

# La Influencia de la Temperatura Exterior sobre los Sistemas de Ventilación Natural en Grandes Atrios

## *The Influence of the Exterior Temperature on Natural Venting Systems in Large Atria*

J.A. Capote\*, D. Alvear\*, O.V. Abreu\*, M. Lázaro\*, y P. Espina\*

### RESUMEN

Entre las diferentes estrategias de Control y Evacuación de los Humos del Incendio, los sistemas de ventilación natural presentan numerosas ventajas frente a la ventilación mecánica – fundamentalmente una menor inversión tanto en equipos como en gastos de mantenimiento –. Sin embargo, su eficacia depende de la influencia ejercida por numerosos factores – características arquitectónicas del edificio, dirección y velocidad del viento, proximidad de edificios de gran altura, temperatura de los humos, temperatura ambiental interior, temperatura en el exterior del recinto, existencia de nieve o hielo en cubierta, etc. –. La influencia de la temperatura exterior al recinto, en especial, ejerce un papel decisivo.

El objeto del Estudio fue evaluar la influencia de la temperatura ambiental exterior en el movimiento de los humos y el posible descenso de la capa de gases calientes en relación a la eficiencia de los dispositivos de ventilación natural instalados en la cubierta de Grandes Atrios para el control de los humos, mediante herramientas avanzadas de Modelado y Simulación Computacional. Para los trabajos de investigación se empleó el modelo de simulación computacional de incendios 'Fire Dynamics Simulator (FDS)' (1), modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) para reproducir el fenómeno del incendio.

Los resultados demostraron que un diseño que no contemple este factor puede resultar inadecuado, al ejercer una influencia decisiva para la consecución de la Seguridad de las personas durante la evacuación. Se mostraron diferencias significativas en los resultados en relación a diferentes parámetros vinculados al movimiento de humos en un atrio.

313-4

**Palabras clave:** humo; atrio; ventilación natural; temperatura.

### SUMMARY

*Natural venting systems present numerous advantages opposite to the mechanical exhaust for the smoke control – a reduction in both facilities and maintenance costs–. Nevertheless, the influence of numerous factors affects significantly their efficacy: the architectural characteristics of the building, the direction and wind velocity, the proximity of tall buildings, the smoke temperature, the environmental interior and exterior temperatures, the existence of snow or ice on the ceiling, etc. All of them are important, but the influence of the environmental exterior temperature plays a decisive role.*

*The goal of this Investigation Research was to evaluate the influence of the external temperature on the smoke movement and the hot layer descent regarding the efficacy of the natural venting systems installed for the smoke control in large atria. The analysis was developed using the 'Fire Dynamics Simulator - FDS' model (1), a computational fluid dynamics (CFD) model of fire-driven fluid flow for the study of fire.*

*The results demonstrated that a design that does not contemplate this factor can turn out to be inadequate, since it has a decisive influence to guarantee human safety. The obtained results showed very significant differences about the different parameters linked to the smoke movement in an atrium.*

**Keywords:** smoke; atrium; natural venting; temperature.

\*Grupo GIDAI, Universidad de Cantabria. Santander, España.

Persona de contacto/Corresponding author: alveard@unican.es (D. Alvear)

## 1. INTRODUCCIÓN

A diferencia de las técnicas de Control de Humos habitualmente desarrolladas en grandes atrios de Estados Unidos –mediante ventiladores mecánicos en la cubierta–, en países europeos y australianos el Control de los Humos del incendio tiende a favorecer un sistema natural por encima del forzado (2), fundamentado en su flotabilidad y en la ley de la gravedad, con el objetivo de evacuar los humos o de mantener la capa de gases calientes a cierta altura respecto del suelo del atrio, sin afectar a los ocupantes presentes durante la evacuación. Para la consecución de estos objetivos deben existir en la cubierta –o en sus proximidades– aberturas para la evacuación de los humos.

Los trabajos desarrollados por Morton, Taylor, y Turner (3) en 1956; Cetegan, Zukoski y Kubota (4) en 1982; McCaffrey (5) en 1983 y Heskestad (6) en 1984, nos permiten disponer de expresiones analíticas para los cálculos –bajo la consideración de un incendio de diseño constante (steady fire)–.

El flujo másico a través de los aireadores del sistema viene determinado por la siguiente expresión:

$$m_v = \frac{CA_v \rho_0 [2gd_b (T_s - T_0) (T_0 / T_s)]^{1/2}}{[T_s + (A_v / A_i)^2 T_0]^{1/2}} \quad (\text{kg/s}) \quad [1]$$

La temperatura de los humos del incendio puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$T_s = T_0 + \frac{Q_c (1 - \eta)}{m c_p} \quad (^\circ\text{K}) \quad [2]$$

El flujo másico a través de los aireadores está proporcionalmente vinculado a la temperatura de los humos.

Esta circunstancia provoca que, únicamente para este sistema de control de humos, un incendio de mayor tamaño que el de diseño –dentro de unos límites razonables– favorezca la evacuación de los humos, ya que genera un volumen de gases calientes más elevado, los cuales se incorporan a la capa caliente bajo la cubierta y contribuye al aumentar la temperatura.

En el caso concreto de España, la Norma UNE 23585 (7), combinación de los conceptos de diseño esenciales de la futura Norma Europea prEN12101, de la norma inglesa BS-5588 (8) así como de la norma belga NBN.S.21-208-1 (9), recoge las expresiones analíticas para el cálculo de un sistema de ventilación natural, considerando la influencia de diversos factores sobre el funcionamiento del sistema –los efectos del viento y las entradas de aire desde el exterior fundamentalmente–.

Si bien es cierto que entre los agentes externos que pueden afectar al funcionamiento del sistema, la norma española menciona la temperatura exterior, no es menos cierto que ésta no es considerada en el desarrollo de los cálculos de diseño.

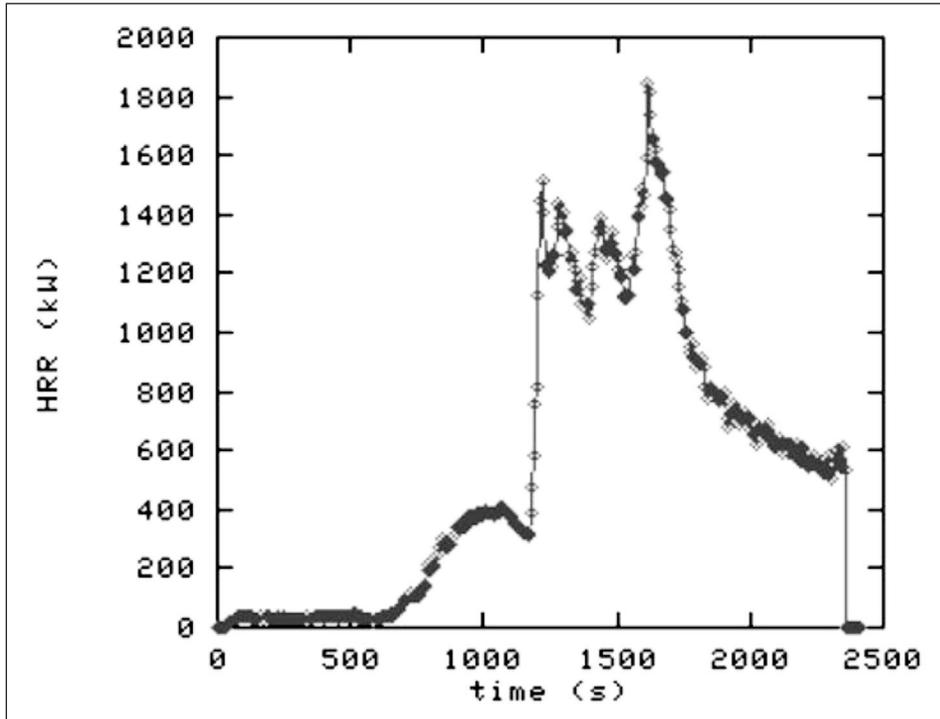
Por contra, Fire Protection Association –NFPA– que regula la normativa de Seguridad contra Incendios en los Estados Unidos, señala en la Norma NFPA 92B (10) que una elevada temperatura ambiental en el exterior del edificio puede ejercer una influencia decisiva en la disminución de la eficacia del sistema de ventilación natural.

Esta circunstancia debe considerarse especialmente en lugares calurosos, ya que las temperaturas exteriores son elevadas y superiores a las interiores, en mayor medida a consecuencia de la actuación de los sistemas de climatización (aire acondicionado). El presente trabajo se encuentra focalizado en el análisis de este fenómeno en dos grandes atrios, de diferentes características arquitectónicas cada uno de ellos –altura libre, superficie y geometría del recinto–.

## 2. METODOLOGÍA EMPLEADA

Por lo general, el vestíbulo de Entrada Principal en una Estación de Transporte Masivo de Pasajeros constituye una de las zonas especialmente concurridas, ya que en numerosas ocasiones facilita los accesos tanto a la zona de andenes como a zonas comerciales, de ocio, restauración, etc. Analizando diferentes atrios de entrada en Estaciones Intermodales nacionales e internacionales (11), se puede observar que en los laterales de estos grandes espacios suelen ubicarse diferentes locales comerciales, despachos para la venta de billetes, etc., y quioscos de prensa y souvenirs, maceteros y objetos ornamentales en su zona central.

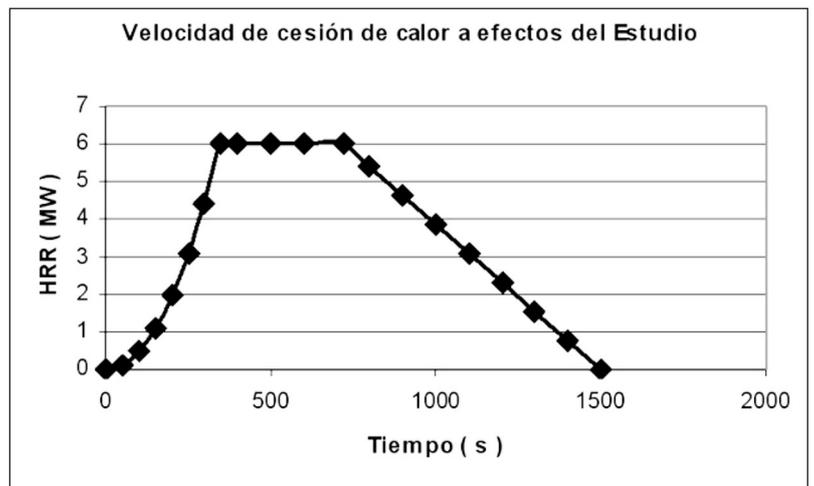
A efectos del Estudio se consideró inicialmente una curva de incendio correspondiente al incendio de un quiosco obtenida mediante un ensayo a escala real desarrollado por el National Institute of Standards and Technology –NIST– (12). Como puede apreciarse en la gráfica de velocidad de cesión de calor (ver figura 1), se trata de un incendio con un crecimiento asimilable a una curva  $t^2$  ultrarrápido –a partir de los primeros 600 s. de ensayo–, para continuar su desarrollo hasta que alcanza un valor máximo de velocidad de cesión de calor de 1,8 MW aproximadamente a los 1.700 s. A partir de ese instante comienza el decaimiento del incendio hasta el final del período de ensayo, aproximadamente a los 2.500 s.



- 1.- Velocidad de cesión de calor frente al tiempo durante el incendio de un quiosco (12).
- 2.- Velocidad de cesión de calor durante el incendio de un quiosco considerada en el estudio.
- 3.- Características arquitectónicas y distribución geométrica de aireadores en cubierta de los atrios objeto de estudio.

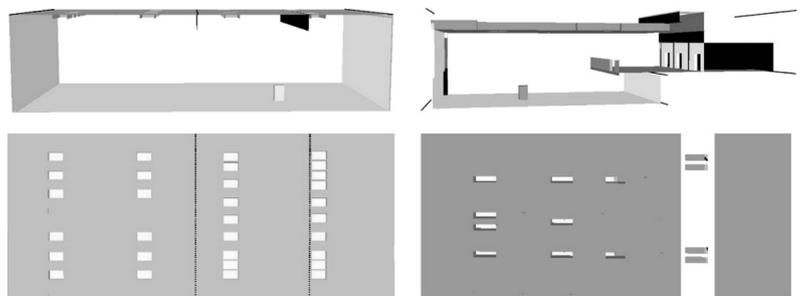
1

Sin embargo, como consecuencia de las reducidas dimensiones del quiosco ensayado, los valores de velocidad de cesión de calor fueron considerablemente mayorados –en base a la curva de velocidad de cesión de calor obtenida durante el incendio de un quiosco empleada en el Estudio “Performance Based Design Analysis Seattle Transportation Center” (13)–, a fin de representar un incendio de mayor severidad –6 MW de valor máximo de velocidad de cesión de calor que se mantienen durante cinco minutos–, que posibilite efectuar simplificaciones respecto al resto de los materiales combustibles considerados y su posible aportación al incendio.



2

La curva de velocidad de cesión de calor finalmente seleccionada (ver figura 2) se caracteriza por un ascenso en t-squared hasta los 6 MW durante 350 s., para mantenerse este valor máximo durante cinco minutos y descender linealmente hasta los 1500 segundos. Se corresponde, con el incendio de un quiosco de mayor tamaño –2 m x 1,5 m x 2,5 m– que contiene gran cantidad de material combustible en forma de papel de revistas y periódicos, cartones de embalaje de productos, material plástico de diferentes artículos, etc.



3

La influencia de la temperatura en el exterior de la Estación sobre la ventilación natural de los humos del incendio se analizó en dos grandes atrios: el primero de ellos diáfano –ATRIO 1–, con una altura libre de 14 m y una superficie de 3.700 m<sup>2</sup>, dividida en tres depósitos de humo mediante dos cortinas;

el segundo –ATRIO 2–, de menores dimensiones –25 m x 30 m de superficie en planta y 12,5 m de altura libre–, comunicado con un primer nivel en voladizo distante 6 m del suelo. La figura 3 muestra el alzado y planta de cada uno de ellos, así como la distribución de aireadores en cubierta inicialmente pre-

4.- El descenso de la capa caliente es especialmente significativo en las cercanías de la cortina de humo próxima al penacho.

vistos –de dimensiones 1,2 m x 2,7 m– para la ventilación natural de los humos.

La temperatura ambiental considerada en el exterior de cada atrio fue de 40 °C, mientras que la correspondiente al interior de cada uno de los escenarios de incendio fue de 20 °C. El análisis del movimiento de los humos se limitó –en base a la flotabilidad de los mismos– a la región ocupada por la capa de gases calientes bajo cubierta, instalando en diferentes localizaciones termopares y sensores de visibilidad para la toma de datos, en las cercanías de la cubierta y en cotas 5,5 m y 4,5 m bajo la misma en los atrios 1 y 2, respectivamente.

Los volúmenes bajo la cubierta objeto de análisis en cada uno de los escenarios resultaron divididos –a los efectos de los cálculos computacionales– en 1.555.200 celdas cúbicas de arista 0,25 m en el ATRIO 1 –y en 921.600 celdas<sup>1</sup> de dimensiones 0,5 m x 0,5 m x 0,25 m en el ATRIO 2–.

Además, dadas las grandes dimensiones del primer escenario de incendio, se optó –a los efectos de su implementación en el Modelo– por simplificar los elementos del escenario en planta baja, debido a su escasa influencia en el propósito del trabajo de investigación y a las ventajas ocasionadas en la reducción del tiempo de coste computacional.

Se representó la zona superior del recinto desde una cota de 8,25 m de altura respecto del suelo hasta la cubierta, y la zona inferior considerada desde el piso hasta la mencionada cota de 8,25 m fue restringida únicamente al entorno del quiosco considerado como fuente de ignición en los experimentos, basando esta simplificación en la consideración de que las fuerzas de flotabilidad –buoyancy– van a provocar que el humo y gases producto del incendio asciendan verticalmente hasta ocupar los espacios de mayor altura.

El volumen considerado alrededor del quiosco y hasta la cota de 8.25 m se dividió en celdas cúbicas cuya longitud de arista es de 0,05 m, mientras que en el resto del dominio –tal y como se ha indicado anteriormente –se han mantenido las celdas cúbicas de arista 0,25 m. De este modo, el dominio computacional resultó dividido en 3.155.200 celdas.

La selección de volúmenes de control en esa zona inferior, con celdas de tan pequeño tamaño para obtener buenos índices de resolución en los procesados, provocó que los tiempos de procesamiento fueran muy elevados –sirva como ejemplo que, para obtener resultados de los primeros 475 segundos de simulación, los equipos de procesamiento empleados– dos worstations con dos procesadores cada una de ellas, con velocidades de procesado de 3,06 GHz y 3,4 GHz por procesador y memoria RAM de 2 GB y 3 GB respectivamente –trabajando en multiproceso (multi-blocking)– con varios procesadores en paralelo, requirieron prácticamente de dos semanas para efectuar los cálculos.

### 3. RESULTADOS

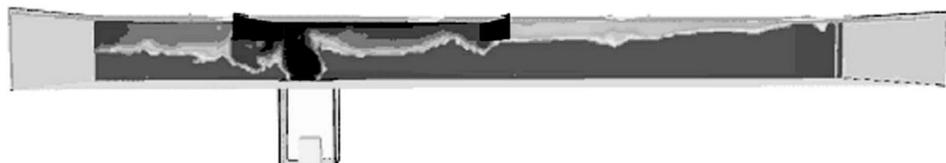
#### 3.1. Atrio 1

Como se observa en la figura 4, se dividió el atrio en tres depósitos de humo de superficie inferior a 2000 m<sup>2</sup> –en cumplimiento de la normativa vigente en España–, mediante la instalación de cortinas de humo. La división del atrio en depósitos de humo –tratando de delimitar el flujo de los gases calientes y su movimiento horizontal bajo la cubierta–, provocó un descenso de los humos especialmente significativo en las cercanías de las barreras de humo. Las masas de humos y aire produjeron un flujo adicional –doorjet– que originó la salida de los mismos del depósito, rebasando las cortinas de humo (ver figura 4).

Esta circunstancia carecería de importancia en recintos como el que nos ocupa, ya que la elevada altura libre hasta cubierta garantiza la seguridad de los ocupantes. Sin embargo, su trascendencia es mucho mayor en relación a la eficacia del sistema ventilación natural. El doorjet origina un retardo de los humos en la ocupación de las zonas alejadas al penacho, como consecuencia del efecto retenedor que las cortinas realizan durante los primeros instantes del incendio.

De este modo se favorece la entrada de aire caliente desde el exterior (ver figura 5), al encontrarse éste a mayor temperatura que la capa caliente de humos en el atrio, provocando que éstos dispongan de un menor volumen para su expansión y la pérdida

<sup>1</sup> Con el objeto de poder analizar la influencia ejercida por la temperatura exterior en combinación con las características arquitectónicas del edificio, en el caso del ATRIO 2, fueron consideradas zonas adyacentes al mismo con menor altura libre hasta cubierta.



de eficacia en gran número de los aireadores proyectados en cubierta –al producirse a través de los mismos la entrada de aire desde el exterior en lugar de la salida de los humos–, como puede observarse en la figura 6.

Si consideramos un atrio de gran volumen y altura H, con una única apertura en cubierta, la diferencia de presiones entre el interior y el exterior en dicha apertura será:

$$\Delta p = (\rho_o - \rho_i) gH \quad (\text{Pa}) \quad [3]$$

Las densidades de los humos y del aire en el interior y el exterior del atrio presentan diferentes valores en función de sus temperaturas, originando diferencias de presión –a través de los aireadores en cubierta– entre el interior y el exterior del recinto, las cuales favorecen bien la evacuación de los humos –cuando la temperatura de los estos es superior a la del medio ambiente exterior–, o bien la entrada de aire externo hacia el interior del recinto –cuando la temperatura externa supera la del aire y los humos en el interior del atrio–.

El resultado corrobora las indicaciones de otros documentos normativos, tales como la norma NFPA 92B, al no poder evacuarse

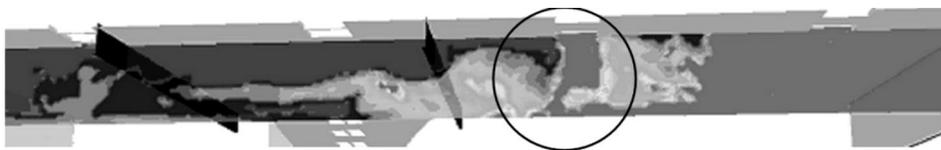
los humos adecuadamente a través de los aireadores y producirse un descenso de la capa caliente bajo la cubierta.

El tiempo transcurrido hasta que los humos comienzan a alcanzar las zonas alejadas al penacho favorece la entrada de aire caliente al interior del atrio y por tanto la inutilización de cierto número de aireadores naturales proyectados, lo cual originará la incapacidad del resto del sistema para evacuar al exterior los humos del incendio, al disponer de una menor superficie de ventilación para el mismo volumen de humos generado por el incendio.

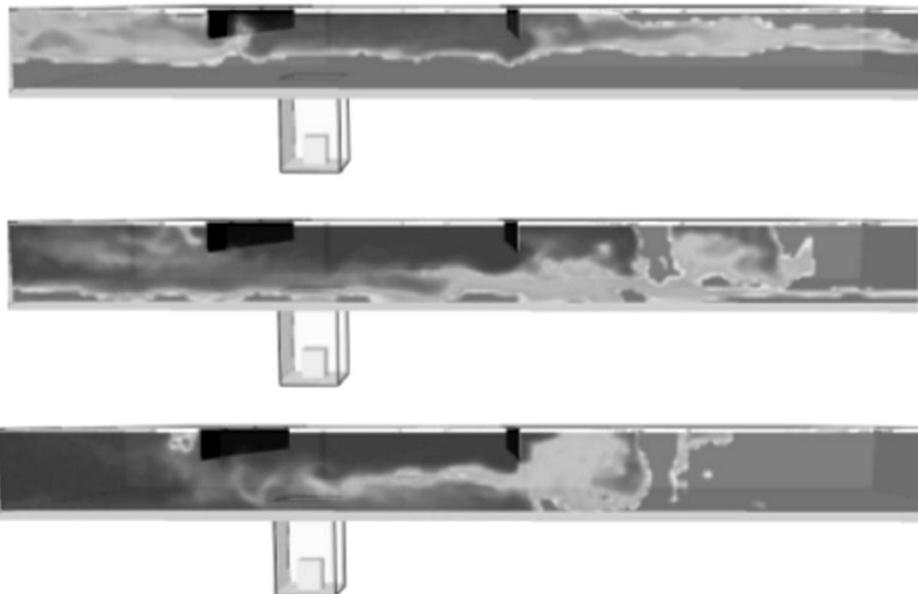
Si este mismo caso de estudio es analizado para situaciones en las que las temperaturas en el exterior son menores, puede constatar que a pesar del retardo de los humos en ocupar las zonas alejadas al penacho –provocado por las barreras de humo–, no se produce la entrada de aire desde el exterior al interior del recinto, con lo que la evacuación de los humos resulta eficaz y la capa de gases calientes bajo cubierta presenta un espesor menor y más estable durante los períodos de tiempo necesarios para asegurar el movimiento de los ocupantes durante la evacuación de la edificación.

5.- Detalle de la entrada de aire caliente desde el exterior a través de un aireador en cubierta, circunstancia que reduce el volumen disponible para la expansión de los humos.

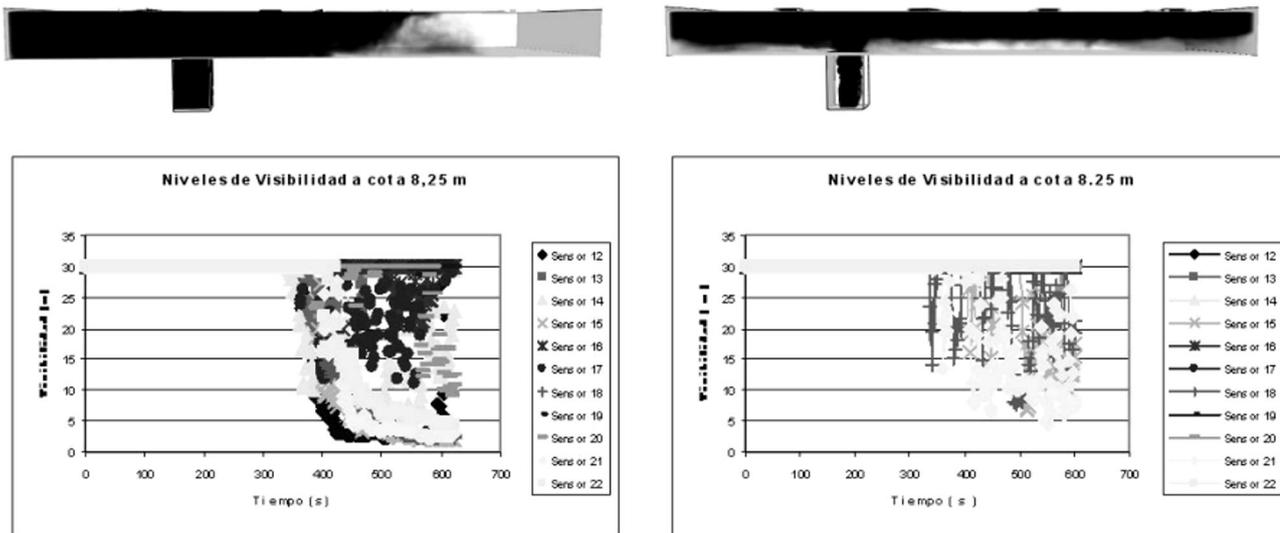
6.- Secuencia del movimiento el humo tras 240 s, 400 s y 600 s de incendio. La entrada de aire caliente desde el exterior lejos del penacho reduce el volumen disponible para la expansión de los humos.



5



6



7

7.- Movimiento de los humos y niveles de visibilidad cuando la temperatura en el exterior de la estación es de 40 °C (izquierda) y de 20 °C (derecha) respectivamente.

Para un mismo instante de tiempo, la figura 7 muestra cómo el espesor de la capa de humos es menor –al disponer de mayor volumen para su expansión–, en el caso en que la temperatura es de 20 °C tanto en el interior como en el exterior del atrio, que cuando en el exterior se alcanzan temperaturas que rondan los 40 °C.

Los resultados obtenidos a partir de los sensores de visibilidad muestran que tras 300 s de incendio, en el caso de existir elevadas temperaturas en el exterior del atrio, la visibilidad a 8,25 m sobre el nivel del suelo –es decir, unos 6 m bajo la cubierta– es apenas inexistente, mientras que cuando la temperatura exterior es cercana a los 20 °C, la visibilidad en esa cota apenas se reduce en los sensores cercanos al penacho, siendo de 30 m en el resto de las áreas. A la luz de los resultados obtenidos en este primer caso de estudio, puede concluirse que la influencia ejercida por una temperatura exterior elevada perturba el movimiento de los humos (descenso de la capa de humos).

### 3.2. Atrio 2

Constatada la influencia de la temperatura exterior sobre el sistema de ventilación natural, cabría preguntarse: ¿en qué medida puede verse o no potenciado este efecto en función de la altura libre del atrio y de sus características arquitectónicas?

En el caso del ATRIO 2, la altura libre disponible hasta la cubierta es 1,5 m inferior a la del atrio anterior. Además, aun considerando las zonas adyacentes al atrio –aumentando así el volumen disponible para la expansión de los humos– éste comunica directamente con un voladizo distante tan sólo 6 m de cubierta, con lo que los ocupantes de esa zona pueden resultar afectados en caso que

el espesor de la capa de humos superase los 4 m en esa zona<sup>2</sup>.

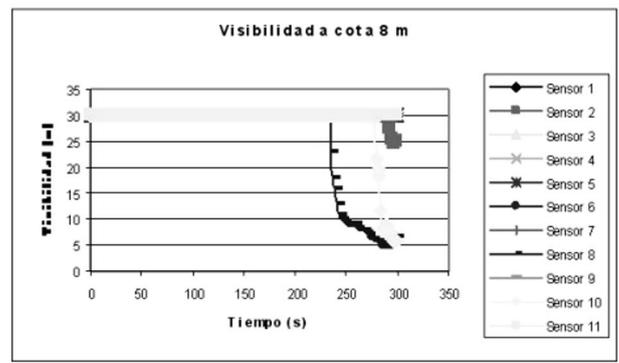
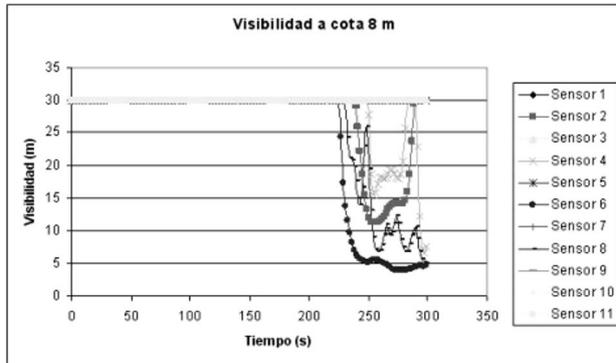
Al igual que en el caso anterior, se analizó el movimiento de los humos cuando la temperatura exterior fuese cercana a los 40 °C, para efectuar con posterioridad un análisis comparativo con los resultados obtenidos si la temperatura en el exterior y el interior del atrio fuese de 20 °C. La figura 8 muestra los niveles de visibilidad registrados 8 m sobre el suelo del atrio durante los primeros 300 s del incendio, tanto para el caso en que la temperatura exterior es de 40 °C (izquierda) como cuando ésta es de 20 °C (derecha).

Entre los 240 s y los 300 s (máximo periodo de tiempo estimado para el desarrollo de las tareas de evacuación de la estación en caso de incendio, según el análisis efectuado al respecto) (14), y cuando las temperaturas en el exterior son elevadas, la visibilidad se reduce considerablemente en la primera planta de la estación en voladizo sobre el atrio de entrada a la misma, a consecuencia del descenso de la capa de humos en esa zona. Por el contrario, este fenómeno apenas se aprecia si la temperatura en el exterior es de unos 20 °C.

La capa de humos únicamente desciende en zonas puntuales debido a la limitación al movimiento horizontal de la misma bajo cubierta ejercida por las fachadas de los locales en primera planta, que actúan a modo de barreras de humo arquitectónicas.

No obstante, en instantes de tiempo posteriores, la eficacia del sistema de ventilación natural disminuyó considerablemente, ya que aunque la acumulación de la capa de humos bajo la cubierta elevó la temperatura de éstos, el volumen de gases calientes

<sup>2</sup>Considerando como espacio seguro aquél en el que exista al menos una altura libre de humos de 2 m sobre el suelo.



acumulados fue muy superior al considerado para el dimensionamiento de la superficie de ventilación requerida (según la metodología de la norma UNE 23585), resultando insuficiente.

Como muestran las imágenes superiores de la figura 8, la existencia de elevadas temperaturas en el exterior del atrio da lugar a que la evacuación natural de los humos resulte afectada, provocando un descenso más acusado de la capa de gases calientes.

Este hecho no se manifiesta cuando la temperatura exterior e interior se encuentran en un mismo rango, al no producirse una entrada de aire desde el exterior a través de los aireadores.

La evacuación de los humos –más calientes que el aire exterior– tiene lugar con mayor eficacia al disponerse de toda la superficie de aperturas proyectadas en cubierta, ya que no se inutiliza ninguna de ellas por haber posibilitado la entrada de aire caliente en lugar de la salida de humos.

Se desprende por tanto que, transcurrido este intervalo de tiempo los ocupantes de la zona en voladizo sobre el atrio de la estación comenzarían a resultar afectados por los efectos de los humos del incendio –toxicidad y disminución de los niveles de visibilidad–, mientras que cuando la temperatura exterior no es elevada, el espesor de la capa de humos bajo la cubierta tiende a estabilizarse, lo que pone de manifiesto una vez más la importancia de considerar este factor durante el diseño del sistema de ventilación natural.

A diferencia del anterior caso de estudio –atrio diáfano de gran superficie y altura libre hasta cubierta–, en este atrio las características arquitectónicas de la edificación

adquieren un papel especialmente relevante en relación al movimiento, control y evacuación de los humos y la influencia ejercida por la temperatura en el exterior de la estación.

En estos espacios, la altura libre ejerce un importante papel en el control del movimiento de los humos, ya que durante el ascenso del penacho se incorpora al mismo un gran volumen de aire fresco procedente de sus alrededores, causando un enfriamiento de los humos y la consiguiente disminución de flotabilidad.

Podría deducirse que en aquellos atrios con menor altura libre hasta la cubierta, la evacuación de los humos del incendio mediante ventilación natural ofrecería mejores resultados, al incorporarse al penacho un menor volumen de aire y alcanzar los gases calientes las zonas altas con una mayor temperatura que si la altura libre fuese mayor.

No obstante, la influencia de la temperatura exterior seguiría manifestándose, ya que aunque esta circunstancia podría impedir la entrada de aire caliente desde el exterior al interior del atrio –como demuestra este segundo caso de estudio, al alcanzar los humos la cubierta sin apenas retardo y, por tanto, con mayor temperatura–, la diferencia de densidades entre el aire del exterior y los humos del incendio imposibilitaría o dificultaría en gran medida su evacuación a través de los aireadores de cubierta<sup>3</sup> –como sucede en este caso–.

Además, la temperatura exterior puede afectar al sistema incluso antes de la apertura de los aireadores –inutilizados en su función de renovación de aire en días calurosos, al permanecer cerrados para favorecer la acción del aire acondicionado del edificio–. El calor acumulado en el atrio cerca de la cubierta,

8.- Una temperatura en el exterior de la estación de 40 °C (izquierda) dificulta la evacuación de los humos y disminuye los niveles de visibilidad en planta primera. Esta circunstancia no se produce cuando la temperatura en el exterior e interior de la estación es de 20 °C (derecha).

8

<sup>3</sup>El Código Técnico de la Edificación define atrio como un “Espacio diáfano con altura equivalente a la de varias plantas del edificio comunicadas con dicho espacio mediante huecos, ventanas, balcones, pasillos abiertos, etc.” (15), con lo que el volumen de gases calientes del penacho producto de la combustión resultaría despreciable frente al volumen de aire fresco incorporado al mismo, disminuyendo así notablemente su temperatura.

por su exposición al sol en las horas centrales del día, puede llegar a formar una capa de aire caliente en esa zona que impida que los humos alcancen la cubierta, reduciendo más aún la altura libre de ascenso del penacho y dificultando enormemente la evacuación de los humos a través de los aireadores (16) ya que, como se ha indicado, la acumulación de humos bajo la cubierta resultaría muy superior al volumen de gases calientes considerado en el proyecto de diseño de la instalación. Por último, señalar que los periodos de tiempo empleados para el análisis del movimiento de los humos son considerablemente reducidos respecto al inicio del incendio (máximo cinco minutos).

Este hecho no viene sino a constatar la importancia de la consideración de este fenómeno y el estrecho margen de tiempo con que cuentan los ocupantes para realizar la evacuación de estos recintos –habitualmente muy concurridos– en caso de incendio.

La influencia de la temperatura en el exterior del atrio de la estación puede resultar decisiva para la seguridad de los ocupantes (17), pudiendo resultar afectados por un descenso del nivel de visibilidad que dificulte en gran medida el desarrollo de las tareas, tanto de evacuación, como de rescate y extinción del incendio, y en menor medida por la toxicidad de los humos –en dependencia del reactante y de las especies resultantes durante la combustión–.

#### 4. CONCLUSIONES

Los cálculos realizados para el análisis del control del movimiento de los humos están basados en métodos científicamente fundamentados y reconocidos a nivel internacional. Los resultados, basados en la comprensión de la dinámica del incendio y los humos, teniendo en cuenta las simplificaciones de los Modelos, proporcionan una estimación fiable y realista de los fenómenos puestos en juego.

A la luz de los resultados de los diferentes escenarios de incendio, los Modelos de Simulación Computacional de Incendios fueron herramientas muy útiles para la predicción del movimiento de los humos en recintos cerrados, facilitando también información relevante –niveles de visibilidad, temperaturas, etc–.

#### REFERENCIAS

- (1) McGrattan, K. "Fire Dynamics Simulator (Version 4.07) – Technical Reference Guide", p. 112, National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg (Maryland), 2006.

El sistema de control de humos en grandes atrios basado en ventilación natural solamente es capaz de ofrecer buenas prestaciones cuando la temperatura exterior sea en todo momento inferior a la temperatura de los humos. En aquellos atrios donde se disponga de sistema de aire acondicionado, el sistema de ventilación natural de los humos no trabajará de forma eficiente si la temperatura ambiental exterior es elevada, ya que al ser espacios con elevada altura libre hasta la cubierta, el volumen de humos bajo la misma estará conformado en su mayor parte por el aire fresco incorporado al penacho durante su ascenso. Si este aire está siendo refrigerado, contribuirá al enfriamiento de los humos de modo que su temperatura sea inferior a la del aire exterior, imposibilitando su evacuación.

Las características arquitectónicas de la edificación –altura libre y distribución geométrica de los espacios– adquieren un papel especialmente relevante en relación al movimiento, control y evacuación de los humos y la influencia ejercida por la temperatura en el exterior de la estación, ya que pueden potenciar sus efectos adversos.

Un diseño que no contemple este factor y su interacción con la arquitectura del edificio puede resultar inadecuado, al ejercer una influencia decisiva para la consecución de la Seguridad de las personas durante las tareas de evacuación, rescate y extinción del incendio, tanto por los efectos de toxicidad de los humos como por la disminución de los niveles de visibilidad desencadenados en un breve intervalo de tiempo, con especial trascendencia en espacios especialmente concurridos, caso de los atrios de las Estaciones Intermodales de Transporte Ferroviario de Pasajeros.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación del Ministerio de Fomento, ya que el Estudio fue financiado por la Convocatoria de Subvenciones para la realización de actividades relacionadas con las infraestructuras, los sistemas de transportes y las demás competencias del Ministerio de Fomento (ORDEN FOM/1942/2006 de 31 de mayo publicada en el BOE nº 145 del 19 de junio de 2006).

- (2) J.H. Klote, J.A.Milke. "Principles of Smoke Management". p. 207. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Society of Fire Protection Engineers. Atlanta, 2002.
- (3) Morton, B.R., Taylor, G., Turner, J.S. "Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources". Proceeding of the Royal Society of London, Vol. 234 (1956), pp. 1-23.
- (4) B.M. Cetegan, E.E. Zukoski, T. Kubota. "Entrainment and Flame Geometry of Fire Plumes", p. 203, Ph.D Tesis of Cetegan. California Institute of Technology. Pasadena, 1982.
- (5) McCaffrey, B.J. "Momentum Implications for Buoyant Diffusion Flames". Combustion and Flame, Vol. 52, Nº 2 (1983), pp. 149-167.
- (6) Heskestad, G. "Engineering Relations for Fire Plumes". Fire Safety Journal, Vol. 7, Nº 1 (1984), pp. 25-32.
- (7) UNE 23585, "Sistemas de control de temperatura y evacuación de humos (SCTEH). Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y evacuación de humos en caso de incendio". AENOR. 2004.
- (8) Edition.Fire Precautions in the design, constructions and use of buildings. British Standar BS-5588. 1997.
- (9) Protection incendie dans les bâtiments - Conception et calcul des installations d'évacuation de fumées et de chaleur (EFC). NBN.S.21-208-1. 1995.
- (10) NFPA 92B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Area. National Fire Protection Association (NFPA), 2000.
- (11) J.A. Capote *et al.* "Estudio sobre las Tendencias en la Evolución y Transformación en la Construcción y Arquitectura Industrial de las Estaciones Ferroviarias y su Integración en el Espacio Urbano". Grupo GIDAI. Universidad de Cantabria. Santander, 2003.
- (12) Beall, K.A. (ed.), "Thirteenth Meeting of the UJNR Panel of Fire Research and Safety, Volume 1". National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg (Maryland), 1997.
- (13) Koffel, W.E. "Performance Based Design Analysis Seattle Transportation Center", National Institute of Standards and Technology, NIST. Fifth International Conference on Performance- Based Codes and Fire Safety Design Methods, Luxembourg, 2004.
- (14) J.A. Capote *et al.* "Modelado del Movimiento y Conducta Humana en caso de Emergencia en Edificios singulares", Americas Fire and Security Expo. Miami, 2008
- (15) Código Técnico de la Edificación (CTE). Ministerio de Vivienda, 2006.
- (16) J.H. Klote. "Method of Predicting Smoke Movement in Atria with Application to Smoke Management", p. 94, Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology (NIST), NISTIR 5516, Gaithersburg (Maryland), 1994.
- (17) J.A. Capote *et al.* "Informe Resumen de la Investigación 8. Estudio del Movimiento de los Humos en caso de Incendio en Grandes Atrios de Estaciones Ferroviarias de Pasajeros mediante Modelado y Simulación Computacional", p. 149, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.

\* \* \*