. Vista general de la planta 21 donde se originó el incendio.

curvas paramétricas de velocidad de cesión de calor total representativas incendios reales completamente desarrollado en la planta. A partir de estos resultados, en fases posteriores, se desarrollarán análisis más detallados que permitan verificar las condiciones de propagación en la planta y la propagación a otras plantas del edificio.

En este caso, las características de los datos de los revestimientos de los elementos presentes en la planta 21 se corresponden con los anteriormente comentados para el despacho 2109, salvo en el caso de la alfombra, cuya curva de velocidad de cesión de calor se ha modificado por la de la base de datos de FDS. En la Tabla 3 se muestran las características principales de estos revestimientos.

Ref.	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	Calor esp. (kJ/kg°K)	Tig. (°C)
Paredes ¹	9.5	440	1,47	326
Suelo ²	6	750	---	290
Falsos techos ²	13	1.440	---	325

Tabla 3 Características de los materiales de revestimiento. (Fuentes: 1Firestarr Project CEN TC256. 2Base de datos de FDS. 3Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations; D. Madrzykowski and W.D. Walton; NIST.)

En este caso, el inicio del incendio se corresponde directamente con la combustión del puesto de trabajo que incluye todos sus elementos, para lo que se emplearon datos de varios ensayos del NIST [6] de uno o varios

módulos de trabajo. En la figura 10 se puede ver la curva de velocidad de cesión de calor de dos de los módulos empleados.

Como se puede ver en la figura 11, el desarrollo del incendio se produjo tanto a través de las paredes co-

edificio, que no serán objeto del presente trabajo.

A partir de los resultados de las simulaciones anteriores, se calculó la curva de velocidad de cesión de calor total que se producía en la planta. Este dato nos proporcionaría un indica-

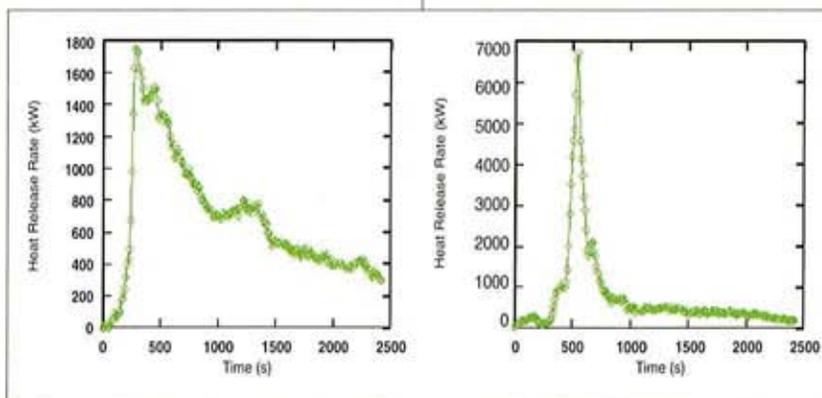


Fig. 10. Velocidad de cesión de calor de los puestos de trabajo. A la izquierda puesto de trabajo con 2 paneles y a la derecha puesto de trabajo con 3 paneles (Fuente: NIST Standard Reference Database)

mo por el pasillo. Se desarrollaron diferentes simulaciones del desarrollo del incendio bajo distintas condiciones de ventilación, que demostró ser un factor crítico en la evolución del incendio.

En este sentido se constató la necesidad de tener especial atención con las condiciones de agotamiento del oxígeno debido al rápido crecimiento del incendio, primero en la

dor de la magnitud y severidad del incendio y resulta de gran interés en el

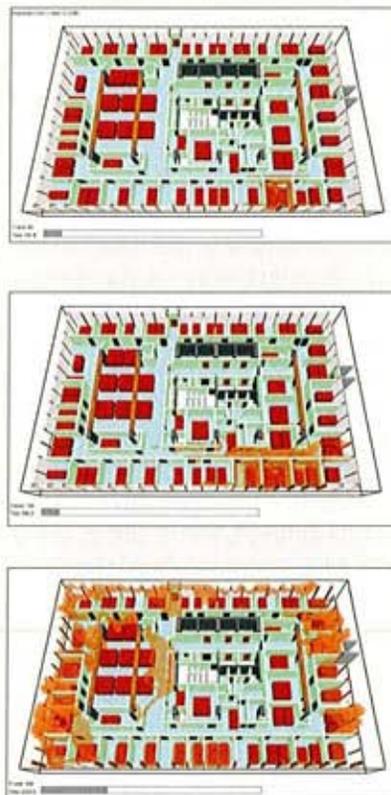


Fig. 11. Desarrollo del incendio en la planta 21 con la rotura de ventanas a 90 °C.

análisis de solicitaciones térmicas en los elementos estructurales. En la figura 12 se puede observar la curva mencionada.

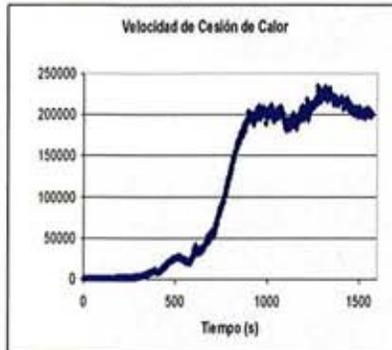


Fig. 12. Resultados del modelo FDS para la Velocidad de cesión de calor total en la planta 21.

5.- ANÁLISIS DE LA AFECTACIÓN ESTRUCTURAL EMPLEANDO CURVAS PARAMÉTRICAS

Se realizó un análisis para comprobar los resultados proporcionados por curvas paramétricas de velocidad de cesión de calor, en relación con las condiciones de ataque térmico (temperatura, flujos de calor, etc.) suficientes para hacer que la estructura colapsase.

A efectos de facilitar el proceso de cálculo, se simplificaron las condiciones de uso final de la planta 21, considerando únicamente los elementos estructurales junto con unos incendios de diseño representativos de la velocidad de cesión de calor anteriormente calculadas. Las curvas paramétricas de velocidad de cesión de calor se introdujeron en forma incendio de diseño, situado en toda la superficie del suelo de la planta.

Se estudiaron diferentes curvas paramétricas, en esta ponencia se analizarán las dos opciones extremas. La primera fue mencionada en el párrafo anterior, con un crecimiento cuadrático hasta aproximadamente 225 MW. La segunda curva paramétrica seleccionada fue de aproximadamente el doble de la anterior en el valor de pico (500 MW), con el propósito de considerar una situación extremadamente severa (debido, por ejemplo, a las incertidumbres del

proceso de modelado) (Fig. 13). Debe precisarse que el tamaño de esta última curva excede deliberadamente los límites superiores aproximados de un incendio controlado por ventilación en toda la planta, obtenidos con la expresión $\dot{m} = 5.5A_v \sqrt{h}$ (kg/min), los cuales son del orden de 350 MW. En cualquier caso, cuando la altura de la apertura de ventilación, h , es igual a dos metros, este valor se torna del orden de 493 MW, aproximadamente los 500 MW considerados.

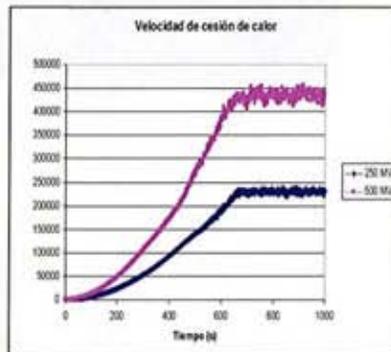


Fig. 13. Curvas paramétricas de velocidad de cesión de calor de 250 MW y 500 MW.

Tal como cabía esperar debido a las magnitudes de incendios completamente desarrollados como los seleccionados en las curvas paramétricas, las temperaturas ambientales que produjeron estas curvas de diseño fueron de un valor considerable,

alcanzándose valores de hasta 1.160 °C cuando la curva de velocidad de cesión de calor es de 500 MW. En el primero de los casos, las mayores temperaturas en la superficie de los elementos estructurales se produjeron en los pilares del núcleo central de hormigón, obteniéndose temperaturas de hasta 678 °C. A medida que la curva paramétrica de velocidad de cesión de calor fue aumentando en su tamaño, el valor de la temperatura de estos elementos fue aumentando, obteniéndose en los otros dos casos valores de hasta 966 °C y 1.010 °C respectivamente.

En la figura 14 se ha dividido la planta en tres zonas para poder obtener datos de las temperaturas en las columnas en zonas concretas. Para el caso de la curva paramétrica de 500 MW, en la figura 15 se pueden ver las

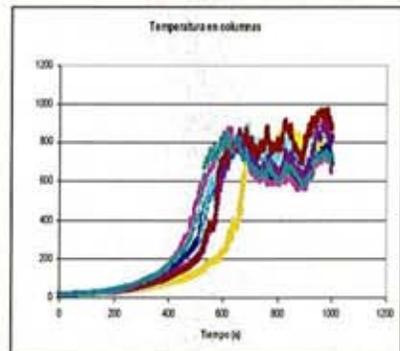


Fig. 15. Temperaturas de las columnas de la Zona A.

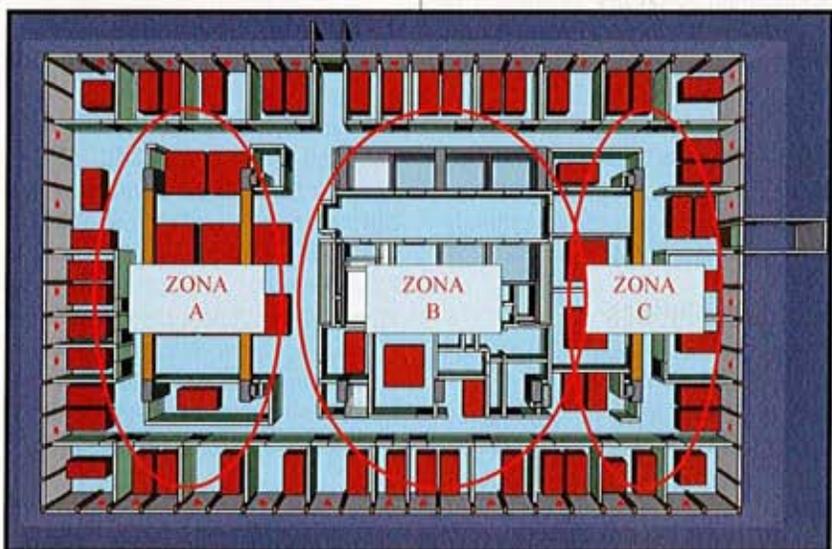


Fig. 14. Zonas para el análisis estructural en planta 21.

temperaturas de las columnas de la Zona A, en la Figura 16 de la Zona B y en la figura 17 de la Zona C.

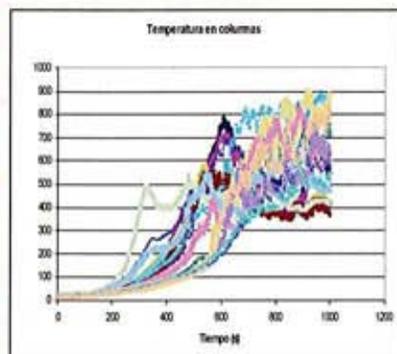


Fig. 16. Temperaturas de las columnas de la Zona B.

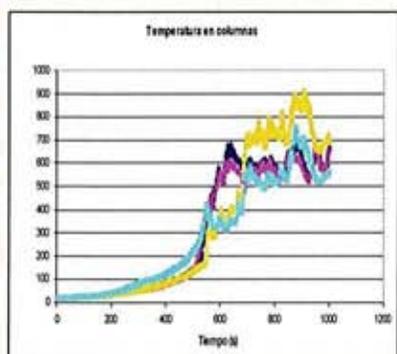


Fig. 17. Temperaturas de las columnas de la Zona C.

Las siguientes fases del análisis se deberán centrar en mejorar los análisis anteriores y una vez que se conozcan las condiciones de la planta origen del incendio se deberá de analizar la propagación del incendio entre las diversas plantas a través del sistema de ventilación, del muro cortina, etc.

En la figura 18 se puede observar la temperatura en la superficie de los elementos estructurales al cabo de 1.800 s para el caso de la segunda curva paramétrica seleccionada.

6.- CONCLUSIONES

La fase inicial de los trabajos de investigación ha mostrado la capacidad de los Modelos de Simulación Computacional de Incendio para realizar el análisis del desarrollo de un incendio dentro de tanto un recinto pequeño, como una habitación, como de un recinto más grande como puede ser la planta entera.

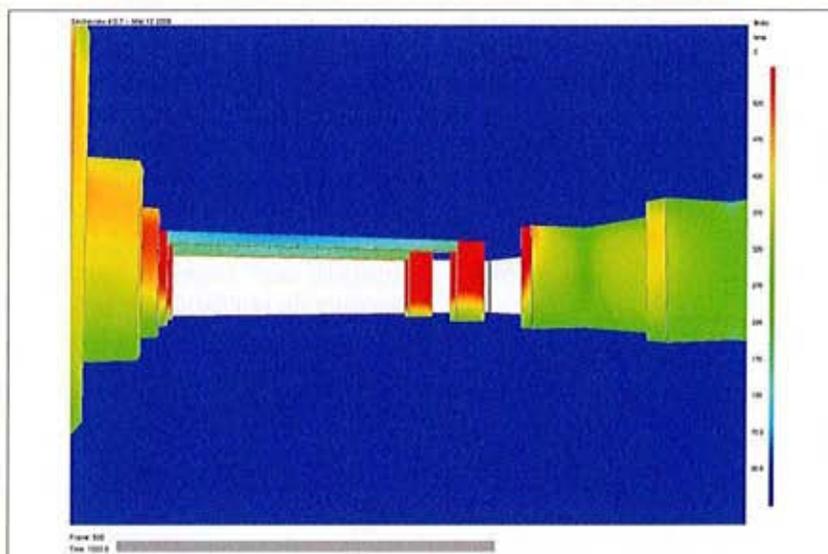


Fig. 18. Visualización de los resultados del modelo para las condiciones de ataque térmico en los elementos estructurales en el caso de la curva paramétrica de $HRR_{peak}=500$ MW.

Se ha mostrado, en términos cualitativos, cómo el incendio puede crecer y desarrollarse desde la habitación origen del incendio y esto proporciona una base para establecer una representación del posible desarrollo del incendio en el piso completo. Estos modelos permiten, además de analizar el desarrollo del incendio, calcular las cargas térmicas a las que se verá sometida la estructura. Estas cargas podrán emplearse en fases posteriores para analizar la respuesta mecánica (tensiones y deformaciones) de la estructura en interacción con modelos de elementos finitos (MEF).

7.- AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento por el apoyo del **Concrete Centre/British Cement Association (UK)**, el **EPSRC (UK)**, el **Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones - IECA (España)**, la **Compañía Financiera y Minera - FYM (España)**, y el **Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España**, así como a todas las personas, Instituciones públicas y privadas que vienen haciendo posible el desarrollo del Proyecto de Investigación.

8.- BIBLIOGRAFÍA

[1] McGRATTAN, Kevin. "Fire Dynamics Simulator (Versión 4) - Technical Reference Guide", National Ins-

tute of Standards and Technology (NIST). 2005.

[2] FORNEY, Glenn P. and McGRATTAN, K. "Smokeview (Versión 4) - User's Guide", National Institute of Standards and Technology (NIST). 2005.

[3] "Heat Release Rate Tests of Plastic Trash Containers", STROUP, D.W. and MADZYKOWSKI, D. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, REPORT OF TEST FR 4018, April 24, 2003.

[4] "Full-Scale Flammability Measures for Electronic Equipment", BUNDY, Matthew and OHLEMILLER, Thomas, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1461, August 2004.

[5] "Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations", MADZYKOWSKI, D and WALTON, W.D. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication SP-1021, July 2004.

[6] NIST Standard Reference Database Number 75, January 1999 Release.

[7] Firestarr Final Report. CEN TC256 / CENELEC TC9x JWG Fireprotection. 2001. ■