

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

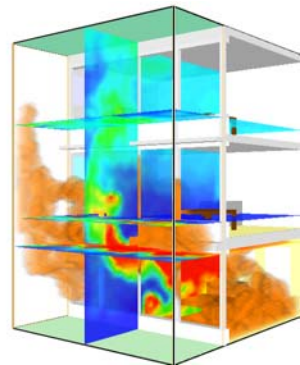
ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

FASE EXPERIMENTAL

6

Implementación de técnicas de simulación computacional de incendios
en las tipologías de fachada propuestas



6.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla el tema central de la presente tesis, el cual consiste en la descripción de los escenarios simulados y los análisis de los resultados obtenidos a partir de éstos. El estudio se ha realizado mediante técnicas de modelado y simulación computacional de incendios, lo cual ha permitido evaluar la propagación del fuego a través de la fachada considerando diferentes factores.

El propósito principal de esta fase experimental es aproximarse al fenómeno de la propagación exterior del fuego mediante una muestra representativa de escenarios de incendio, los cuales reflejan situaciones concretas en el diseño de las fachadas que requieren ser revisadas desde el punto de vista de la seguridad contra incendios.

En el apartado 6.2 se explica el criterio con el cual se han abordado los diferentes elementos analizados en el estudio y su relación con los tipos de fachada considerados. Este planteamiento da lugar a los distintos escenarios de incendio, cada uno de los cuales representa un aspecto de evaluación. De forma complementaria en el apartado 6.3 se detallan gráficamente estos aspectos de evaluación y su implementación en los escenarios.

El escenario básico de simulación consiste en un módulo de 4,90 x 4,00 m y tres plantas de altura (planta baja más dos). Se ha concebido como si se tratase de un cubículo para realizar pruebas de laboratorio reales, solo que se trata de una representación aproximada que ofrece la alternativa de probar diversas variables bajo unos parámetros de simulación establecidos. A grandes rasgos, las pruebas consisten en observar los efectos de un incendio que se origina en la planta baja del módulo y se propaga hacia el exterior a través de las ventanas. En el apartado 6.4 se especifican las características generales del dominio computacional y se describen los escenarios de simulación. Se han planteado unos parámetros de partida comunes a todos los escenarios y unas características particulares en cada uno. Estas últimas representan los diferentes factores a estudiar y corresponden a variables geométricas, incorporación de elementos constructivos, flujos de viento, temperatura, etc.

Dada la complejidad del fenómeno del fuego y los numerosos procesos que comprende, este estudio se ha centrado principalmente en la evaluación de algunos aspectos físicos de su desarrollo, los cuales son de gran importancia en la dinámica

del incendio. Para ello se han considerado varios factores que se pueden agrupar en tres aspectos principales: la configuración geométrica de la fachada, los elementos constructivos de la fachada y los factores climatológicos. A partir de estas situaciones definidas se evalúan los posibles efectos de la propagación del incendio y se analizan variables del comportamiento del fuego tales como: la evolución del incendio, la trayectoria, forma y longitud de las llamas, la velocidad de propagación, la intensidad del flujo de calor, la superficie de exposición al fuego, etc.

En el apartado 6.5 se realizan los análisis de los resultados obtenidos de cada escenario mediante un estudio comparativo según corresponda a cada caso. De estos análisis se han obtenido buena parte de las conclusiones del estudio. En el punto 6.6 se realiza una síntesis del capítulo que reúne las apreciaciones más relevantes de los análisis.

El concepto que usualmente se asocia con la peligrosidad de un incendio es la carga de fuego, representada en el material combustible presente en el recinto. Sin embargo, pese a que es un factor muy importante en relación a la naturaleza de un incendio, no es el más determinante en todas las situaciones. Algunos expertos, sin desconocer la importancia de la carga de fuego, opinan que considerarla como único parámetro es técnicamente obsoleto (NFPA, 1993: 1.179) porque equivale a reconocer solamente el papel de uno de los reactivos (el combustible) del tetraedro del fuego. En la actualidad es ampliamente reconocido que el desarrollo de un fuego en plenitud depende en gran medida del segundo reactivo, es decir, de la cantidad de aire presente y de la que fluye al recinto, así como de la cantidad de material combustible y su disposición. Por la ley química de acción de masas (ver apartado 4.1.6) se sabe que la velocidad de reacción de un material está determinada por las concentraciones de los dos reactivos, en este sentido tanto el material combustible como las aberturas de las ventanas, y en particular el factor de ventilación que depende del tamaño de éstas tienen un papel importante.

En relación a este estudio, en el cual el propósito central es observar y valorar los efectos de la propagación exterior del fuego, los principales factores de evaluación están relacionados con dos factores físicos: la ventilación y la configuración geométrica del medio de propagación del fuego, que en nuestro caso es la fachada.

La influencia de los materiales combustibles ha sido también considerada, pero sólo en situaciones puntuales en las cuales la aportación del calor liberado por el material

combustible es complementaria a los efectos de la geometría y la ventilación. Por lo tanto, las fachadas de los escenarios están constituidas en su mayoría por materiales no combustibles. Los detalles relacionados con los procesos de combustión, degradación química o pirolisis de las superficies expuestas al fuego no forman parte de los propósitos centrales de este estudio.

El programa empleado para realizar la fase experimental de esta investigación es el FDS. Como se explicó en el capítulo anterior, es un modelo de dinámica computacional de fluidos especializado en los procesos que gobiernan el fenómeno del fuego. El FDS es una potente herramienta que permite evaluar situaciones de incendio determinadas considerando diversas variables. Sin embargo, también tiene algunas limitaciones, debidas principalmente a la enorme complejidad de los fenómenos que describe y a las muchas simplificaciones requeridas para caracterizar los escenarios.

El FDS describe los principales fenómenos físico-químicos asociados tanto a la fase sólida de los materiales como a la fase gaseosa. Cabe mencionar que el estado del arte del conocimiento y descripción de los fenómenos que se dan en una y otra situación se encuentran en un nivel de desarrollo muy distinto. En general, se considera que la combustión y la radiación que definen lo que ocurre sobre las superficies expuestas, es decir, “cerca del fuego”, no está en una etapa de desarrollo muy avanzada, mientras que lo que ocurre “lejos del fuego”, que viene definido principalmente por el mecanismo de convección y la mezcla de gases, ha alcanzado un buen nivel de aproximación avalado por diferentes estudios publicados [1]. No obstante, el FDS admite aplicar modelos de transmisión de calor para caracterizar sobre las superficies procesos como la pirolisis o la carbonización que sufren materiales como la madera. El modelo contempla la conducción térmica en el interior del material, la vaporización de su humedad y la degradación del material virgen a formas de combustible gaseoso o carbón (Alvear et al., 2007: 121).

Es innegable la importancia que tienen los fundamentos químicos en la comprensión de muchos aspectos del comportamiento del fuego y en especial de la combustión, sin embargo, el estudio detallado de estos procesos no forma parte los propósitos de este estudio. Por otro lado, la normativa ha ido aumentando paulatinamente las restricciones respecto al empleo de materiales combustibles y con ello ha contribuido a disminuir el riesgo en este sentido, salvo en algunas situaciones concretas que serán abordadas en el apartado 6.5.2.

Las distintas consideraciones mencionadas anteriormente definen el contexto de los análisis. Para ello se ha establecido un acuerdo entre: los aspectos de mayor interés en relación al objeto de estudio, la información y conocimiento disponibles para elaborar los escenarios, las posibilidades del programa FDS, el tiempo requerido para calcular cada escenario y los recursos informáticos disponibles. Todo ello sin perder de vista la perspectiva arquitectónica del estudio y la intención de obtener resultados razonables y útiles en términos prácticos. Llegados a este punto cabe aclarar que el estudio no pretende ofrecer respuestas absolutas a la problemática de la propagación exterior del fuego, sino aportar unas estimaciones y aproximaciones a su comportamiento de acuerdo a las situaciones planteadas, así como evaluar ciertas tendencias del fenómeno que permitan determinar posibles efectos y riesgos asociados a la propagación exterior del fuego, todo ello en relación al diseño de las fachadas.

Teniendo en cuenta que el estudio comprende diferentes tipos de fachadas y a su vez distintos aspectos de análisis en cada una se ha establecido una terminología para facilitar la lectura de la información. Al final del capítulo se han recogido todos los conceptos con su significado. También se detallan en el catálogo de fichas que aparece al final de este apartado y en su contexto correspondiente en los análisis.

Durante la fase de calibración y ajuste de los escenarios ha sido de suma importancia el soporte técnico brindado por el personal experto del Laboratorio del Fuego de la EPSEB de la UPC. En este proceso se ha buscado aproximar de forma razonable la descripción de los fenómenos simulados a una situación real. En la Fig. 6.1 se puede apreciar el esquema general que estructura la fase experimental del estudio. Los distintos pasos que comprende el proceso se irán explicando a lo largo de este capítulo.

6.2 Definición de los criterios de análisis

Tal como se ha expresado en el resumen anterior, el criterio con el cual se ha realizado este análisis responde a distintas consideraciones. Éstas derivan tanto de los aspectos de mayor interés del objeto de estudio (la fachada), como de las posibilidades y limitaciones de la técnica computacional empleada. A continuación se amplían algunas de estas consideraciones antes de entrar en la descripción detallada de los aspectos de evaluación que se realiza en el apartado 6.3.

Fase experimental del estudio

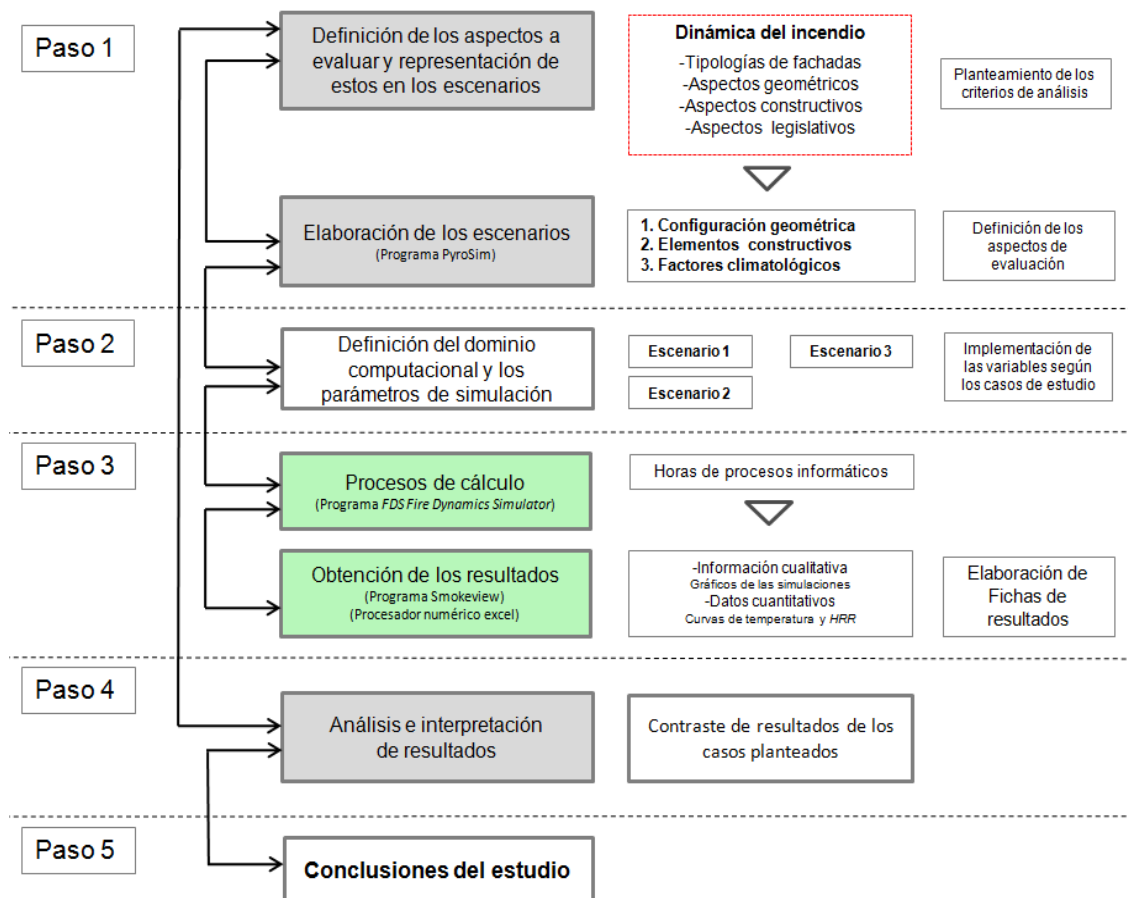


Fig. 6.1 Esquema general de la fase experimental de la investigación.

En la fachada del edificio convergen ciertos factores que favorecen la dinámica del incendio: su ubicación en contacto con el exterior, su composición geométrica, la verticalidad de la superficie, las condiciones climatológicas, etc. Todos ellos son determinantes en una situación de incendio y su consecuente propagación.

Normalmente la propagación exterior del fuego se da como consecuencia de una situación de *flashover* (combustión súbita generalizada) en el interior de un recinto. A partir de este evento, el cual evidencia que el incendio comienza una fase de total desarrollo, los vidrios de las ventanas se rompen dando paso a la descarga de llamas y humos a través de las aberturas de la fachada. Dadas estas circunstancias y mientras exista suficiente material combustible, las condiciones que se dan en la fachada son ideales para el desarrollo de los procesos de combustión. Los factores

que contribuyen en mayor medida a esta situación son: el suministro ilimitado de oxígeno y la presencia de flujos de ventilación. Otra circunstancia favorable es la orientación y geometría del medio de propagación. El flujo natural del fuego, gracias a los mecanismos de convección, asciende paralelamente a la superficie de la fachada incidiendo sobre ésta. Dependiendo de distintos factores, de los cuales se hablará en detalle en el apartado 6.5, esta incidencia tendrá distintas características y efectos sobre la fachada.

Como se ha indicado antes, todos estos aspectos están relacionados con los fenómenos físicos que rigen la dinámica del incendio y son relevantes para evaluar el comportamiento del fuego y su propagación exterior. De forma general, es aceptado que los factores geométricos de la superficie y la orientación de la muestra pueden llegar a tener mayor influencia en la velocidad de propagación de la llama sobre un material sólido que sus propias características físicas y químicas (Tuhtar, 1990: 20).

Con el propósito de abordar estos aspectos considerando distintas variables se han definido algunos factores agrupados en tres temas generales:

1. Configuración geométrica de las fachadas
2. Elementos constructivos de las fachadas
3. Factores climatológicos

Se pretende que mediante los factores considerados sea posible evaluar algunas tendencias que definen el comportamiento del fuego en determinadas situaciones. Cada escenario de incendios realizado corresponde a un factor considerado o a una de sus variables. En la Fig. 6.4 se muestra una panorámica general de los aspectos estudiados.

Los factores y variables propuestos representan, en unos casos, situaciones relacionadas con el diseño de las fachadas, en otros, cuestionan las medidas exigidas por la normativa en materia de propagación exterior del fuego. También se centran en revisar ciertos puntos críticos relacionados con los elementos que componen las fachadas ligeras. Con el propósito de trasladar los aspectos estudiados a situaciones concretas y teniendo en cuenta que los modelos de simulación son una representación simplificada de la realidad, se han definido en los escenarios cuatro variables de fachada que representan cuatro tipologías: **FOC** fachadas opacas convencionales, **FOV** fachadas opacas ventiladas, **FV** fachadas de vidrio (muros cortina) y **FV+BS**

fachadas de vidrio con elemento de control solar tipo *brise soleil*. En la Fig. 6.2 se relaciona cada tipo de fachada con el escenario que la representa y se describen las principales características de cada uno.



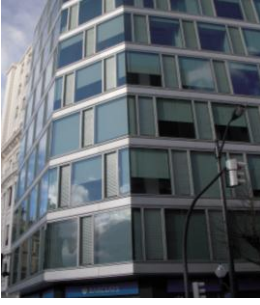
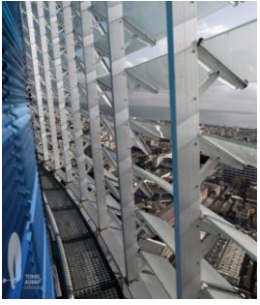
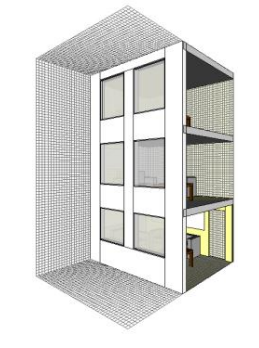
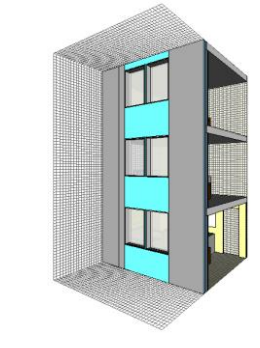

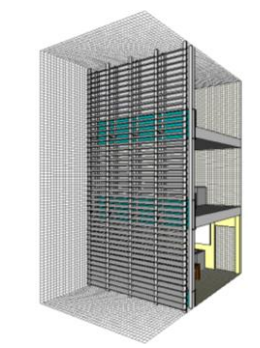
			
FOC	FOV	FV	FV+BS
Fachada opaca convencional	Fachada opaca ventilada	Fachada de vidrio (muro cortina)	Fachada de vidrio con <i>brise soleil</i>
Normalmente consiste en una hoja exterior de ½ pie de ladrillo, una cámara de aire sin ventilación que aloja el aislamiento térmico y un tabique interior de 4 a 6 cm de grueso o un trasdosado de paneles de yeso.	Consta de una hoja interior firme y resistente (normalmente de ½ pie de ladrillo o panel prefabricado de hormigón) que hace de soporte de una piel exterior no portante, ligera que está compuesta por una subestructura metálica de sujeción y un revestimiento que puede ser de diferentes materiales. Separando ambas caspas hay una cámara de aire ventilada y la capa de aislamiento térmico que va sujeta a la capa de soporte.	Se trata de una fachada ligera constituida por una subestructura metálica y un revestimiento total o parcial de vidrio. Por lo general tiene una parte opaca conformada por paneles con diferentes capas, entre otras, el aislamiento térmico, el revestimiento interior y exterior. La subestructura va sujeta a los forjados del edificio y es la encargada de vincular la piel exterior ligera con la estructura del edificio.	Es un elemento exterior usado, generalmente, para el control solar en edificios con fachadas de tipología, muro cortina. Configura una segunda piel exterior abierta, la cual consta de una subestructura metálica y lamas horizontales que pueden ser de vidrio, aluminio, cerámica etc.
			

Fig. 6.2 Tipos de fachada considerados en el estudio y los Correspondientes escenarios de simulación que los representan.

Clasificación de las fachadas: Dr. Arq. Jaime Avellaneda [2].

Los aspectos estudiados en relación a la configuración geométrica y los factores climatológicos son aplicables a los cuatro tipos de fachada propuestos puesto que abordan situaciones que no dependen de los sistemas de fachada o de los materiales constructivos. Sin embargo, los aspectos estudiados en referencia a los tipos constructivos tratan situaciones puntuales de cada tipo de fachada, ya sea esta **FOV**, **FV** o **FV+BS**. En la parte inicial de cada análisis (ver apartado 6.5) se especifica el tipo de fachada a la cual se pueden aplicar las observaciones correspondientes.

Con esta misma intención de extrapolar los casos de estudio a situaciones reales se ha tenido en cuenta que las fachadas de cada escenario cumplan con las disposiciones contempladas por el CTE para la protección frente a la propagación exterior y en particular en lo referente a las franjas de separación entre las aberturas de las ventanas [3-4], la proporcionalidad de los elementos salientes respecto a las franjas [4] y las clases de reacción al fuego de los materiales [5].

La problemática principal de este estudio se centra en dos aspectos de la fenomenología del incendio: el recinto de origen de origen del fuego y el medio de propagación. En nuestro caso, estos se desarrollan en la PB la planta baja del módulo y en la fachada respectivamente. Aunque las observaciones principales del estudio se centran en la fachada del edificio, todo aquello que afecte el desarrollo del incendio en el recinto también repercute en la propagación exterior del fuego. El medio reactivo está constituido por los elementos del tetraedro del fuego (ver apartado 4.1.1) y las condiciones necesarias para que se inicie y se mantenga la reacción en cadena que genera el incendio. En el caso que nos ocupa, se ha dispuesto para todos los escenarios un recinto típico de salón de vivienda en el cual se han predeterminado unos parámetros idóneos para que el incendio evolucione hasta alcanzar la fase de *flashover*. Los efectos de mayor interés para los análisis se dan en la fase *post-flashover*, es decir, cuando se proyecta el penacho de fuego hacia el exterior del recinto y el incendio se propaga a través de la fachada. Los factores de evaluación planteados se relacionan tanto con el recinto de origen del incendio como con la fachada. En las observaciones y análisis se pretende determinar en qué forma afectan el desarrollo del incendio y repercuten en la trayectoria, amplitud e intensidad de la propagación.

Las hipótesis asumidas en cada escenario también son muy importantes dentro de los parámetros de entrada de los escenarios de simulación. El planteamiento de las hipótesis está relacionado con las posibles vías de propagación del fuego (ver

apartado 4.4) y con los tipos de fachada. En la parte inicial de cada análisis se realiza una breve introducción en la cual se explican los parámetros de partida y las hipótesis consideradas en cada caso (apartado 6.5).

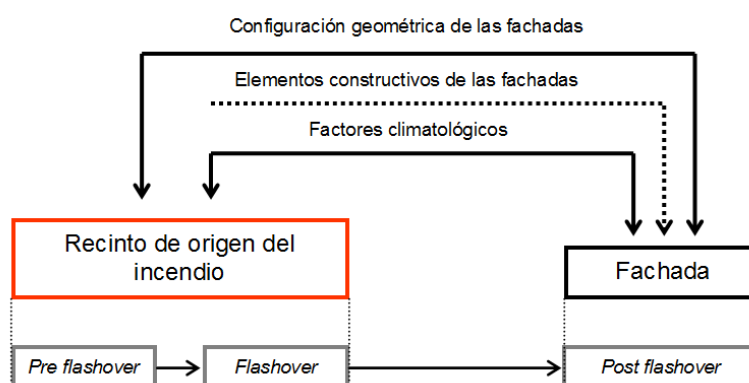


Fig. 6.3 Esquema que relaciona los aspectos de evaluación con el recinto del incendio y el medio de propagación (fachada).

La aproximación al estudio de diferentes problemas en la edificación ha cambiado con la aparición de los programas de simulación computacional. En este caso en particular, el uso de esta herramienta ha posibilitado llevar a cabo un estudio que de otra forma resultaría inviable de realizar. Aunque las técnicas de modelado y simulación computacional de incendios no son homologables a los métodos de ensayo especificados por la normativa, su aplicación permite valorar diversas situaciones de riesgo, probar distintas hipótesis y variables, lo cual contribuye en gran medida a la investigación de métodos de prevención, protección y lucha contra incendios.

Todo estudio realizado mediante técnicas de simulación tiene asociado algún grado de incertidumbre. En el caso de estudios enfocados en el fenómeno del fuego esta incertidumbre se debe en buena parte a la complejidad misma del fenómeno. El nivel de incertidumbre de los resultados puede ser mayor o menor en función de los datos de los que se disponga para el modelado del problema y de acuerdo a los resultados que se quieran alcanzar. Cuanto más amplios sean los resultados esperados, mayor cantidad de datos experimentales serán necesarios, y cuanto más detalle se espere de los resultados, mayor precisión se tendrá que incorporar en el dominio computacional. Esto último implica realizar una malla más fina en el dominio computacional, lo que se traduce en mayor número de horas de cálculo. Es por ello que se ha delimitado el estudio considerando: la información disponible para elaborar los escenarios, los aspectos de análisis posibles de abordar, un coste de cálculos computacionales

aceptable para cada escenario y un número de variables razonable y factible de ilustrar con claridad en este documento. Los parámetros definidos en el dominio computacional, los datos de entrada e hipótesis asumidas en los escenarios se explicarán en el siguiente apartado del capítulo.

Los aspectos estudiados en los escenarios de incendio están relacionados en buena medida con la geometría de las fachadas, ya sea en la configuración general o en la disposición de los elementos que las componen, lo cual en definitiva es también un asunto geométrico. Estas consideraciones relacionadas con la dinámica del fuego están asociadas a procesos como la mezcla de gases y el movimiento de los flujos de calor, en los cuales el mecanismo de transferencia de calor por convección tiene un papel fundamental. En estos casos la precisión del modelo FDS es muy alta, puede predecir flujos de velocidad y temperaturas con un grado de error de entre el 5% y el 20% dependiendo de la proporción de la rejilla (Alvear et al., 2007: 183), por este motivo el estudio se ha orientado en torno a estos aspectos de análisis. Hay dos formas de aproximarse al problema planteado en un estudio de estas características: El estudio detallado de la combustión y el estudio de los efectos producidos por el fuego en distintos escenarios [Chow 1995]. La presente investigación se ubica en la segunda opción, puesto que se pretende evaluar los efectos del incendio en unas situaciones concretas.

6.3 Fichas descriptivas de los aspectos a evaluar

Teniendo en cuenta las diferentes variables que aborda el estudio en referencia a las tipologías de fachada propuestas, las condiciones climatológicas y la normativa aplicable, se ha considerado oportuno elaborar unas fichas descriptivas que permitan apreciar los aspectos tenidos en cuenta en los análisis de los escenarios simulados. Esta secuencia corresponde al paso 1 del esquema general de la fase experimental (Fig. 6.1). En el apartado 6.7 se puede encontrar un cuadro general que recoge toda la terminología y siglas empleadas para identificar las tipologías y componentes de los escenarios.

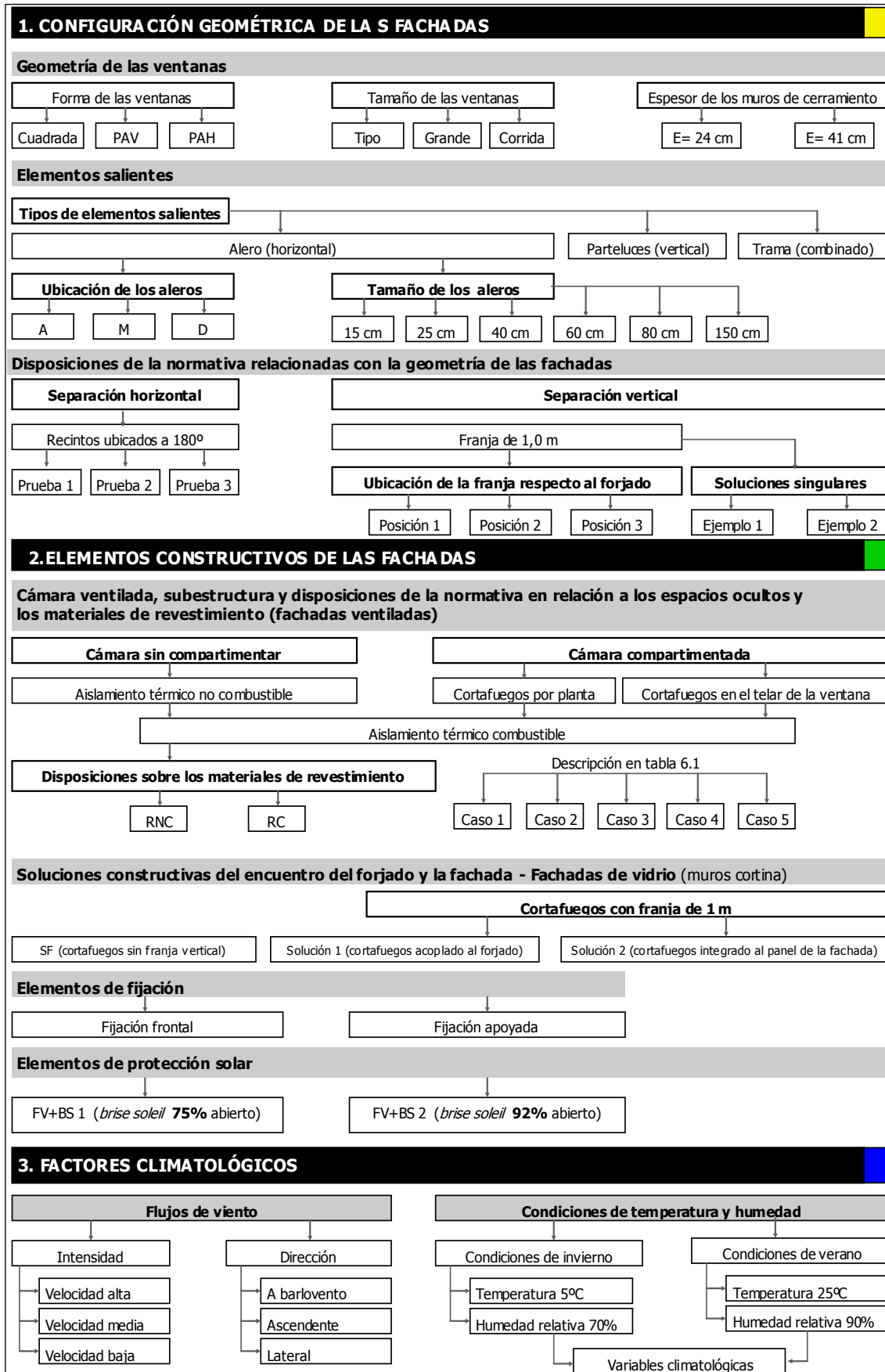
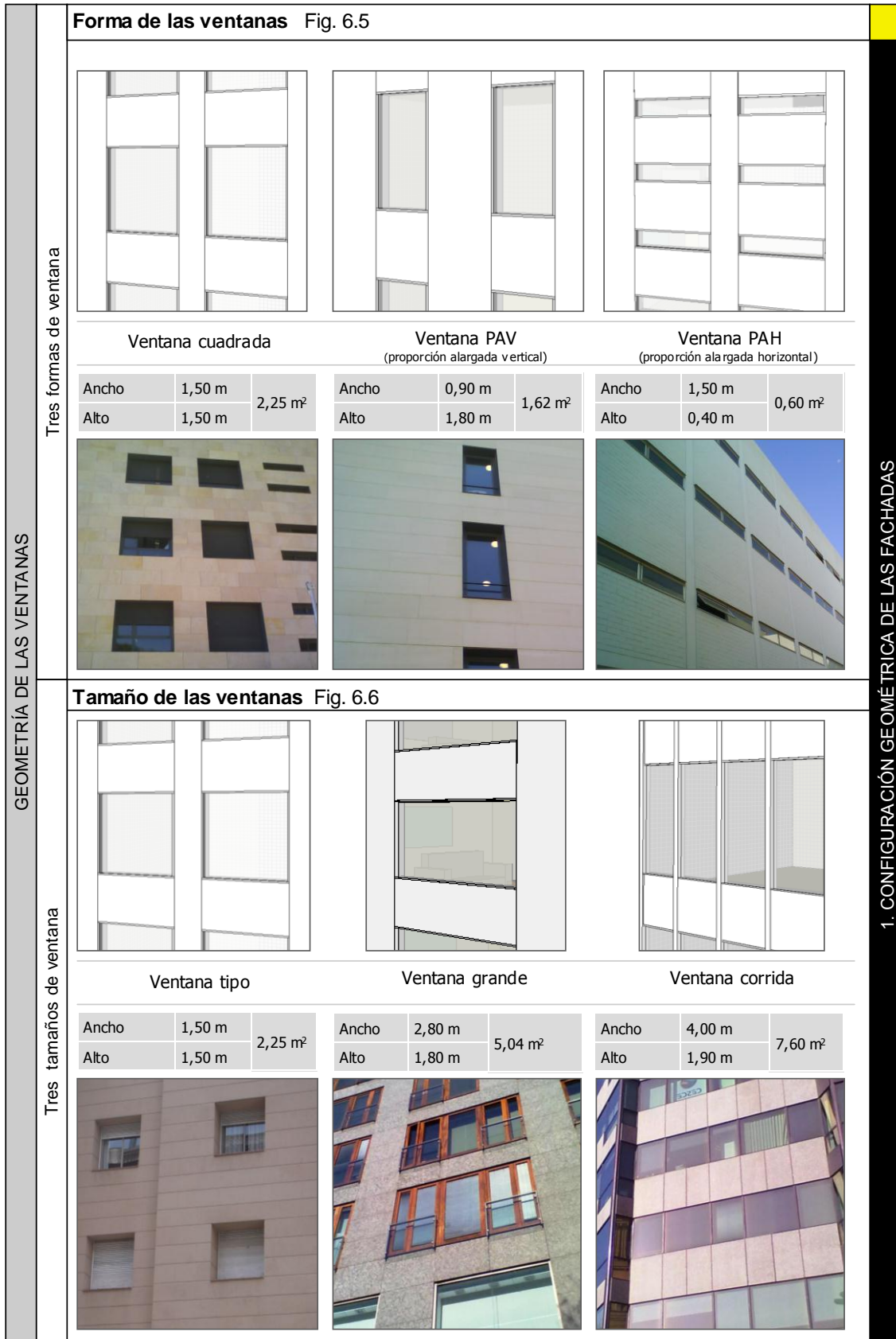
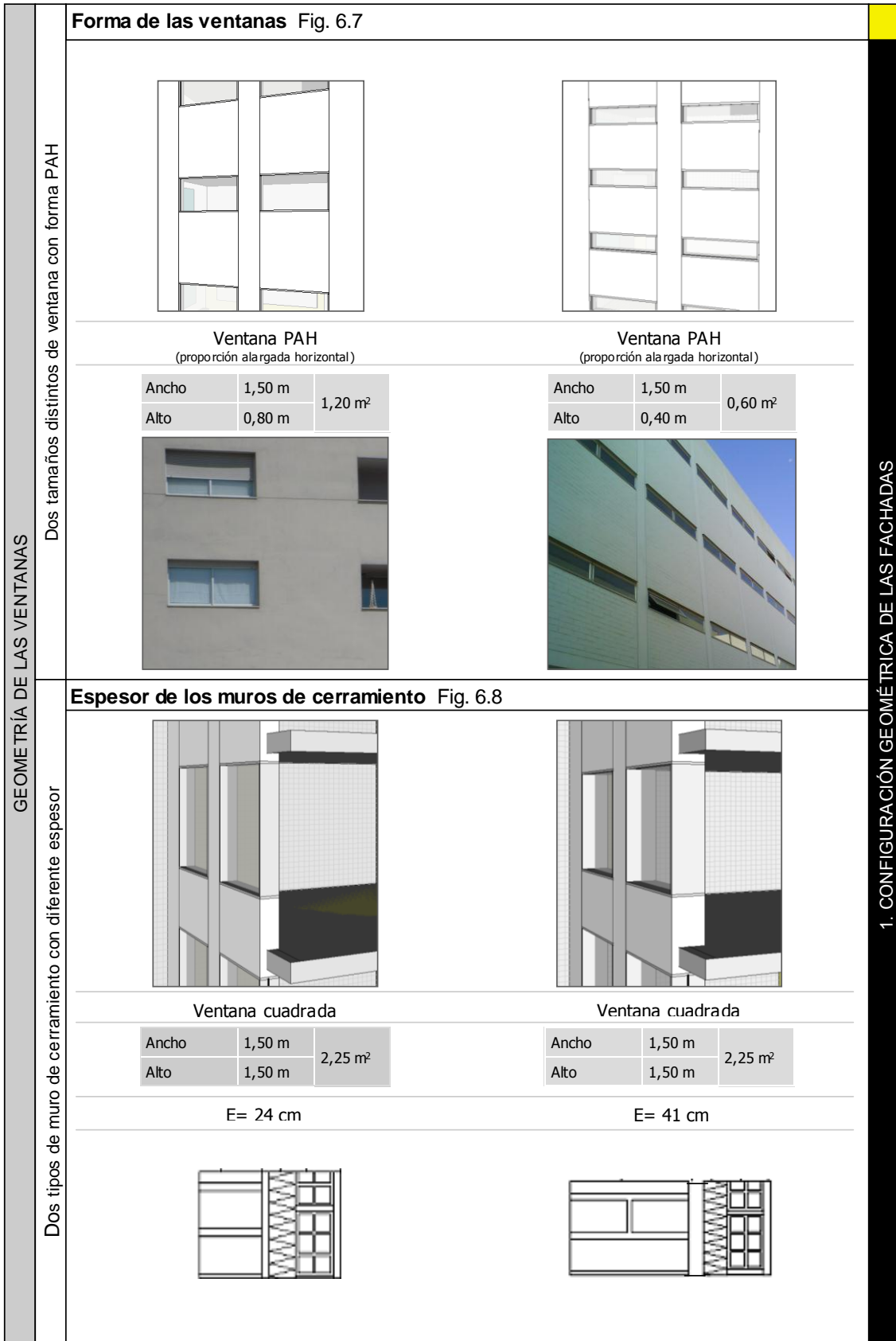


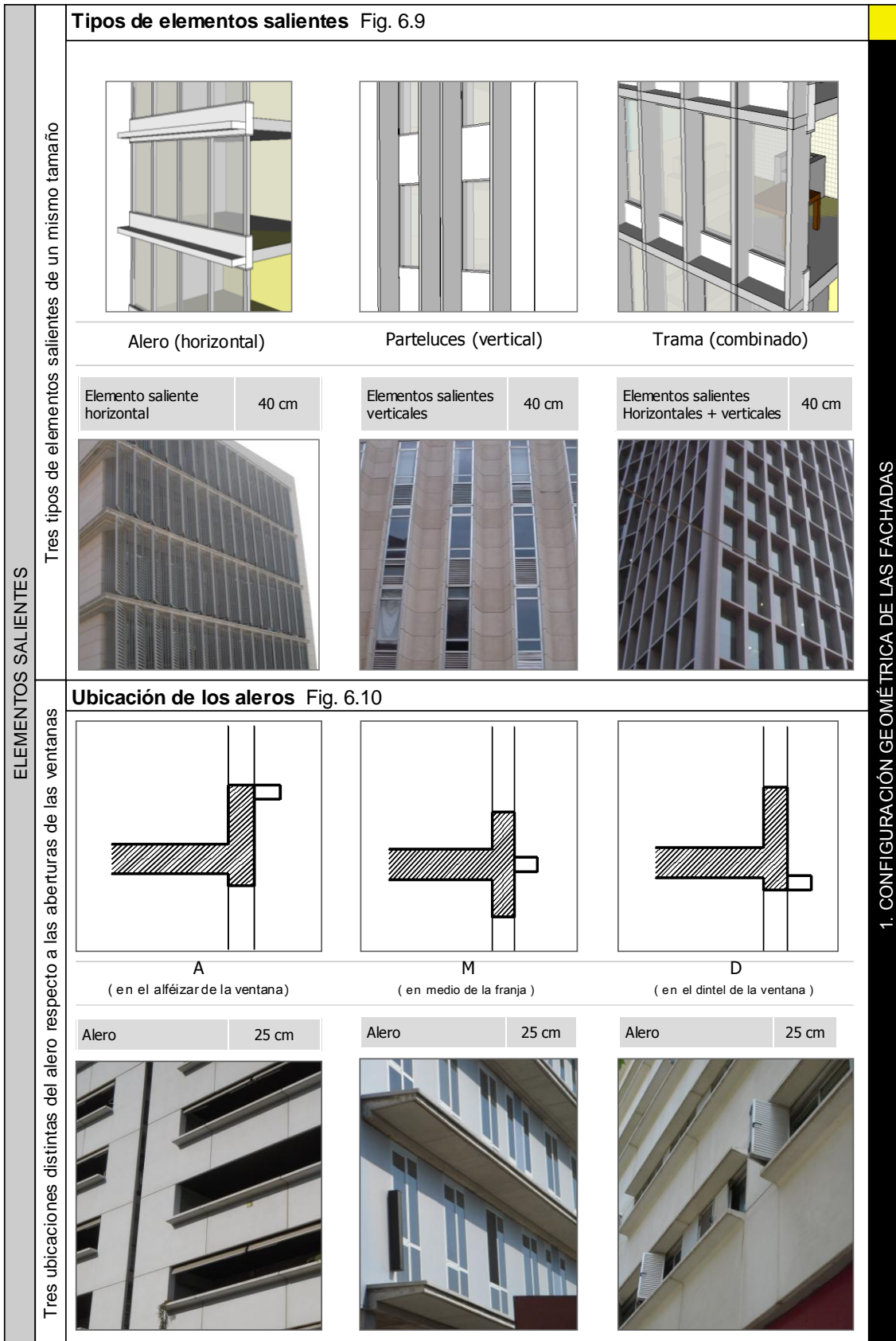
Fig. 6.4 Panorámica general de los aspectos de evaluación



Se evalúa la influencia de la forma y el tamaño de las ventanas en la propagación exterior del fuego. La normativa (CTE) no hace referencia a estos aspectos.
Fotos: P. Giraldo, 2009



Se evalúa la influencia del espesor de los muros de cerramiento en la propagación exterior del fuego. La normativa no hace referencia a este aspecto.
Fotos: P. Giraldo, 2009




1. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS FACHADAS

Se evalúa la influencia de los elementos salientes a partir de tres tipos distintos de elemento. También se observa la influencia que tiene la ubicación de un mismo elemento saliente (alero) en tres posiciones distintas respecto al hueco de la ventana. La normativa no hace referencia a estos aspectos.
Fotos: P. Giraldo, 2009

ELEMENTOS SALIENTES

Seis tamaños de alero reducidos en función del tamaño de la franja según lo dispuesto por el CTE DB SI 2 sección 3

Tamaño de los aleros (elementos salientes) Fig. 6.11

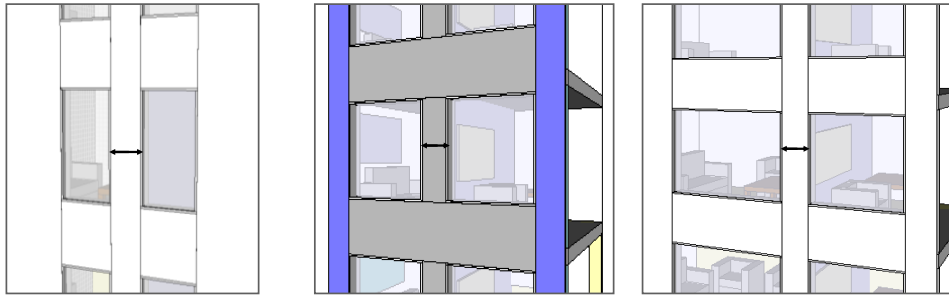
														
Alero de 15 cm	Alero de 25 cm	Alero de 40 cm												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Franja (C)</td><td style="width: 50%;">85 cm</td></tr> <tr><td>Alero (D)</td><td>15 cm</td></tr> </table>	Franja (C)	85 cm	Alero (D)	15 cm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Franja (C)</td><td style="width: 50%;">75 cm</td></tr> <tr><td>Alero (D)</td><td>25 cm</td></tr> </table>	Franja (C)	75 cm	Alero (D)	25 cm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Franja (C)</td><td style="width: 50%;">60 cm</td></tr> <tr><td>Alero (D)</td><td>40 cm</td></tr> </table>	Franja (C)	60 cm	Alero (D)	40 cm
Franja (C)	85 cm													
Alero (D)	15 cm													
Franja (C)	75 cm													
Alero (D)	25 cm													
Franja (C)	60 cm													
Alero (D)	40 cm													
														
														
Alero de 60 cm	Alero de 80 cm	Alero de 150 cm												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Franja (C)</td><td style="width: 50%;">40 cm</td></tr> <tr><td>Alero (D)</td><td>60 cm</td></tr> </table>	Franja (C)	40 cm	Alero (D)	60 cm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Franja (C)</td><td style="width: 50%;">0</td></tr> <tr><td>Alero (D)</td><td>80 cm</td></tr> </table>	Franja (C)	0	Alero (D)	80 cm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Franja (C)</td><td style="width: 50%;">0</td></tr> <tr><td>Alero (D)</td><td>150 cm</td></tr> </table>	Franja (C)	0	Alero (D)	150 cm
Franja (C)	40 cm													
Alero (D)	60 cm													
Franja (C)	0													
Alero (D)	80 cm													
Franja (C)	0													
Alero (D)	150 cm													
														

1. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS FACHADAS

Se evalúa el papel de los aleros como medida de protección frente a la propagación exterior del fuego y la alternativa definida por la norma de reducir la altura de las franjas (1 m) en función de un elemento saliente, de acuerdo a lo dispuesto en el CTE [4]. “(...) la fachada debe ser al menos E1 60 en una franja de 1 m de altura. En caso de existir elementos salientes (...) la altura de la franja podrá reducirse en la dimensión del elemento saliente”.

Fotos: P. Giraldo, 2010

Separación horizontal (en recintos contiguos) Fig. 6.12



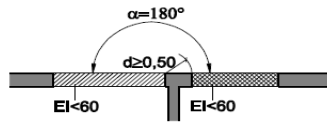
Prueba 1

Prueba 2

Prueba 3

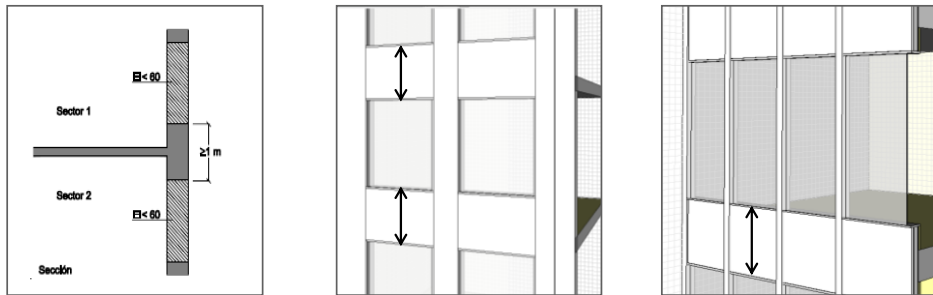
Escenarios básico	2	Escenarios básico	2	Escenarios básico	2
Tipo de fachada	FOC	Tipo de fachada	FOV	Tipo de fachada	FOC
Ventana PAV	0,9 X 1,80 m	Ventana cuadrada	1,60 X 1,60 m	Ventana PAH	2.30 X 1,70 m

Las características de los distintos escenarios de prueba se especifican en el apartado 6.4.



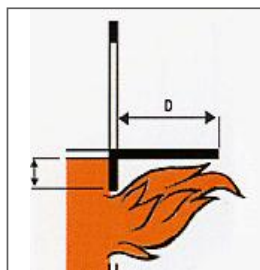
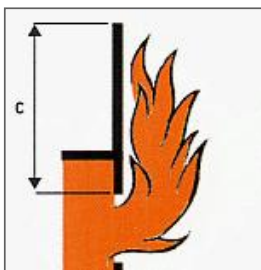
α	0° ⁽¹⁾	45°	60°	90°	135°	180°
d (m)	3,00	2,75	2,50	2,00	1,25	0,50

Separación vertical Fig. 6.13



Franja de 1 m

Franja de 1 m en diferentes configuraciones de fachada

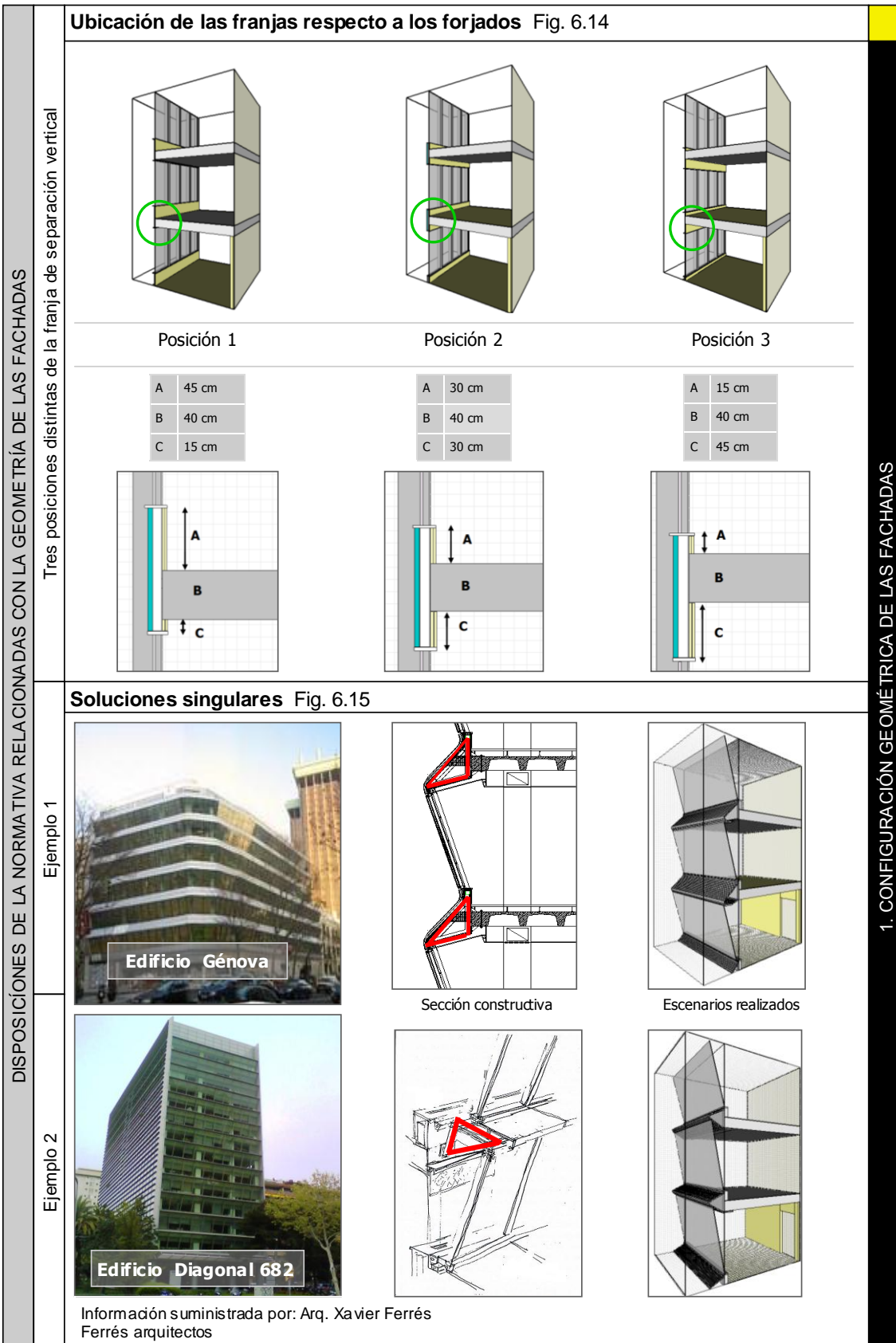


Franja (C)	1 m
C+D	1 m

La tabla enseña las posibilidades de compensación de la franja y el alero consideradas en el estudio.

Franja	C	cm	85	75	60	40	0	0
Alero	D	cm	15	25	40	60	80	150

Esta parte del análisis se centra en las medidas contempladas por el CTE para el control de la propagación horizontal [3] y vertical del fuego [4]. El primer aspecto se estudia sólo en el caso de recintos contiguos. En el segundo se evalúa la exigencia que consiste en implementar una franja de mínimo 1 m con al menos EI 60. Se consideran fachadas con ventanas de diferente tamaño. "Con el fin de limitar el riesgo de propagación vertical (...) dicha fachada debe ser al menos EI 60 en una franja de 1 m de altura, como mínimo (...). En caso de existir elementos salientes aptos para impedir el paso de las llamas, la altura de dicha franja podrá reducirse en la dimensión del citado saliente".



Arriba: Se pretende evaluar el efecto de la ubicación de la franja de 1 m [4] respecto al forjado del edificio.
 Abajo: Se analizan dos ejemplos en los cuales se resuelve la franja de 1 m usando convenientemente la geometría de la fachada. La normativa no hace referencia a estos aspectos.
 Fotos: Lamela arquitectos. P. Giraldo, 2010

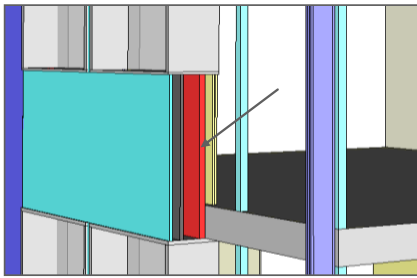
CÁMARA VENTILADA Y SUBESTRUCTURA DE LA FACHADA

Cinco casos según la tabla 6.1

2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS FACHADAS

Fachadas ventiladas FOV

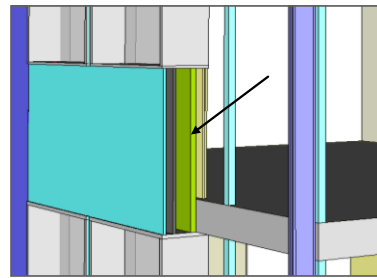
Compartimentación de la cámara y material de aislamiento térmico Fig. 6.16



Caso 1

Hipótesis
Material de aislamiento térmico **combustible**

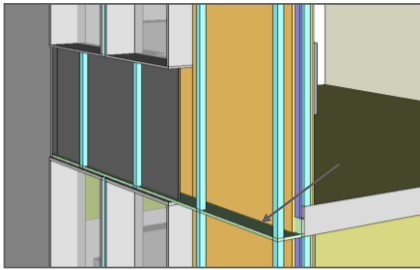
Se ha considerado un material combustible con propiedades térmicas propias de la espuma de poliuretano.



Caso 2

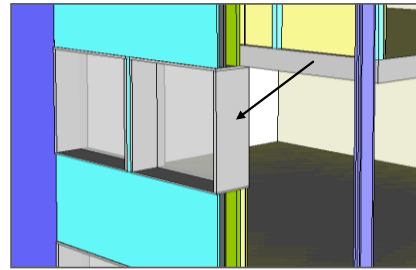
Hipótesis
Material de aislamiento térmico incombustible

Se ha considerado un material incombustible tipo lana de roca.



Caso 3

Hipótesis
Barreras cortafuegos por planta.

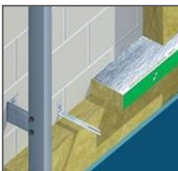


Caso 4

Hipótesis
Barreras cortafuegos en torno al telar de las ventanas.

Se realiza una caracterización de elementos empleados para el control de la propagación del fuego. Se consideran elementos incombustibles como barreras cortafuegos. En el apartado 6.4 se explican como se han incorporado en los escenarios de acuerdo a las hipótesis consideradas.

Se han considerado dos de los métodos más adecuados para compartimentar la cámara ventilada (ver apartado 4.4.3).



(A)



(B)



(C)

- (A) Barrera cortafuegos a base de lana de roca y material intumescente.
 - (B) Carpintería de aluminio, baja estabilidad frente al fuego.
 - (C) Carpintería de acero, mayor estabilidad frente al fuego.
- Ver hipótesis específicas tabla 6.12.

Nota: se denomina telar de la ventana al marco de la carpintería, el cual a su vez está conformado por el alfeizar, el capialzado y las jambas, incluye también el marco.

El análisis se centra en la influencia de la cámara ventilada en la propagación vertical del fuego, para ello se consideran cinco casos que se especifican en la tabla 6.1. La normativa hace una rápida referencia a las cámaras ventiladas como "espacios ocultos" pero no especifica su implementación.
Fotos: Internet, Rockwool.

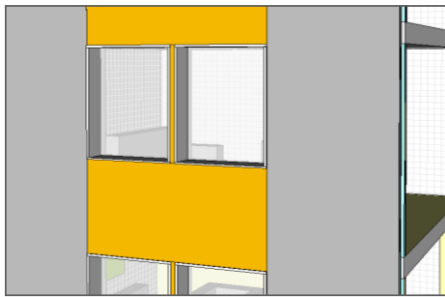
DISPOSICIONES DE LA NORMATIVA

En relación a los materiales de revestimiento

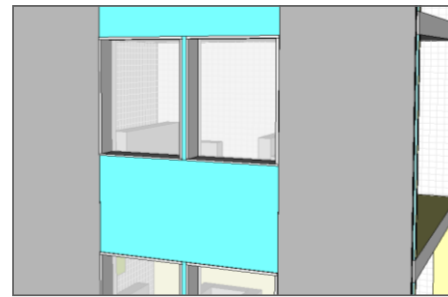
2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS FACHADAS

Fachadas ventiladas FOV

Material de revestimiento Fig. 6.17



Caso 5



Casos 1-4

Hipótesis
Material de revestimiento combustible

Se ha considerado un material combustible con propiedades térmicas atribuibles a la madera sin tratamiento de ignifugación (pino amarillo).

Hipótesis
Material de revestimiento no combustible

Se ha considerado un material de revestimiento incombustible, sin aportación al fuego.

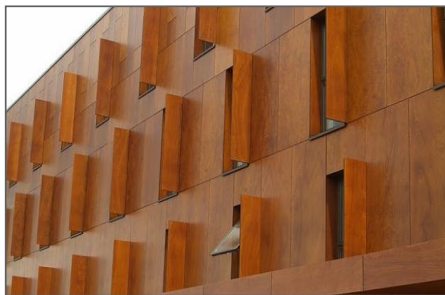


Tabla 6.1

Caso	Barrera corta fuegos	Cámara compartimentada	Características del telar de la ventana (Alféizar, capitalzado, jambas)	Material de aislamiento térmico	Material de Revestimiento
1	No	No	Baja estabilidad frente al fuego	Combustible	No combustible
2	No	No	Baja estabilidad frente al fuego	No combustible	No combustible
3	Sí	Sí	Baja estabilidad frente al fuego	Combustible	No combustible
4	No	Sí	Alta estabilidad frente al fuego	Combustible	No combustible
5	Sí	Sí	Baja estabilidad frente al fuego	No combustible	Combustible

Tabla 6.2

Comparativas entre casos de estudio				
Caso 1	comparado con	Caso 2		
Caso 1	comparado con	Caso 2	y con	Fachada tipo FOC Fachada opaca convencional
Caso 3	comparado con	Caso 4		
Comparativa general casos 1, 2, 3, 4 y 5				

De los cinco casos planteados sólo en el caso 5 se ha considerado revestimiento combustible.

Esta parte de los análisis se centra en las disposiciones contempladas por el CTE sobre la clase de reacción al fuego de los materiales que componen la fachada [5].

“La clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen más del 10% de la superficie del acabado exterior de las fachadas o de las superficies interiores de las cámaras ventiladas (...) será B-s3, d2 hasta una altura de 3,5 m como mínimo, en aquellas fachadas cuyo arranque inferior sea accesible al público desde la rasante exterior o desde una cubierta, y en toda la altura de la fachada cuando esta exceda de 18 m, (...).”

Fotos: Internet

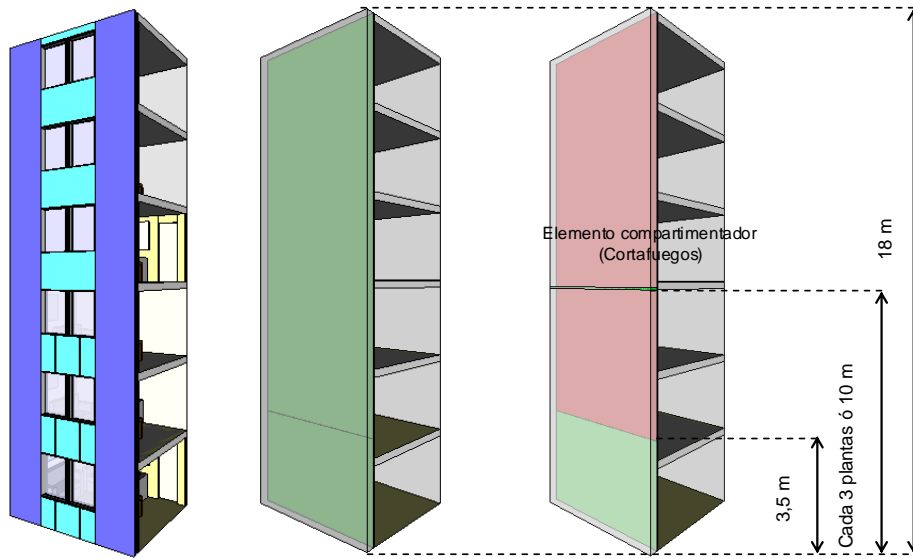
DISPOSICIONES DE LA NORMATIVA

En relación a los espacios ocultos

2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS FACHADAS

Fachadas ventiladas FOV

Compartimentación de la cámara y material de aislamiento térmico Fig. 6.18



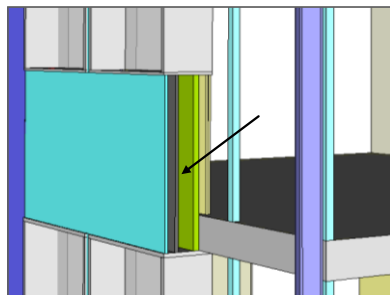
Material de clase B, s3-d2 en zonas accesibles al público hasta 3,5 m de altura.

- Material con combustibilidad baja. Según en CTE clasificación B-s3, d2 ó mejor.
- Material con combustibilidad alta. Según el CTE sin exigencia.

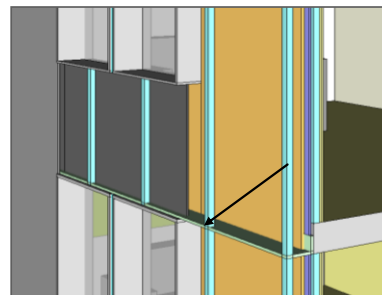
Escenario básico	3
Nº plantas	6
Altura	18 m
Tipo de fachada	FOV

Hipótesis

Cámara ventilada no compartimentada si el material de aislamiento térmico es **no** combustible (Caso 2).
 Cámara ventilada compartimentada cada 3 plantas si el material de aislamiento térmico es combustible, salvo en la planta baja en la cual el material térmico es siempre no combustible hasta una altura de 3,5 m en todos los casos (Caso 3).



Caso 2

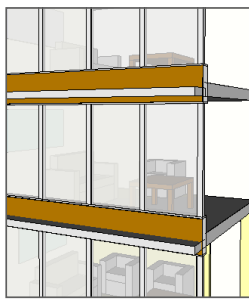


Caso 3

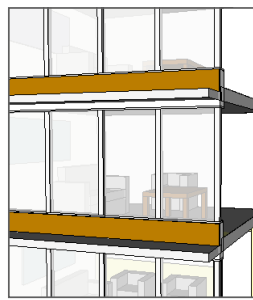
En la tabla 6.1 se especifican las características de cada caso de estudio y la descripción de los escenarios está contenida en el apartado 6.4.

Esta parte de los análisis se centra en las disposiciones contempladas por el CTE tanto en referencia a los espacios ocultos [6] (en nuestro caso cámaras ventiladas) como a la clase de reacción al fuego exigida a los materiales que conforman las fachadas [5].

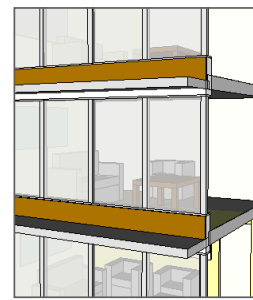
Revestimiento de material combustible Fig. 6.19



RC Alero de 40 cm



RC Alero de 60 cm



RC Alero de 80 cm

Ventana corrida

Ventana corrida

Ventana corrida

RC se refiere a revestimiento combustible. La comparativa se realiza con escenarios de iguales características solo que con revestimiento no combustible, es decir, RNC.

Franja (C)	50 cm
Alero (D)	40 cm

Franja (C)	50 cm
Alero (D)	60 cm

Franja (C)	50 cm
Alero (D)	80 cm



Hipótesis

Se han considerado tres escenarios de fachada con aleros de 40, 60 y 80 cm. El revestimiento en los tres casos es de material combustible (madera sin tratamiento de ignifugación) dispuesto en una proporción del 10% de la superficie total de la fachada, teniendo en cuenta lo estipulado por la normativa [5].



Una de las medidas adecuadas para reducir el riesgo de propagación exterior del fuego en fachadas con revestimiento combustible es interponiendo elementos salientes, tales como aleros, balcones o retranqueos. El diseño mismo de la fachada puede contener elementos estratégicos de protección pasiva. Con ello se puede minimizar o evitar la propagación del fuego en caso de incendio. Mediante los escenarios realizados se evalúa, de forma simplificada, el nivel de protección que se podría obtener mediante estos elementos salientes.

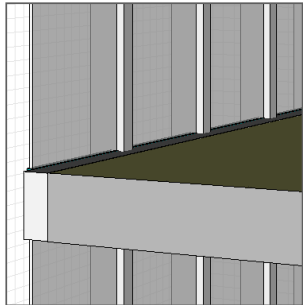
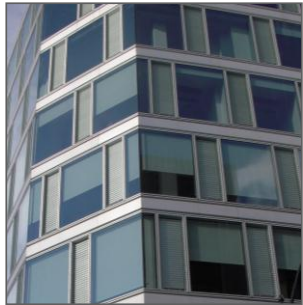
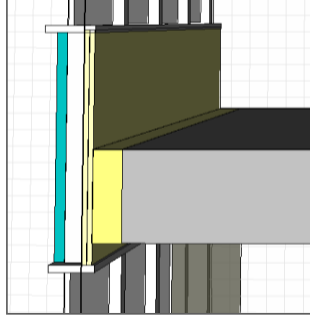
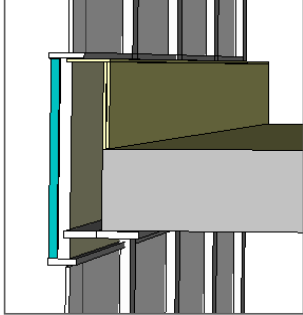
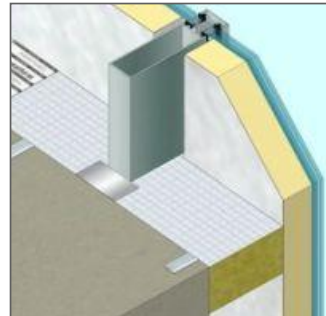
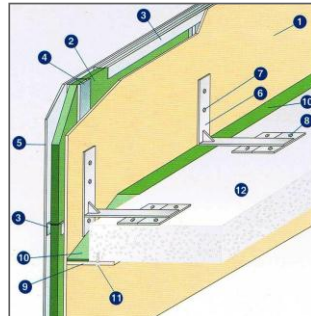
DISPOSICIONES DE LA NORMATIVA

Sobre los materiales de revestimiento

2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS FACHADAS

En este caso se pretende evaluar el papel de los elementos salientes de tres tamaños distintos, situándolos en un escenario desfavorable, por un lado por la configuración de las ventanas (ventana corrida según Fig. 6.6), y por otro lado porque se trata de fachadas con revestimiento combustible.

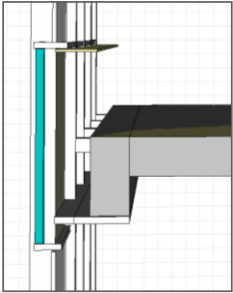
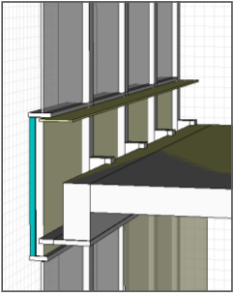
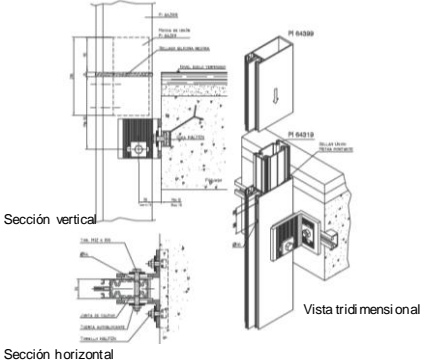
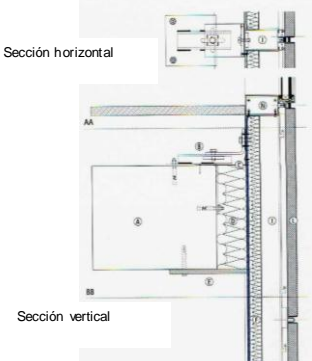
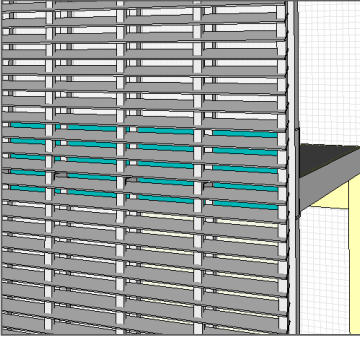
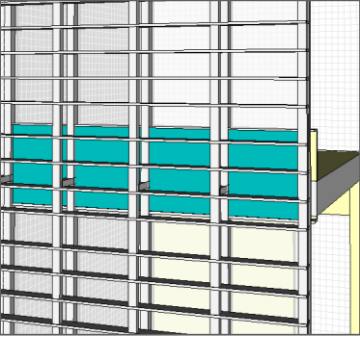


Fotos: Internet Google imágenes (arriba). S. Winter, *Timber Structures and Building construction* TUM (abajo).

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DEL ENCUENTRO DEL FORJADO Y LA FACHADA	<p>Fachadas de vidrio FV o muros cortina</p> <p>Cortafuegos sin franja de 1 m Fig. 6.20</p>	2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS FACHADAS
	<p>Sin franja</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>SF</p> <p>Cortafuegos acoplado al forjado (sin franja)</p> <p>Esta parte de los análisis trata una situación en la cual, debido a la ocupación del edificio, (superficie, uso, altura) los recintos que lo componen no son considerados sectores de incendio y por lo tanto no se les exige la implementación de la franja de 1 m para limitar la propagación vertical (ver sectores de incendio anexo 2).</p>	
SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DEL ENCUENTRO DEL FORJADO Y LA FACHADA	<p>Cortafuegos con franja de 1 m Fig. 6.21</p>	2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS FACHADAS
	<p>Dos soluciones de cortafuegos con franja de 1 m</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <p>Solución 1</p> <p>Solución 2</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Cortafuegos acoplado al forjado</p>  <p>Barrera cortafuego para muro cortina. Lamatherm</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Cortafuegos integrado al panel de la fachada</p>  <p>Franjas de encuentro forjado/fachada. Promat</p> </div> </div>	

Esta parte de los análisis se centra en dos soluciones utilizadas frecuentemente en las fachadas de vidrio **FV** (muros cortina) para implementar la franja de 1 m de acuerdo a lo dispuesto por el CTE [4]. Y además resolver un punto crítico, como es el encuentro del forjado y fachada.

"(...) la fachada debe ser al menos EI 60 en una franja de 1 m de altura".

Foto: P. Giraldo

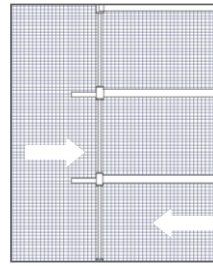
<p>ELEMENTOS DE FIJACIÓN</p>	<p>Fachadas de vidrio FV o muros cortina</p> <p>Elementos de fijación Fig. 6.22</p>
	<p>Dos tipos de fijación de la subestructura de la fachada al forjado</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Fijación frontal</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Fijación apoyada (al trasdós del forjado)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Sección vertical Vista tridimensional Sección horizontal</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Sección horizontal Sección vertical</p> </div> </div>
<p>ELEMENTOS DE PROTECCIÓN SOLAR</p>	<p>Elementos de protección solar Fig. 6.23</p>
	<p>Lamas de protección solar tipo <i>brise soleil</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>FV+BS 1 75% abierto</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>FV+BS 2 92% abierto</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;">   </div>

Arriba: Se evalúa el riesgo asociado a la ubicación de las fijaciones de las fachadas FV (muros cortina).
 Abajo: Se estudia la influencia de los elementos de control solar tipo *brise soleil* en la propagación exterior del fuego. Se tiene en cuenta lo dispuesto en la Ordenanza Municipal de Barcelona en su anexo 1.6.4. “En fachadas de doble piel (...) la piel exterior deberá disponer de un 75% de su superficie permanentemente abierta”.
 Fotos: P. Giraldo (izda). <http://ac.silvaruiz.free.fr/blog> Torre Agbar Barcelona (dcha).

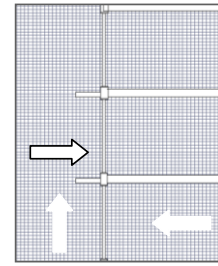
Combinaciones de flujos de viento consideradas Fig. 6.24

Tabla 6.3

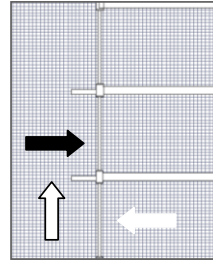
	Flujos de viento		
	Orientación	m/s	K/h
Ventilación 1		0,5	1,8
	-	-	-
Ventilación 2		3,0	10,8
		2,0	7,2
Ventilación 3		6,0	21,6
		3,0	10,8
Ventilación 4		1,0	3,6
		1,0	3,6
Ventilación 5		3,0	10,8
		6,0	21,6
Ventilación 6		4,0	14,4
	-	-	-
Ventilación 7		0,5	1,8
		2,0	7,2



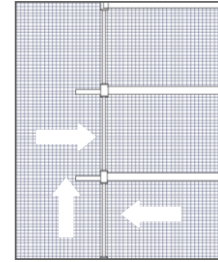
Ventilación 1



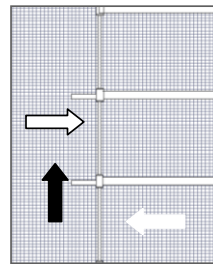
Ventilación 2



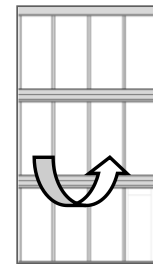
Ventilación 3



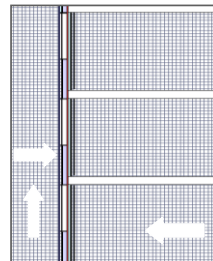
Ventilación 4



Ventilación 5



Ventilación 6



Ventilación 7

Se han considerado dos variables en relación a los flujos de viento:

1. Dirección
2. Intensidad

Las combinaciones de las variables configuran los casos de estudio, los cuales se han denominado ventilación 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7. La descripción de cada caso se puede apreciar en la tabla 6.3.

Dirección del flujo de viento		Intensidad del viento		
Flujo de viento ascendente		Baja		0,5 m/s (1,8 k/h) 2,0 m/s (7,2 k/h)
Flujo de viento a barlovento		Media		3,0 m/s (10,8 k/h) 4,0 m/s (14,4 k/h)
Flujo de viento lateral		Alta		6,0 m/s (21 K/h)
Flujo de viento puerta interior del recinto				

Se evalúa la influencia de los flujos de ventilación a partir de siete combinaciones de orientación e intensidad.

Condiciones de temperatura y humedad

Condiciones climatológicas 1 Fig. 6.25

Tabla 6.4

	Verano	Invierno	Intensidad del viento		
Temperatura °C	25	5	Baja	Flujo a barlovento	→ 1,0 m/s (3,6 k/h)
Humedad relativa %	90	70	Baja	Flujo ascendente	↑ 1,0 m/s (3,6 k/h)

Simulation Title: Alero de 15 cm

Time | Output | Environment | Particles | Simulator | Radiation | Angled Geometry | Misc.

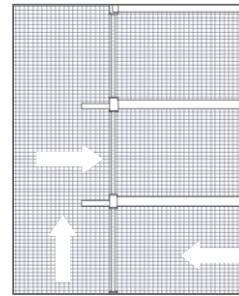
Ambient Temperature: 25,0 °C

Ambient Pressure: 1,01325E05 Pa

Atmospheric Lapse Rate: 0,0 °C/m

Relative Humidity: 90,0 %

Ground Level: 0,0 m



Ventilación 4

Simulation Title: Alero de 15 cm

Time | Output | Environment | Particles | Simulator | Radiation | Angled Geometry | Misc.

Ambient Temperature: 5,0 °C

Ambient Pressure: 1,01325E05 Pa

Atmospheric Lapse Rate: 0,0 °C/m

Relative Humidity: 70,0 %

Ground Level: 0,0 m

Condiciones climatológicas 2 Fig. 6.26

Tabla 6.5

	Verano	Invierno	Intensidad del viento		
Temperatura °C	25	5	Baja	Flujo a barlovento	→ 3,0 m/s (10,8 k/h)
Humedad relativa %	90	70	Baja	Flujo ascendente	↑ 2,0 m/s (7,2 k/h)

Simulation Title: Alero de 80 cm

Time | Output | Environment | Particles | Simulator | Radiation | Angled Geometry | Misc.

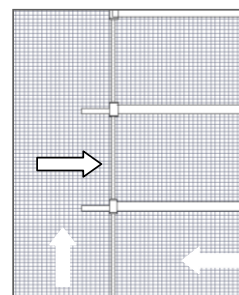
Ambient Temperature: 25,0 °C

Ambient Pressure: 1,01325E05 Pa

Atmospheric Lapse Rate: 0,0 °C/m

Relative Humidity: 90,0 %

Ground Level: 0,0 m



Ventilación 2

Simulation Title: Alero de 80 cm

Time | Output | Environment | Particles | Simulator | Radiation | Angled Geometry | Misc.

Ambient Temperature: 5,0 °C

Ambient Pressure: 1,01325E05 Pa

Atmospheric Lapse Rate: 0,0 °C/m

Relative Humidity: 70,0 %

Ground Level: 0,0 m

Se evalúa la influencia de las condiciones climáticas considerando variables de temperatura y humedad típicas de invierno y verano (considerando como localización Barcelona). También se introducen pequeñas perturbaciones de viento para comprobar la sensibilidad a este factor.

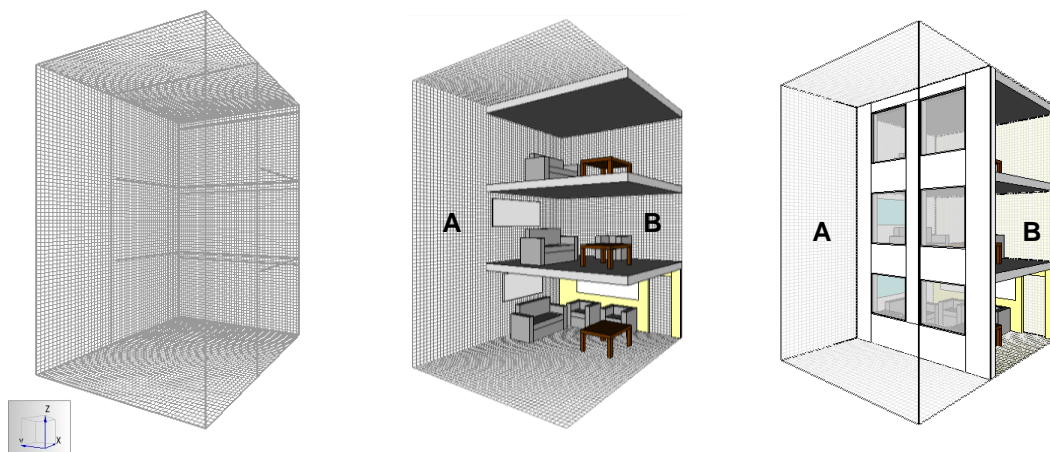
6.4 Descripción del dominio computacional y de los escenarios de incendio

La fase experimental de este estudio consta de una serie de pruebas realizadas mediante técnicas de modelado y simulación computacional de incendios. En esta sección se exponen los detalles relacionados con la elaboración de los escenarios y los aspectos que forman parte del proceso de simulación. También se detallan los llamados: datos de entrada (*inputs*), que no son otra cosa que la información necesaria para configurar los escenarios. Estos datos de entrada incluyen: la geometría del recinto, el tamaño y características de la malla computacional, las condiciones de ventilación, el tiempo de simulación, las propiedades térmicas de los diferentes componentes del escenario (paredes, techo, suelo y mobiliario) la localización de la fuente de ignición y sus propiedades, entre otros. Esta parte del capítulo corresponde a la fase 2 del esquema general de la fase experimental Fig. 6.1. Con el propósito de abordar los diferentes aspectos planteados en el estudio se han realizado tres escenarios básicos de incendio, los cuales a su vez han dado lugar a los 56 escenarios elegidos para realizar los análisis. Como se explicará más adelante, las variables introducidas en cada caso marcan las diferencias entre los distintos escenarios.

El estudio se ha realizado mediante modelos de campo de dinámica computacional de fluidos. Se han utilizado en concreto los programas FDS (Fluid Dynamics Simulator) versión 5 [7] para la resolución de los modelos, PyroSim [8] como interfaz gráfica de modelado y Smokeview para la visualización de los resultados.

- **Descripción del dominio computacional**

El dominio computacional está constituido por una malla estructurada que contiene todos los parámetros geométricos (nodos, líneas, superficies y sólidos) y sus partes (vértices, aristas y caras); sobre el conjunto de subdominios que conforman, el FDS resuelve en diferencias finitas una forma de las ecuaciones de Navier – Stokes (ver sección 5.4.1). La malla es una parte muy importante del dominio computacional, de su adecuada definición depende el grado de aproximación de los resultados. Se considera que cuanto más fina es la rejilla mejor es la resolución numérica de las ecuaciones. Sin embargo, una rejilla con celdas de control más grandes es favorable en términos del coste computacional (tiempo de cálculo). Por ello ha sido importante hacer un balance entre el tamaño idóneo de las celdas en relación a la complejidad del problema caracterizado en la malla y los medios computacionales disponibles.



A. Zona de propagación del fuego (condiciones de exterior).
 B. Modulo (recinto cerrado).

Fig. 6.27 Dominio computacional con celdas de control y dominio con el contenido del escenario básico 1 (ver Fig. 6.28).
 Imágenes extraídas del programa PyroSim.

Se han llevado a cabo diversas simulaciones de prueba para comparar la sensibilidad del modelo al tamaño de la malla (fronteras del dominio) y de las celdas o volúmenes de control. A partir de ello se ha determinado el tamaño adecuado del mallado. Cada escenario básico es geoméricamente distinto y por ende lo es también cada dominio computacional, sin embargo tienen algunas características comunes. En todos los dominios el mallado es uniforme y las celdas son cúbicas con dimensiones de 0,10 x 0,10 x 0,10 m. En la tabla 6.6 se especifican las características de la malla computacional de cada escenario. Como se aprecia en la Fig.6.27 dentro del dominio se distinguen dos partes bien diferenciadas:

- A. Zona de propagación del incendio: Condiciones externas, con los límites de la malla abiertos.
- B. Modulo: Recinto cerrado, con los límites de la malla como paredes de yeso.

Tabla 6.6 Características del dominio computacional.

Escenario	Dimensiones de la malla (m) (ancho, largo, alto)	Número de celdas (Ud.)	Dimensiones de las celdas (m)
1	4,90 x 6,50 x 8,25	241.920	0,10 x 0,10 x 0,10
2	6,90 x 6,50 x 8,25	385.920	0,10 x 0,10 x 0,10
3	4,90 x 6,70 x 18,0	599.760	0,10 x 0,10 x 0,10

- **Configuración geométrica de los escenarios**

Los escenarios de simulación realizados consisten en un módulo de geometría simple, semejante a los implementados en los ensayos reales de laboratorio, pero con la posibilidad de considerar un amplio espectro de variables, lo cual sería económicamente inviable mediante ensayos reales.

Dada la complejidad del fenómeno del fuego y su variabilidad ante diferentes factores (apartado 4.1.6) se puede entender la importancia y también la dificultad que supone definir las condiciones del escenario de incendio. El número de escenarios posible puede ser infinito y es necesario reducir a uno suficientemente representativo para caracterizar los aspectos de interés del estudio. Por tal motivo, se ha considerado un escenario cuyo recinto de origen del incendio (situado en la planta baja (PB) del cubículo) tiene unas condiciones propicias para el desarrollo del incendio, y dos plantas superiores, planta primera y planta segunda (P1 y P2), a las cuales el fuego podría propagarse eventualmente. Según se aprecia en la Fig. 6.28 se han realizado tres escenarios básicos de incendio con propiedades similares, los cuales a su vez son la base de todos los escenarios simulados. El escenario básico 1 ha sido utilizado para la mayoría de los casos de estudio, en cada uno se incorporan las variables requeridas. Dichas variables están relacionadas con las tipologías de fachada propuestas en el estudio: Fachadas **FOC** (fachadas opacas convencionales), **FOV** (fachadas opacas ventiladas), **FV** (fachadas de vidrio – muros cortina) y **FV+BS** (fachadas de vidrio + sistema *brise soleil*) descritas en la Fig. 6.2. También se aplican variables relacionadas con los aspectos de evaluación explicados de en el capítulo anterior: (1) configuración geométrica de las fachadas, (2) elementos constructivos de las fachadas y (3) factores climatológicos. La Fig. 6.29 muestra un esquema que relaciona los dos grupos de variables aplicados y en la Fig. 6.30 se pueden ver distintas tipologías de fachada y configuraciones geométricas aplicadas en el escenario básico 1.

En el escenario básico 2 se han considerado, además de los recintos de las plantas superiores, unos recintos contiguos con el propósito de evaluar el riesgo de propagación horizontal del fuego. El escenario básico 3 es una variante del *escenario* básico 1 duplicando su altura; el resultado es un escenario de seis plantas realizado para evaluar algunas disposiciones concretas recogidas por el CTE (ver sección 6.5.2). La descripción geométrica de cada escenario se puede apreciar en la Fig. 6.28.

Escenario Básico	Configuración General	Vista en planta PB (Planta Baja)	Datos			
1			Nº de plantas	3		
			Altura por planta	2,50 m		
			Altura total	8,25 m		
			Superficie del recinto de origen del incendio	19,6 m ²		
			Volumen del recinto de origen del incendio	49 m ³		
2			Nº de plantas	3		
			Altura por planta	2,50 m		
			Altura total	8,25 m		
			Superficie del recinto de origen del incendio	19,6 m ²		
			Volumen del recinto de origen del incendio	49 m ³		
3			Nº de plantas	6		
			Altura por planta	2,70 m		
			Altura total	18,0 m		
			Superficie del recinto de origen del incendio	19,6 m ²		
			Volumen del recinto de origen del incendio	52,9 m ³		
			Escenario de incendio			
			A	Zona de propagación del fuego		
			B	Módulo		
V	Suministro de ventilación (puerta abierta)					

Fig. 6.28 Descripción de los escenarios básicos 1,2 y 3.
Imágenes extraídas del programa PyroSim.

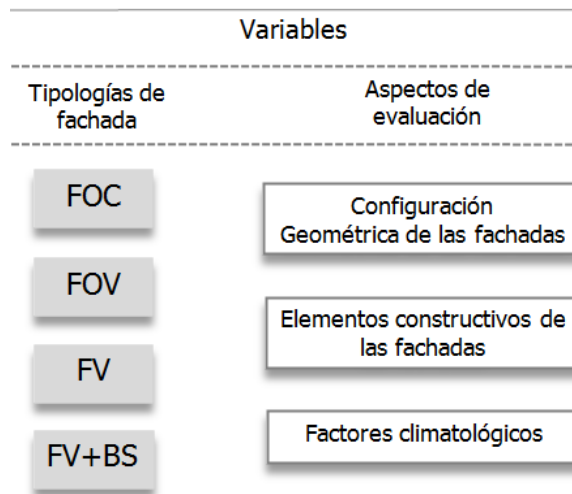


Fig. 6.29 Variables incorporadas a los escenarios

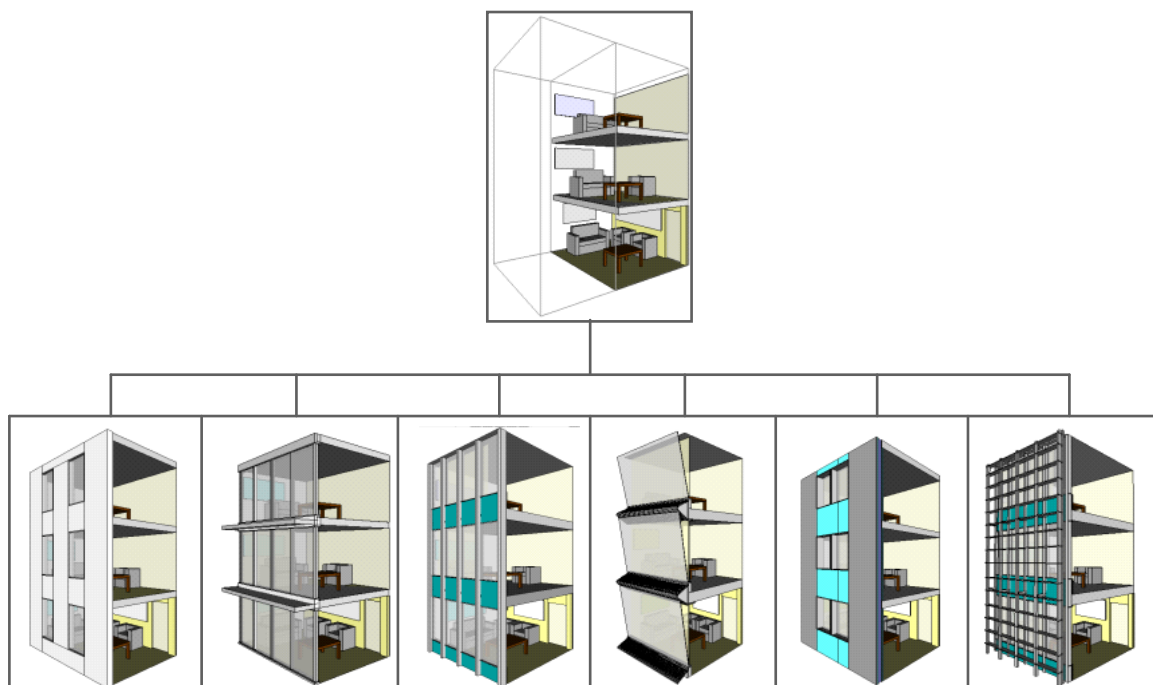


Fig. 6.30 Escenario básico 1 con diferentes tipologías de fachada
Imágenes extraídas del programa PyroSim.

- **Parámetros de simulación**

Se han determinado unos parámetros comunes a todos los escenarios a fin de poder comparar los resultados a partir de las variables incorporadas según el caso de estudio. En los cuadros siguientes se describen los parámetros de simulación básicos.

Parámetros generales de simulación

Tabla 6.7 Parámetros climatológicos generales.

Parámetros climatológicos básicos de los escenarios			
Temperatura Ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Flujos de viento m/s – k/h	Orientación del viento
10°C	50%	1 - 3,6 Leve	A barlovento

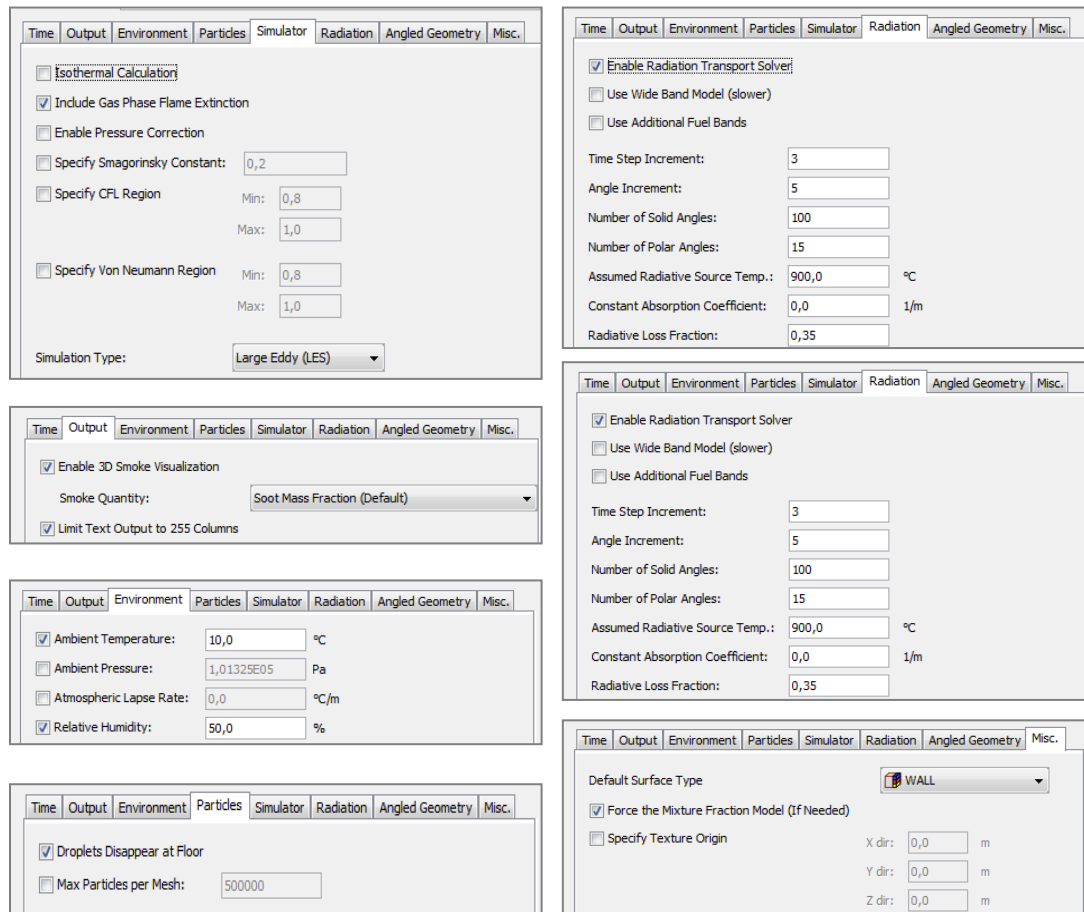


Fig. 6.31 Los cuadros muestran los parámetros definidos para las simulaciones. Cuadros extraídos del programa PyroSim.

Modelo hidrodinámico

Como se mencionó en el capítulo anterior el FDS es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) concebido específicamente para simular flujos generados por el fuego. El modelo hidrodinámico resuelve numéricamente una forma de las ecuaciones de Navier – Stokes adecuada para aplicaciones con bajo número de Mach ($Ma > 0,3$) [MaGrattan et al. 2008]. Esta formulación responde a que la velocidad de los gases en un incendio es del orden de unos 10-20 m/s, por tanto está muy lejos de la velocidad

del sonido en el aire. Los escenarios que se estudian en esta investigación están dentro de las aplicaciones apropiadas del FDS.

Modelo de Turbulencia

La forma de abordar el fenómeno de la turbulencia es muy importante en el modelado del flujo de gas. En la fase gaseosa ocurren procesos fundamentales para la descripción del incendio, tales como la transferencia de calor y el transporte de los productos de la combustión. FDS da la opción de tratar el fenómeno de la turbulencia de dos formas diferentes: mediante el modelo DNS (*Direct Numerical Simulation*) y el modelo LES (*Large Eddy Simulation*), las características de cada uno de estos han sido explicadas en el apartado 5.4.1. Dado que los escenarios que se estudian tienen una configuración geométrica sencilla y un tamaño de celdas moderado se ha elegido operar mediante el modelo LES.

Modelo de combustión

El modelo de combustión empleado por FDS en los modelos LES es el modelo de combustión de fracción de mezcla debido a que en los modelos LES el tamaño de la rejilla no es suficientemente fino para resolver la difusión del combustible y el oxígeno. Este modelo de combustión se basa en la premisa de que si bien los procesos de transporte por convección y radiación a gran escala pueden ser directamente simulados, los procesos que ocurren en distancias y a intervalos pequeños deben ser representados de una forma aproximada. Con los medios computacionales actuales resulta inalcanzable dar una descripción detallada de los procesos de combustión debido a su complejidad y en cierto modo al desconocimiento de los procesos de proporciones químicas que controlan la cesión de la energía durante la combustión. Por ello, el modelo propuesto se fundamenta en la asunción de que la combustión es controlada por la mezcla. Esto implica que todas las especies de interés pueden ser descritas en términos de una fracción de mezcla $Z(x,t)$ (Alvear et al., 2007: 98). El modelo asume que la reacción del oxígeno con el combustible toma lugar infinitamente rápido; de tal manera que combustible y oxidante no pueden coexistir, es decir, desaparecen al mismo tiempo.

Transmisión de radiación

En el FDS la transferencia de calor por radiación es resuelta en el modelo por medio de la ecuación de transporte por radiación para un gas gris no disperso *RTE* (*Radiation Transport Ecuation*). La radiación térmica se da por la propagación de ondas electromagnéticas, lo que quiere decir que dos factores muy importantes en

este proceso como la emisividad ϵ y la absorbencia α dependerán de la longitud de onda. Al hablar de un cuerpo gris se hace la asunción de que la ϵ y la α no dependen de la longitud de onda, es decir, que son constantes para toda la longitud de onda de la radiación electromagnética. La otra suposición es que $\epsilon = \alpha$ toda la radiación que es absorbida es la misma que emite el cuerpo, lo cual simplifica los cálculos en gran medida (López, 2006: 30).

- **Contenido de los escenarios**

El contenido de los escenarios está compuesto por tres grupos de elementos o subdominios:

- (1) Mobiliario del recinto
- (2) Elementos de contorno
- (3) Fachadas

El mobiliario del recinto y los elementos de contorno de la PB (planta baja), configuran lo que sería propiamente el recinto del incendio. El mobiliario contenido en las P1 y P2 completa el contenido del escenario. Las fachadas constituyen un contenido variable, que cambia según la tipología de la fachada y los aspectos de evaluación. En la Fig. 6.32 se especifican los materiales que conforman cada elemento, las propiedades térmicas de cada material se pueden observar en las Fig. 6.33 y Fig. 6.34.

En la fase inicial de las pruebas, fase en la cual se definen todos los parámetros de los escenarios, se planteó como origen del fuego una fuente de energía capaz de generar un penacho de fuego suficiente para producir la propagación a través de la fachada; algo equivalente a los quemadores de gases combustibles o restos de madera empleados en los ensayos de laboratorio Fig. 6.35. Posteriormente se optó por una situación más ajustada a la realidad en la cual el contenido del escenario representa el salón típico de una vivienda. El mobiliario definido se caracteriza por poseer una geometría simple forzada a la rejilla consistente en: un sofá, dos sillones, una mesa, dos cuadros y las cortinas. Los valores de los parámetros necesarios para caracterizar estos elementos se han extraído de la base de datos puesta a disposición por el NIST para el programa FDS versión 4 [10]. Sus propiedades térmicas ($k \rho c$), así como los detalles de su combustión forman parte de los datos introducidos en el modelo. PyroSim permite configurar una librería de materiales importando desde el FDS los datos de los materiales. Este escenario corresponde de forma razonable a un espacio residencial/vivienda con una densidad de carga de fuego variable característica de 650 MJ/m² [11]. Se ha dispuesto una cantidad suficiente de material combustible representado en el contenido del recinto, para partir de la situación más desfavorable

posible. La distribución del material combustible (mobiliario) es la misma en todos los casos estudiados, teniendo en cuenta que cualquier modificación de esta índole puede cambiar las condiciones de la evolución y crecimiento del incendio en el recinto.

En el marco de este estudio el desarrollo de las fases *pre flashover* del incendio, así como los detalles de los procesos de combustión, no tienen un interés central. Los aspectos prioritarios para el estudio suceden a partir de la fase *post flashover*, cuando el incendio comienza a propagarse a través de las ventanas del recinto.

- **Fuente de ignición**

El fuego inicial ocurre en la planta baja del modulo a partir de una fuente de ignición colocada en la superficie del sofá. Dicha fuente está caracterizada por un quemador de 400 cm² que emite 1000 kW/m². El fuego evoluciona en función de las propiedades térmicas de los materiales involucrados y su ubicación dentro del recinto, no se ha prescrito la evolución de incendio.

- **Condiciones de ventilación**

La ventilación es un factor determinante en el desarrollo de los procesos de combustión, crecimiento del incendio y propagación del mismo. En los escenarios se han considerado tres tipos de ventilación:

(1) Ventilación cruzada: definida por la apertura de una puerta (0,90 x 2,20 m) ubicada en la parte posterior del recinto del incendio, y las ventanas de la fachada. El flujo de ventilación suministrado por la puerta es permanente, se ha implementado para asegurar una aportación de oxígeno al recinto. Las ventanas inicialmente están cerradas, pero eventualmente los vidrios pueden romperse. El mecanismo por el cual esto sucede viene controlado por una serie de detectores que se activan al alcanzar una cierta temperatura (ver tabla 6.11). Una vez ocurre el *flashover* y los vidrios quedan desactivados, se hace evidente la ventilación cruzada.

(2) Condiciones de tiro natural: definido por las condiciones exteriores determinadas para todos los escenarios (ver tabla 6.7), un flujo natural se caracteriza por bajas velocidades de viento (brisa).

(3) Condiciones de tiro forzado: en algunos escenarios se han introducido distintos flujos de viento, algunos debido a su velocidad se consideran de tiro forzado. Por medio de estos se pretende evaluar el comportamiento del fuego en distintas condiciones de ventilación.

Contenido de los escenarios

Recinto del incendio

- (Cu) Cuadros
- (Co) Cortinas
- (F) Fuente de ignición
- (P) Puerta abierta (0,90 x 2,20 m)

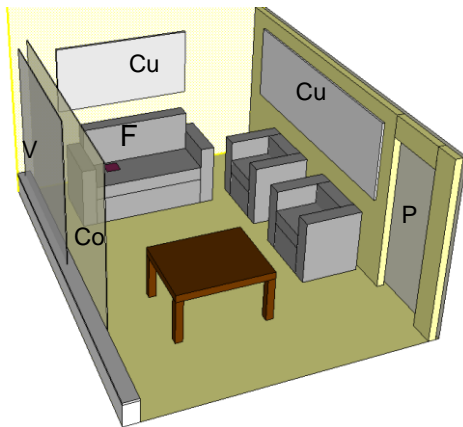


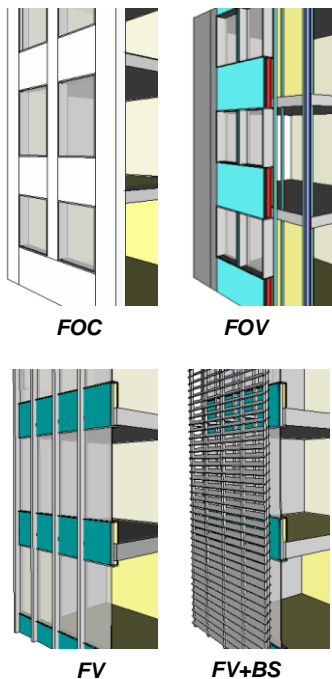
Tabla 6.8 Mobiliario del recinto

Objeto	Nº	Materiales
Sofá	1	Textil
	2	Espuma
Sillones	1	Tela
Mesa	3	Madera (pino)
Cuadros	1	Textil
Cortinas	1	Textil

Tabla 6.9 Elementos de contorno

Objeto	Nº	Materiales
Pavimento	4	Moqueta
Forjados	5	Hormigón
Paredes	6	Yeso

Tabla 6.10 Fachadas



Objeto	Fachada	Nº	Materiales
Muro de fachada	FOC	5	Hormigón
Carpinterías	Todas	7/8	Aluminio/acero
Vidrio ventanas	Todas	9	Vidrio
Placas cartón yeso	FOV	6	Yeso
Estructura de revestimientos	FOV	7	Aluminio
Subestructura de fachada	FOV	8	Acero
Barrera cortafuegos	FOV	8	Acero
Aislamiento térmico 1	FOV	11	Combustible
Aislamiento térmico 2	FOV,FV, FV+BS	12	Incombustible
Placas de cerramiento	FV,FV+BS	13	Cerámica
Montantes	FV,FV+BS	8	Acero
Lamas <i>brise soleil</i>	FV+BS	7	Aluminio

Los números de los materiales corresponden a los cuadros de las propiedades térmicas que se presentan a continuación (Fig. 6.33 y 6.34).

Fig. 6.32 Características del contenido de los escenarios

Nota. La autora de la tesis colaboró en el proyecto *Barcode Housing System* [12] realizando un estudio sobre el comportamiento del fuego en fachadas ventiladas. Algunos de los escenarios **FOV** sirvieron de base para esa investigación.

1. Textil

Material ID: FABRIC
 Description: Properties completely fabricated
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad: 100,0 kg/m³
 Calor Especifico: Constante 1,0 kJ/(kg·K)
 Conductividad: Constante 0,1 W/(m·K)
 Emissivity: 0,9
 Absorption Coefficient: 5,0E04 1/m

2. Espuma

Material ID: FOAM
 Description: Properties completely fabricated
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad: 40,0 kg/m³
 Calor Especifico: Constante 1,0 kJ/(kg·K)
 Conductividad: Constante 5,0E-02 W/(m·K)
 Emissivity: 0,9
 Absorption Coefficient: 5,0E04 1/m

3. Madera

Material ID: YELLOW PINE
 Description: Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad: 640,0 kg/m³
 Calor Especifico: Constante 2,85 kJ/(kg·K)
 Conductividad: Constante 0,14 W/(m·K)
 Emissivity: 0,9
 Absorption Coefficient: 5,0E04 1/m

4. Moqueta

Material ID: CARPET PILE
 Description: Completely made up
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad: 750,0 kg/m³
 Calor Especifico: Constante 2,0 kJ/(kg·K)
 Conductividad: Constante 0,16 W/(m·K)
 Emissivity: 0,9
 Absorption Coefficient: 5,0E04 1/m

Fig. 6.33 Propiedades térmicas de los materiales.
 Cuadros extraídos del programa PyroSim.

5. Hormigón

Material ID: CONCRETE
 Description: NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad:	2280,0	kg/m ³
Calor Específico	Constante	1,04 kJ/(kg·K)
Conductividad	Constante	1,8 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E04	1/m

6. Yeso

Material ID: GYPSUM PLASTER
 Description: Quintiere, Fire Behavior
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad:	1440,0	kg/m ³
Calor Específico	Constante	0,84 kJ/(kg·K)
Conductividad	Constante	0,48 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E04	1/m

7. Aluminio

Material ID: ALUMINIUM
 Description:
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad:	2700,0	kg/m ³
Calor Específico	Constante	0,909 kJ/(kg·K)
Conductividad	Constante	209,0 W/(m·K)
Emissivity:	0,9	
Absorption Coefficient:	5,0E04	1/m

8. Acero

Material ID: STEEL
 Description: Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation
 Material Type: Solid

Thermal Properties Pyrolysis

Densidad:	7850,0	kg/m ³
Calor Específico	Constante	0,46 kJ/(kg·K)
Conductividad	Constante	45,8 W/(m·K)
Emissivity:	0,95	
Absorption Coefficient:	5,0E04	1/m

Fig. 6.34 Propiedades térmicas de los materiales. Cuadros extraídos del programa PyroSim.

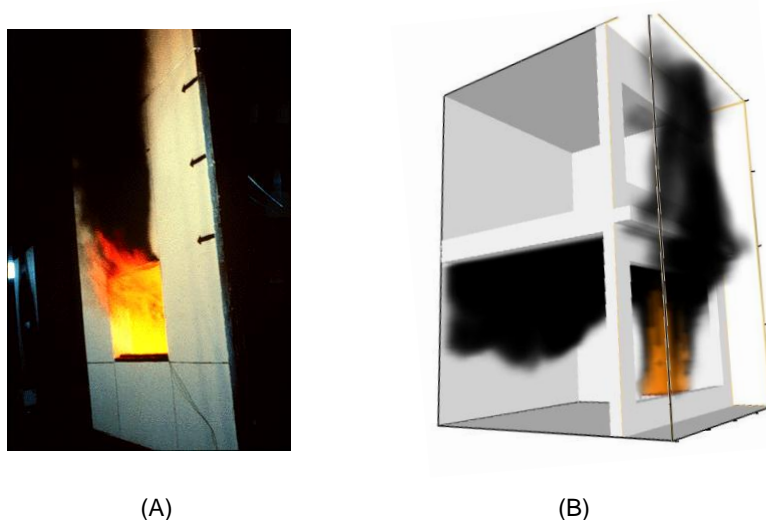


Fig. 6.35 (A) Módulo de ensayo de tres plantas, combustible gas propano.
 (B) Escenario inicial de este estudio, quemador como fuente de energía.
 Fuente: T. Hakkarainen, *Studies on fire safety assessment of construction products*. VTT, 2002

- **Descripción del incendio e hipótesis de las pruebas**

El incendio comienza a partir de una fuente de energía (descrita anteriormente) ubicada sobre el sofá, la evolución del fuego está determinada por las condiciones del recinto (aporte permanente de oxígeno) y las propiedades térmicas, cantidad y distribución de los objetos presentes (mobiliario combustible). Durante la fase inicial se genera un penacho cada vez más alto y ancho sobre el sofá, que posteriormente se propaga hacia las cortinas y los muebles adyacentes. A partir de este momento el incendio pasa a la fase de crecimiento (207 segundos) durante este periodo se “rompen” (desactivan) los primeros vidrios de las ventanas y con la entrada del flujo de aire del exterior se alcanza la fase de *flashover* (combustión súbita generalizada) (485 segundos). A partir de este momento el fuego está en una etapa de total desarrollo, llamada también fase *post flashover*. Durante esta fase las llamas se proyectan hacia el exterior a través de las ventanas, dando inicio a la propagación exterior del fuego. Paralelamente a los procesos de propagación de las llamas se genera gran cantidad de humo y gases tóxicos. No obstante, éstos no han sido tomados en consideración en la investigación. La fase de declive comienza cuando el combustible ha sido agotado por el fuego, esta situación se inicia aproximadamente a los 735 segundos. Los tiempos entre las secuencia del incendio varían de un escenario a otro dependiendo de las condiciones de los escenarios.

Hipótesis de las pruebas

En el estudio se ha asumido una hipótesis general común a todos los escenarios y dos específicas relacionadas con las tipologías de fachadas **FOV** y **FV**. En la hipótesis general la prioridad es que el recinto del incendio reúna las características necesarias para que el fuego evolucione adecuadamente, sea auto sostenible y alcance la fase *flashover*. En la tabla 6.11 se especifica la sucesión de eventos que describen este proceso. Otras tres hipótesis relacionadas con posibles fallos en los elementos constructivos de las fachadas debido a las altas temperaturas se especifican en la tabla 6.12.

- **Disposición de elementos de medición**

El análisis comparativo de los modelos está basado en la observación de la propagación del fuego, la forma que adoptan las llamas y la distribución de las temperaturas que FDS calcula a partir del calor de convección y radiación en el entorno del penacho de fuego. El perfil de temperaturas puede ser posteriormente visualizado en secciones bidimensionales (Fig. 6.36).

Tabla 6.11 Hipótesis general de las pruebas

Nº	Eventos	Dispositivo	Descripción
1	Ignición	-	El fuego se inicia en el sofá mediante la fuente de energía dispuesta en su superficie.
2	Crecimiento	-	El incendio crece en función de las características del recinto y el material combustible del contenido.
3	Rotura de vidrios	Detector de calor	Las ventanas se desactivan una vez el detector instalado en su entorno inmediato alcanza 300°C. También en las P1 y P2 se sigue en mismo criterio, pero el dispositivo está ubicado en la zona exterior de las ventanas.
4	Las cortinas son consumidas	Detector de calor	Una vez desactivadas las ventanas, las cortinas correspondientes se desactivan con un retraso de 10 segundos.
5	<i>Flashover</i>	-	El fuego alcanza su pleno desarrollo y da paso a la fase <i>post flashover</i> .
6	Propagación	-	El fuego se propaga a través de la fachada y afecta las plantas superiores.
7	Declive	-	Una vez es consumido el material combustible del recinto inicia la fase de declive.

Tabla 6.12 Hipótesis específicas

Eventos	Dispositivo	Descripción
Fallo de la barrera cortafuegos de la tipología FOV	Detector de temperatura	Al alcanzar 1500°C de temperatura se desactiva el elemento.
Fallo en la carpintería de aluminio de la tipología FOV , dando paso a la propagación del fuego a la cámara ventilada	Detector de temperatura	Al alcanzar 500°C de temperatura se desactiva el marco de las ventanas.
Fallo en una pieza del cortafuegos de la tipología FV	Detector de temperatura	Al alcanzar los 700°C una pieza complementaria del cortafuegos (solución 2) cae, dejando una brecha de 3 cm. El fallo está asociado a las piezas de fijación de aluminio.

Para obtener resultados cuantitativos se han dispuesto termopares en lugares de interés de los modelos. Las cifras quedan registradas en archivos de datos que permiten la elaboración de curvas. Cada escenario ha sido provisto de varios termopares ubicados en los puntos más relevantes de los escenarios, sin embargo se han utilizado sólo los indispensables para contrastar la información requerida según los aspectos planteados, de tal manera que no fuera un problema comprender los análisis por exceso de información. Se ha dado prioridad a la obtención de datos acerca de las temperaturas en los antepechos de las plantas superiores y una zona interior de cada recinto en las proximidades a las ventanas. También se han tomado en consideración los datos de la velocidad de cesión del calor *HRR (Heat Release Rate)*, de la cual el FDS aporta un promedio de KW por unidad de tiempo (s) para todo el recinto, es decir, no se requiere ubicar ningún termopar para su obtención. Todos los demás datos que se requieran de las simulaciones han de ser considerados previamente e introducidos en el código antes de iniciar el proceso de cálculo.

Se han dispuesto diferentes planos para comprobar las temperaturas emitidas por el penacho de fuego. Finalmente, la mayor parte de las comprobaciones se ha realizado a partir del plano ubicado en el eje Y en la zona de las ventanas de la izquierda. Se ha aplicado el mismo criterio a los termopares.

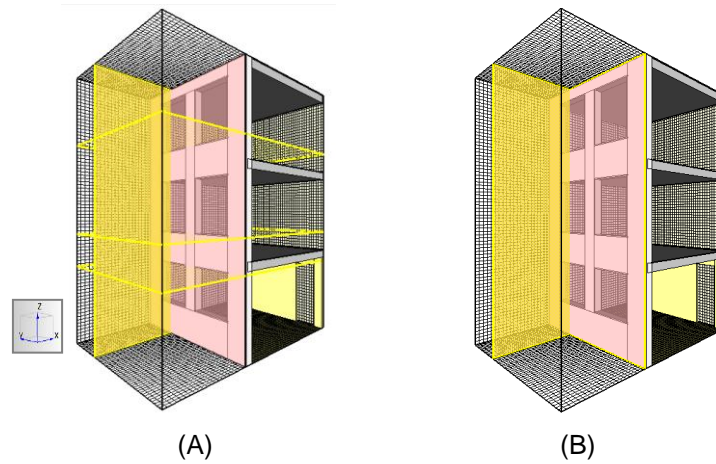


Fig. 6.36 Planos animados (A) Ubicados en los diferentes ejes
 (B) Los más relevantes para realizar las observaciones han sido: en el eje X sobre la fachada y en el eje Y en la zona de las ventanas de la izquierda.
 Imágenes extraídas del programa PyroSim.

Dispositivos del escenario básico 1

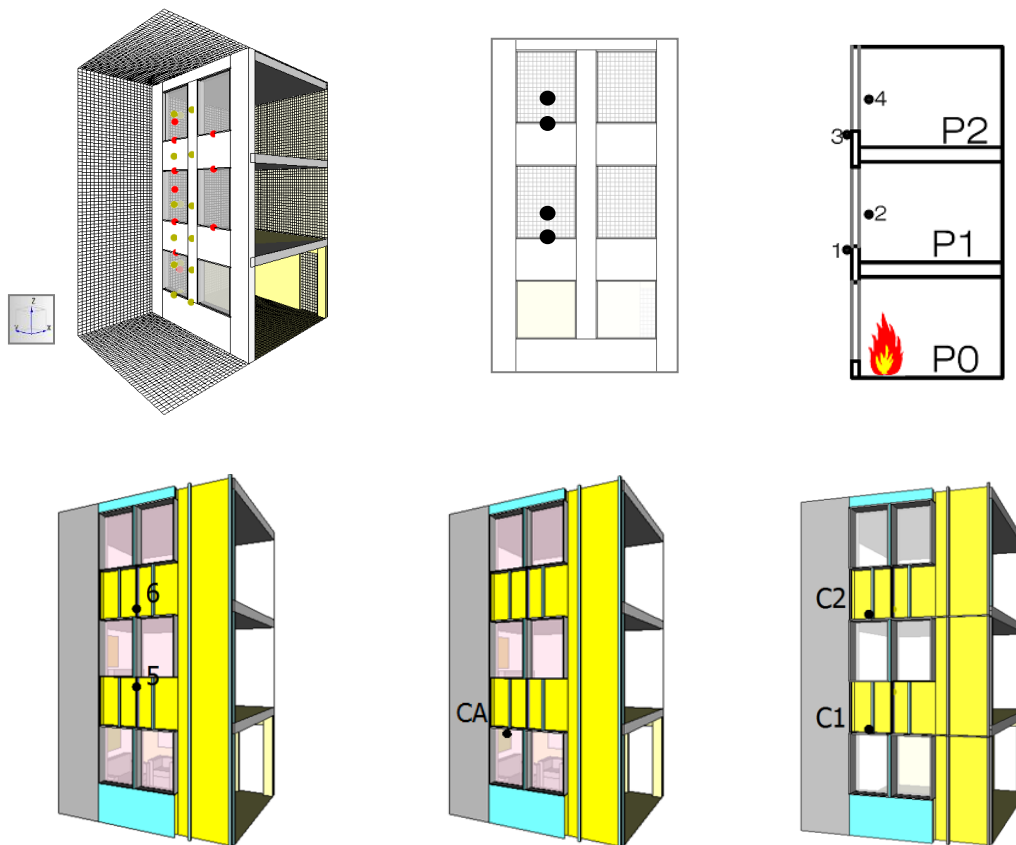
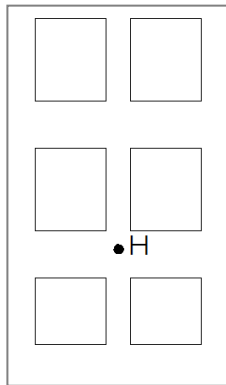


Fig. 6.37 Termopares ubicados en diferentes partes del escenario.
 Se señalan sólo los dispositivos usados para los análisis.
 Imágenes extraídas del programa PyroSim.

Dispositivos del escenario básico 2



Dispositivos del escenario básico 3

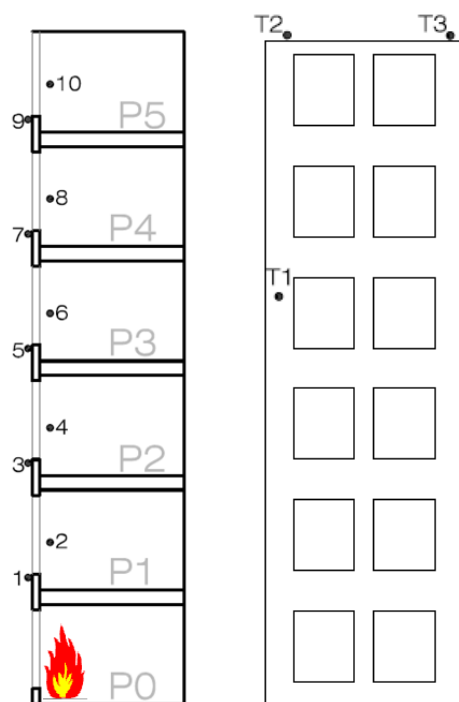


Tabla 6.13

Termopar	Altura (m)	Escenario
1	3,00	1-3
2	4,00	1-3
3	5,80	1-3
4	7,00	1-3
5	8,60	3
6	10,0	3
7	11,4	3
8	13,0	3
9	14,12	3
10	16,0	3
CA	2,00	1
C1	2,50	1
C2	5,25	1
H	2,50	2
T1	11,0	3
T2-T3	18,0	3

Fig. 6.38 Ubicación de los termopares en los distintos escenarios.
Imágenes extraídas del programa PyroSim.

6.5 Análisis e interpretación de resultados

Esta sección condensa todos los aspectos relacionados con la fase experimental del estudio y expone los resultados de los escenarios de simulación y los análisis realizados a partir de éstos. El objetivo en este punto es dar a conocer de forma clara los resultados obtenidos con el propósito de aportar unas conclusiones útiles. Los criterios del estudio y los aspectos de evaluación considerados han sido explicados en las secciones precedentes.

Esta parte del capítulo corresponde al paso 4 de la fase experimental (Fig. 6.1). El método empleado en este análisis se basa en la observación del comportamiento del fuego y sus tendencias más destacadas en cada situación planteada, y en el contraste de los resultados obtenidos por la aplicación de las distintas variables consideradas. Las hipótesis de prueba son una combinación de conceptos sobre la dinámica del fuego, inquietudes sobre el comportamiento de algunos elementos que conforman las fachadas y dudas en referencia a la efectividad de las medidas estipuladas por la normativa vigente. Los datos registrados para realizar la comparativa de valores son principalmente la velocidad de cesión del calor *HRR*, la distribución de las temperaturas sobre los muros, la evolución de las temperaturas en puntos concretos del escenario (mediante termopares), la distribución de temperaturas del flujo de calor por convección del penacho del incendio, entre otros. La información gráfica y los datos obtenidos de las simulaciones han permitido extraer consideraciones cualitativas y cuantitativas sobre los aspectos de interés. Los casos definidos en los escenarios han permitido evaluar los posibles efectos de la propagación del incendio, considerar los mecanismos de propagación del fuego explicados en el capítulo 4 y analizar variables del comportamiento del fuego tales como: la evolución del incendio, la trayectoria, la forma y longitud de las llamas, la velocidad de propagación, la intensidad y alcance del flujo de calor sobre la superficie exterior, la probabilidad de propagación del incendio a las plantas superiores, etc.

Como se explicó en el capítulo 4, la propagación exterior del fuego en un edificio puede darse como consecuencia de un incendio originado en una edificación vecina o por la combustión de algún elemento (contenedores de basura, zona boscosa, etc.) en sus inmediaciones. También puede darse como consecuencia de un fuego originado en un recinto del propio edificio que se desarrolla hasta alcanzar la fase *flashover*; a partir de entonces se dará inicio a la descarga de llamas a través de las ventanas.

Este estudio se ha centrado en esta última causa, puesto que se percibe como la situación que reviste mayor peligro y también estadísticamente resulta ser la más significativa. Los eventos que estructuran cada simulación (ver apartado 6.4) se han establecido bajo un mismo criterio con el fin de tener en cada caso las mismas condiciones de partida. Las fases preliminares del incendio tales como el inicio del fuego, el crecimiento de las llamas, la propagación del fuego a otros objetos y la “rotura” o desactivación (en las simulaciones) de los vidrios de las ventanas ocurren de forma similar en todos los casos. La fase en la cual se da el crecimiento del incendio hasta alcanzar el *flashover* también se desarrolla de forma similar en todos los escenarios, salvo en aquellos que involucran el factor de ventilación, como es el caso de la forma, el tamaño de las ventanas y la incorporación de flujos de viento. En estas situaciones la velocidad de combustión puede ser más o menos rápida y el flujo de calor puede presentar mayor o menor intensidad, según sea el caso. Por tanto, aunque los aspectos de mayor interés de los análisis se centran en la fase *post flashover* del incendio, es decir, una vez se inicia la propagación exterior del fuego, también es importante considerar el desarrollo del incendio dentro del recinto. Esta relación entre el desarrollo del incendio y su propagación viene definida principalmente por: la cantidad de combustible, las dimensiones del recinto del incendio, las dimensiones de las ventanas y las condiciones de ventilación [Law 1978]. Los factores estudiados influyen de distinta forma en estos procesos, en algunos casos afectan en ambos de forma simultánea, lo cual se observa en particular en los escenarios en los que se consideran los efectos de la configuración geométrica de la fachada y los factores climatológicos. Esta relación se ilustra en la Fig. 6.39. Los análisis que se exponen a continuación guardan el mismo orden seguido en el cuadro de la panorámica general de los aspectos de evaluación (Fig. 6.4).

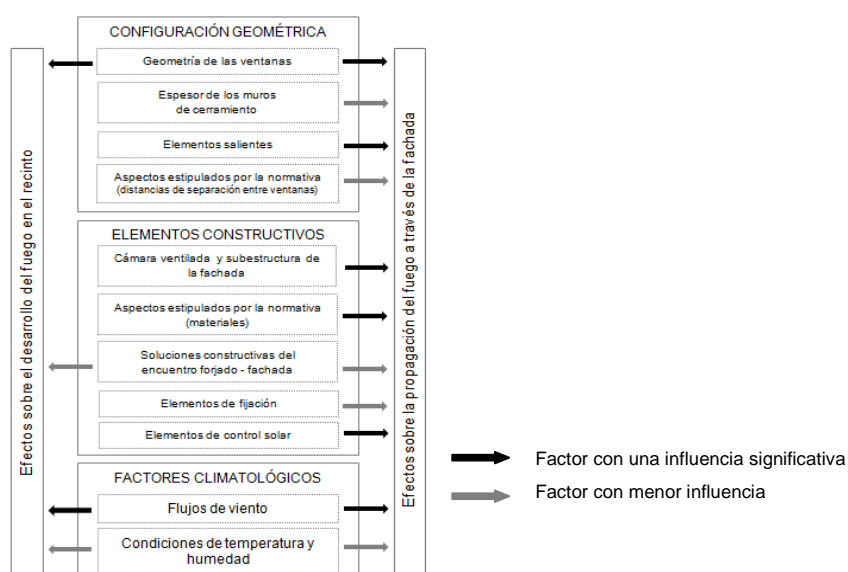


Fig. 6.39 Influencia de los factores estudiados sobre el desarrollo del incendio en el recinto y la propagación del fuego.

6.5.1 Configuración geométrica de las fachadas

La influencia del factor geométrico en la dinámica del incendio está fuera de toda duda. Diferentes expertos han llevado a cabo estudios orientados a determinar su efecto tanto en la evolución del fuego en el interior del recinto como en la propagación del fuego hacia el exterior de la edificación¹. La geometría es un concepto amplio que encontramos en las fachadas de los edificios de distintas maneras tales, como: el tamaño y forma de las aberturas, la configuración, ubicación y tamaño de los elementos constructivos, la disposición de las superficies, los elementos ornamentales, la geometría que conforman los elementos constructivos según la tipología de la fachada, etc.

La propagación exterior del fuego puede variar significativamente en función de la geometría de las ventanas y los cuerpos o elementos salientes ubicados sobre el frente de la fachada. También condiciona la dinámica del fuego la presencia de superficies (franjas verticales) ubicadas encima de las aberturas de las ventanas y que separan los huecos de las ventanas de una planta a otra [Yokoi 1960]. Los efectos de estos factores pueden reflejarse en: el grado de exposición de la superficie de la fachada, la temperatura del penacho de fuego, el alcance y trayectoria del penacho de fuego, la probabilidad de propagación del incendio a las plantas superiores, etc. Mediante los escenarios de simulación realizados ha sido posible estudiar la importancia del factor geométrico considerando distintas variables relacionadas con estos riesgos.

Las observaciones realizadas en torno a la geometría de las fachadas son genéricas, no hacen referencia a un sistema constructivo en particular, por tanto son aplicables a cualquiera de las tipologías propuestas en el estudio ya sea **FOC**, **FOV** o **FV**. La vía de propagación asociada a estos casos de estudio es el mecanismo de propagación de ventana a ventana o efecto *leap frog*. Los parámetros e hipótesis de prueba aplicados en los escenarios son los correspondientes al escenario básico 1, excepto en el punto que analiza la distancia horizontal para limitar la propagación del incendio entre recintos contiguos, para este caso se ha partido del escenario básico 2 (ver apartado 6.4).

¹I. Oleszkiewicz (1989) da una extraordinaria importancia a la influencia de configuración geométrica de la fachada en la propagación exterior del fuego; afirma que ésta es tan importante como lo puede ser el grado de combustibilidad de los materiales de revestimiento de la fachada y la velocidad de sesión del calor *HRR*.

Geometría de las ventanas

La forma y el tamaño de las ventanas son aspectos que influyen significativamente en la propagación exterior del fuego, así como en el desarrollo y evolución del incendio en el interior del recinto. De hecho, estos aspectos tienen una correlación evidente² definida por el factor de apertura de las ventanas expresado como:

$$V = A\sqrt{h}$$

Donde: A es el área de la ventana y h es la altura.

El factor de apertura hace referencia a la configuración geométrica de las ventanas, y tiene una estrecha relación con el flujo de aire que fluye hacia el recinto debido al arrastre del penacho de fuego que emerge a través de las ventanas [Kawagoe 1963] (ver apartado 4.5). Reviste gran interés en relación a la propagación exterior porque condiciona la forma, el tamaño e intensidad del penacho de fuego.

Como se indicó en el capítulo 4, en un incendio que se desarrolla en el interior de un recinto, el aire (oxígeno) es por lo general el reactivo limitante, por lo tanto los principales factores de peligrosidad tales como la velocidad de combustión, la velocidad de cesión del calor *HRR*, la duración del incendio y la máxima temperatura alcanzada dependen en gran medida de la cantidad de oxígeno presente en el recinto; es lo que se denomina un incendio controlado por la ventilación. En este tipo de incendios el factor geométrico de las ventanas resulta determinante por la relación que existe entre la superficie de la ventana, la cantidad de aire fresco que entra y el flujo de calor que sale hacia el exterior durante la descarga de las llamas. El flujo de calor total que incide sobre la superficie de la fachada puede variar cualitativamente en función de la forma y tamaño de las ventanas debido a la acción diferenciada de los mecanismos de transferencia de calor³.

² M. Law (1978) basó varias de sus formulaciones en torno al factor geométrico de las ventanas y en la correlación existente entre la longitud de las llamas y la intensidad del incendio.

³ I. Oleszkiewicz (1989) aporta interesantes consideraciones sobre el papel que desarrollan los mecanismos de transferencia de calor en función de la forma de las aberturas de las ventanas. Según su estudio en las ventanas estrechas y alargadas el mecanismo de transporte de calor predominante es la convección y por esto las llamas son más alargadas y más fluctuantes, mientras que en las ventanas cuadradas y muy horizontales (PAH) predomina el transporte de calor por radiación con un flujo más uniforme y concentrado sobre la superficie.

S. Yokoi (Citado por Quintiere en Harmanty, 1978: 151) se refiere a un concepto similar y lo expresa como $n=2W/H$ (n =promedio del área de la ventana W =ancho de la ventana H =altura de la ventana) Cuando n aumenta el penacho de fuego tiende a ceñirse a la fachada. Esto es en las ventanas muy horizontales (PAH).

Cuando predomina la transferencia de calor por convección las llamas son más fluctuantes y pueden dar lugar a plumas de fuego más alargadas. Cuando la transferencia de calor radiante es la que predomina el penacho de fuego es más concentrado, ceñido a la superficie e intenso [Oleszkiewicz 1989].

Distintos expertos han establecido modelos para calcular, a partir del factor de apertura, el flujo de calor proyectado hacia el exterior a través de ésta y el factor de ventilación que entra al recinto.

Forma de las ventanas

Este aspecto se ha analizado mediante la comparativa de tres formas de ventana diferentes (Fig. 6.5).

Ventana **cuadrada** 1,50 x 1, 50 m (2,25 m²)

Ventana **PAV** (proporción alargada vertical) 0,90 x 1, 80 m (1,62 m²)

Ventana **PAH** (proporción alargada horizontal) 1,50 x 0,40 m (0,60 m²)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.40
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.41

Nota 1: Cada uno de los aspectos que se analiza a continuación se complementa con las figuras que aparecen en el cuadro anterior. Los “gráficos de la simulación” son las imágenes extraídas del programa Smokeview y las “curvas comparativas” corresponden a los datos numéricos extraídos del FDS.

Nota 2: Al final del capítulo hay un resumen con los significados de la terminología usada en los análisis.

A partir del estudio de los gráficos se deduce que la forma de las ventanas tiene una influencia relevante sobre la propagación exterior del fuego. Se aprecia un comportamiento diferenciado en relación a la trayectoria, forma y longitud de la pluma de fuego en cada configuración de ventana. Por lo tanto, se puede considerar que hay una correlación entre la forma que adoptan las llamas y la forma de la ventana por la cual se proyectan hacia el exterior.

En la ventana **cuadrada** se observa un penacho con una forma alargada y ligeramente curvilínea, la ventana **PAV** presenta un penacho más alto, delgado y con cierta tendencia a ceñirse a la superficie de la fachada a intervalos irregulares, mientras que la ventana **PAH** genera un penacho con una forma inicialmente curvilínea y alejada de la fachada y posteriormente muy ceñida a ésta. En los gráficos que muestran las

temperaturas del flujo de calor sobre la fachada (vista frontal) también se aprecia la influencia de la forma de las ventanas sobre el flujo de calor. La superficie afectada por un flujo de calor más amplio es la fachada con la configuración **cuadrada**, mientras que la superficie afectada con un flujo alargado y con mayor alcance en altura es la fachada con configuración **PAV**. En las comparativas de curvas de evolución de las temperaturas se observan picos máximos de temperatura similares en las configuraciones **cuadrada** y **PAV**, en ambos casos estos rozan los 800°C. No obstante la configuración **PAV** despunta por tener mayor alcance al incidir con mayor intensidad sobre la P2 (termopar 3) y alcanzar los picos máximos con mayor rapidez. También al observar las curvas en los termopares 2 y 4 (interior del recinto P1 y P2 respectivamente) se aprecian las diferencias más relevantes en la configuración de ventana **PAV**, en estas curvas se aprecia que los picos de temperatura superan ampliamente los 300°C mientras que para la ventana **PAH** se mantienen cerca de los 100°C, las temperaturas para la configuración de ventana **cuadrada** se mantiene en una situación intermedia respecto a las dos anteriores. En el exterior de la fachada ocurre una situación distinta, las curvas de temperatura de los termopares 1 y 3 (zona exterior del antepecho P1 y P2) muestran temperaturas similares en las tres configuraciones, con un leve despunte de la ventana **PAV** cuya velocidad de crecimiento del incendio es ligeramente más rápida.

De lo anterior se puede deducir, por un lado, que la estrechez de la ventana **PAH** reduce notablemente la probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores, y por otro lado que el transporte de calor por radiación ocurre de forma efectiva a través de la ventana **PAH** sin que su poca altura sea un factor condicionante. Esto es especialmente significativo si se tiene en cuenta el esquema de descarga de las llamas realizado por [Law 1978] (sección 4.5.1) según el cual solo en las 2/3 partes de la altura de la ventana se da una propagación efectiva. Esta observación se confirma con la prueba realizada en un escenario adicional en el cual se ha probado una ventana **PAH** con la misma medida de ancho pero con 40 cm de altura adicionales. Los resultados muestran un comportamiento muy similar al que se da en la ventana **PAH** original. En síntesis se puede considerar que la configuración **PAV** es la que podría presentar un flujo de calor más intenso y con mayor alcance vertical sobre la superficie de la fachada, lo que supondría una alta probabilidad de propagación a las plantas superiores a través de las ventanas, es decir mediante el efecto *leap frog*. Según estas mismas observaciones la menor probabilidad de propagación se daría con la configuración **PAH**.

Forma de las ventanas

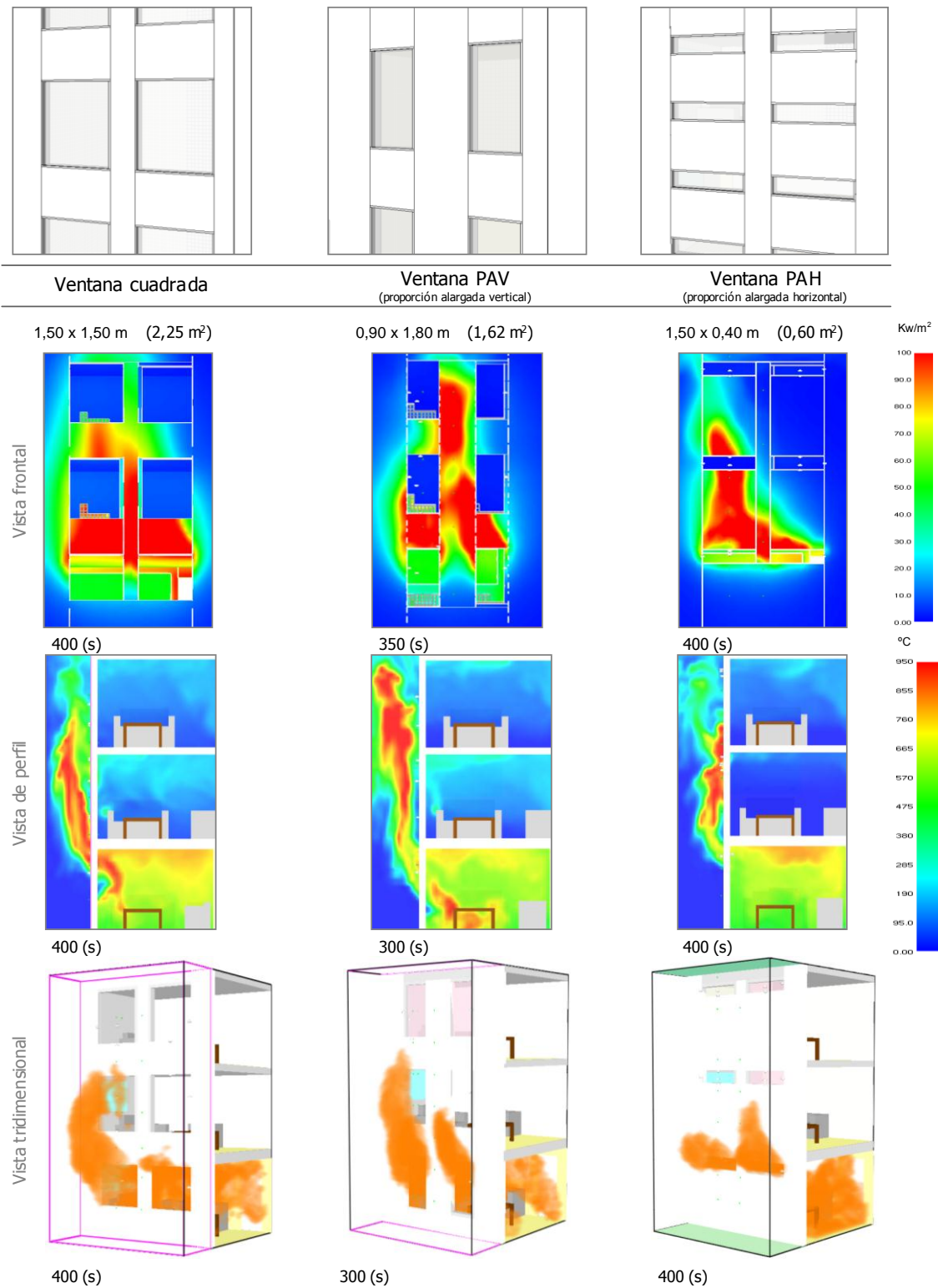
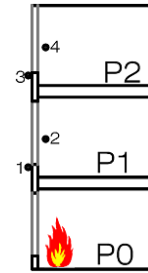
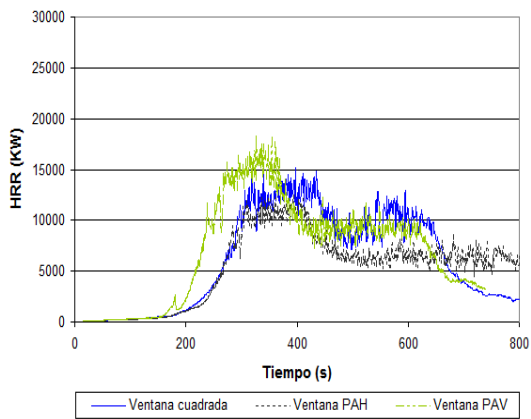
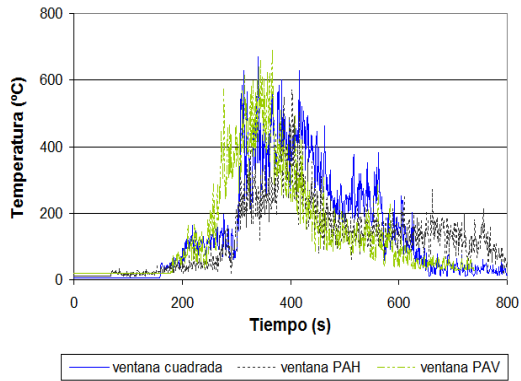


Fig. 6.40
Se aprecia que la forma de las ventanas tiene una importante influencia en la forma que asume el penacho de fuego.

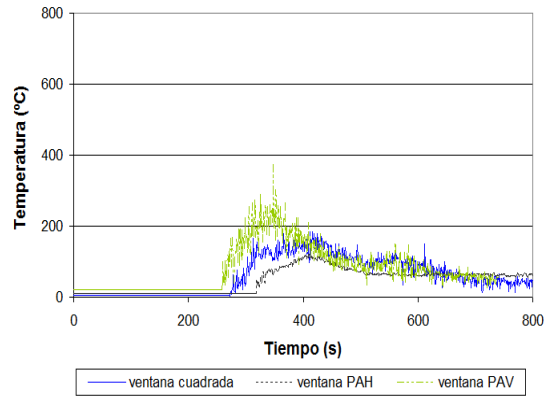
Forma de las ventanas



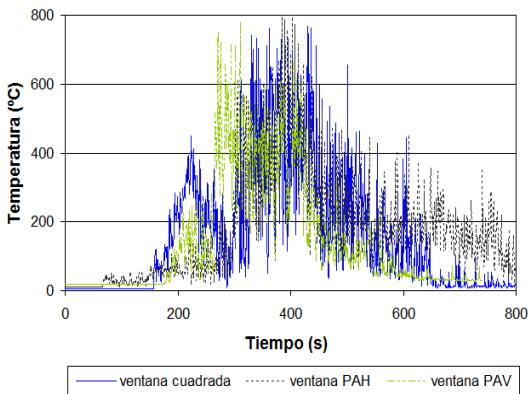
Evolución de temperaturas termopar 3 (zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 4 (interior del recinto P2)



Evolución de temperaturas termopar 1 (zona exterior del antepecho P1)



Evolución de temperaturas termopar 2 (interior del recinto P1)

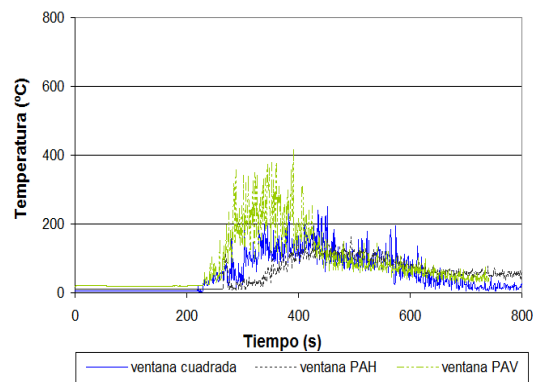


Fig. 6.41

De acuerdo a las curvas de temperatura se podría considerar que la configuración que podría generar mayor riesgo de propagación a las plantas superiores es la ventana PAV.

Tamaño de las ventanas

Este aspecto se ha analizado mediante la comparativa de tres tamaños diferentes de ventana (Fig. 6.6 y Fig. 6.7).

Ventana **tipo** 1,50 x1, 50 m (2,25 m²)

Ventana **grande** 2,80 x1, 80 m (5,04 m²)

Ventana **corrida** 4,00 x 1,90 m (7,60 m²)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.42
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.43

La forma y el tamaño de las ventanas son aspectos que están muy relacionados entre sí. Su denominador común es el factor de apertura, el cual, como se mencionó antes, es un factor de gran influencia en la evolución del incendio y su propagación hacia el exterior. Esta correlación entre la geometría de las ventanas, la evolución del fuego y la descarga de las llamas sobre la fachada se aprecia con más claridad al considerar diferentes tamaños de ventanas.

En los gráficos de las simulaciones se aprecian notables diferencias en la propagación del fuego en los tres casos, determinadas principalmente por el tamaño del penacho de fuego. Se podría afirmar que el tamaño de éste es directamente proporcional al tamaño de la ventana por la cual se proyecta hacia el exterior, por lo tanto las configuraciones con *ventana grande* y *ventana corrida* presentan un penacho con un tamaño considerablemente mayor al de la *ventana tipo*.

La forma del penacho de fuego en la *ventana tipo* es alargada y ligeramente curvilínea, en la *ventana grande* se torna algo fluctuante y su forma cambia constantemente: de describir una curva pronunciada que retorna sobre las ventanas de las dos plantas, a ceñirse a la superficie. La *ventana corrida* presenta un gran penacho sin forma definida que abarca todo el ancho de la ventana, su trayectoria es predominantemente ceñida a la fachada, por tanto incide de forma permanente sobre ésta⁴.

⁴ En las apreciaciones que M. Law (1978) realizó en referencia a la forma de las ventanas expuso que en las ventanas grandes el flujo de calor tiende a "abrazar" (*hug*) la superficie. Consideró que la efectividad del flujo de calor era mayor sobre las superficies sólidas en esta situación.

Tamaño de las ventanas

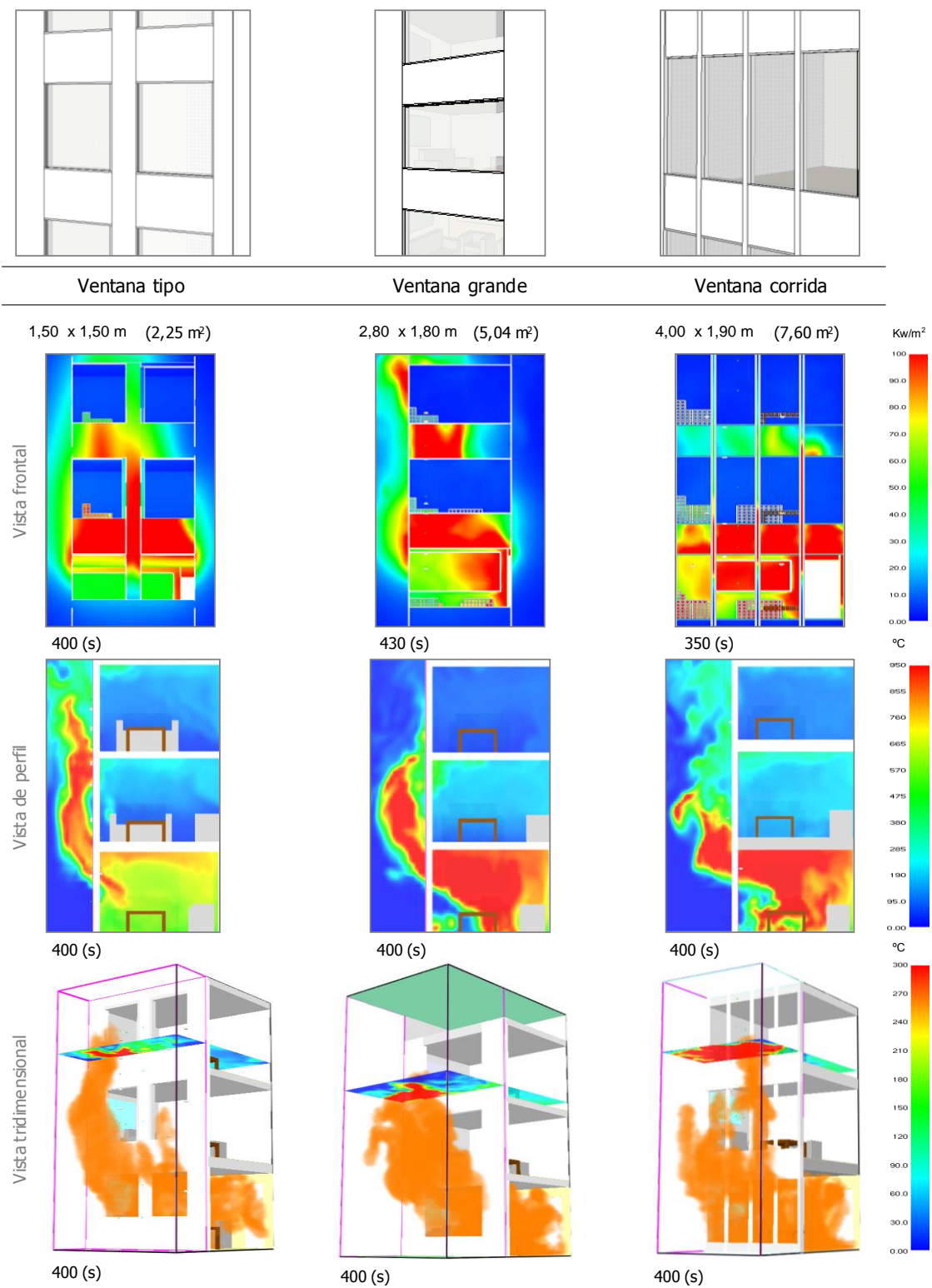


Fig. 6.42 El tamaño del penacho del fuego es proporcional al tamaño de la ventana por la que emerge.

Tamaño de las ventanas

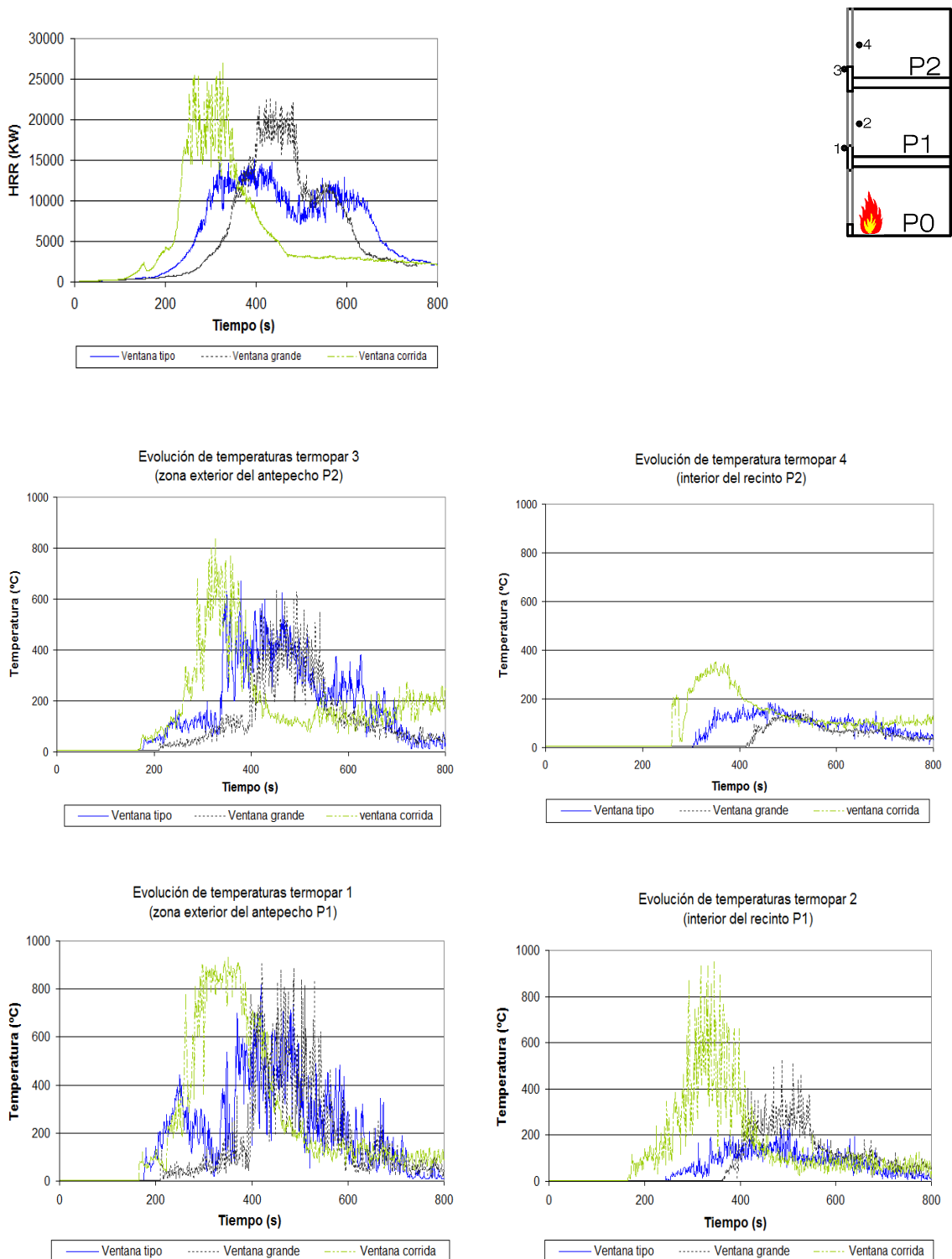


Fig. 6.43
 Se puede afirmar que el riesgo de propagación del fuego se incrementa significativamente cuando las ventanas son grandes.

En los gráficos que muestran la distribución del flujo de calor sobre la fachada (vista frontal) se aprecia una incidencia significativa sobre la superficie en los tres casos, sin embargo, ésta es considerablemente mayor en las configuraciones de **ventana grande** y **ventana corrida**. En las curvas de evolución de las temperaturas (termopares 1, 2, 3 y 4) también se observa con claridad esta situación. En este punto resulta de especial interés apreciar las temperaturas registradas en los termopares 2 y 4 (interior de P1 y P2) en las cuales se aprecian picos altos de temperatura en los casos con **ventana grande** y **ventana corrida** y en especial en este último, lo que sugiere una alta probabilidad de propagación del fuego a las plantas superiores.

El tamaño de las ventanas también influye en la intensidad del incendio y en su velocidad de evolución, lo cual se debe a los cambios que se dan en las condiciones de ventilación del recinto [Klopovic – Turan 2001]. En las curvas de velocidad de cesión del calor *HRR* se ve que la evolución del fuego en el escenario con la ventana corrida es con diferencia la más rápida e intensa de los tres casos. Los escenarios con **ventana tipo** y **ventana grande** presentan un comportamiento similar durante los primeros 200 segundos aproximadamente, es decir, hasta que se desactivan las ventanas. Una vez ocurre este evento se aprecia un importante incremento en la intensidad del flujo de calor en el escenario de la ventana grande, lo cual pone de manifiesto el efecto del factor de ventilación. En el escenario de la ventana cuadrada la aportación de ventilación por efecto de la desactivación de la ventana sólo genera un leve incremento en la intensidad de la reacción.

En síntesis se puede considerar que las ventanas de grandes dimensiones representan un riesgo mayor respecto a las ventanas pequeñas, el cual va asociado a las condiciones de ventilación en el recinto de origen del fuego, el tamaño del penacho de fuego que se proyecta sobre la fachada y la facilidad de penetración a otras plantas a través de las ventanas por efecto *leap frog*.

Espesor de los muros de cerramiento

En relación a este aspecto se han tomado dos escenarios con una misma configuración de ventanas (tipo) pero con distinto espesor de muro de cerramiento, lo cual genera una geometría diferente en el telar de las ventanas (alféizar, dintel, jambas) en los dos casos (Fig. 6.8).

Muro **E=24** (24 cm de espesor)

Muro **E=41** (41 cm de espesor)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.44
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.45

Este aspecto, aunque aparentemente no parece muy influyente, se ha revisado teniendo en cuenta la sensibilidad del fenómeno del fuego frente a los factores geométricos y ha permitido observar algunos cambios en el comportamiento del penacho de fuego que se consideran de interés.

Se ha podido observar que este factor geométrico influye en la trayectoria del penacho de fuego, pero tiene muy poca incidencia en la evolución del incendio en el recinto. Esto se aprecia en las curvas que comparan la velocidad de cesión del calor *HRR* en función del tiempo para ambos casos.

De acuerdo a lo que se aprecia en los gráficos en el escenario de **E=24** la forma del penacho de fuego es alargada y ligeramente curvilínea; el perfil de la propagación muestra que el flujo de calor permanece muy cercano a la fachada. En el escenario de **E=41** la forma del penacho de fuego describe una curva más pronunciada y levemente inclinada por tanto su trayectoria tiende a ser desviada hacia el exterior.

Esta situación también se aprecia en los gráficos que muestran la distribución del flujo de calor sobre la fachada (vista frontal). La incidencia del flujo de calor sobre la fachada de **E=24** es mayor a la que se da en la fachada de **E=41**. De esto se podría deducir que en este último caso el capialzado de la ventana cumple una función de elemento deflector, el cual desvía la trayectoria de las llamas hacia el exterior y esto repercute en una disminución del flujo de calor sobre la fachada.

Espesor de los muros de cerramiento

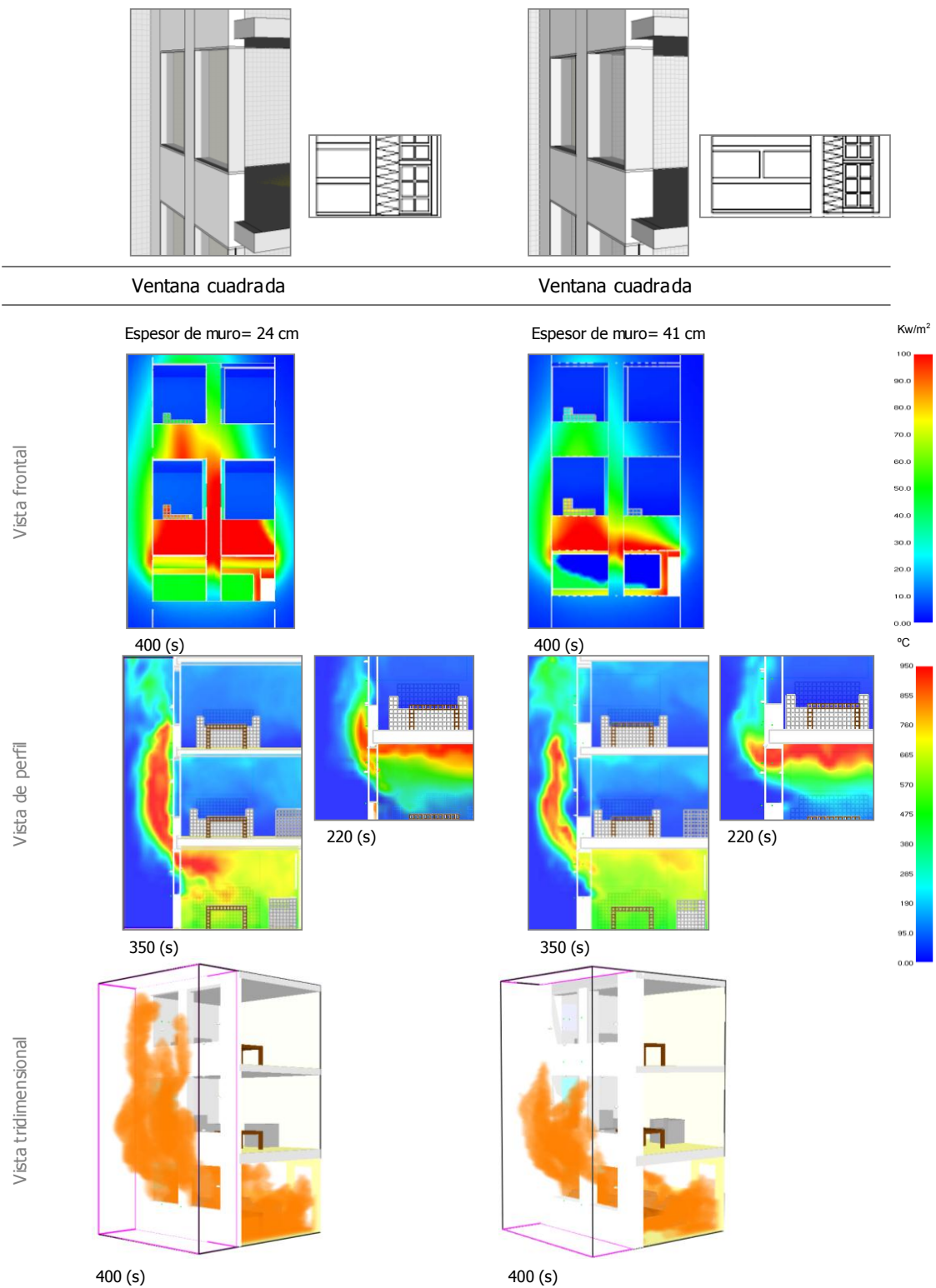


Fig. 6.44
 En las vistas de perfil se aprecia que el muro más ancho desvía ligeramente la trayectoria del penacho de fuego hacia el exterior.

Espesor de los muros de cerramiento

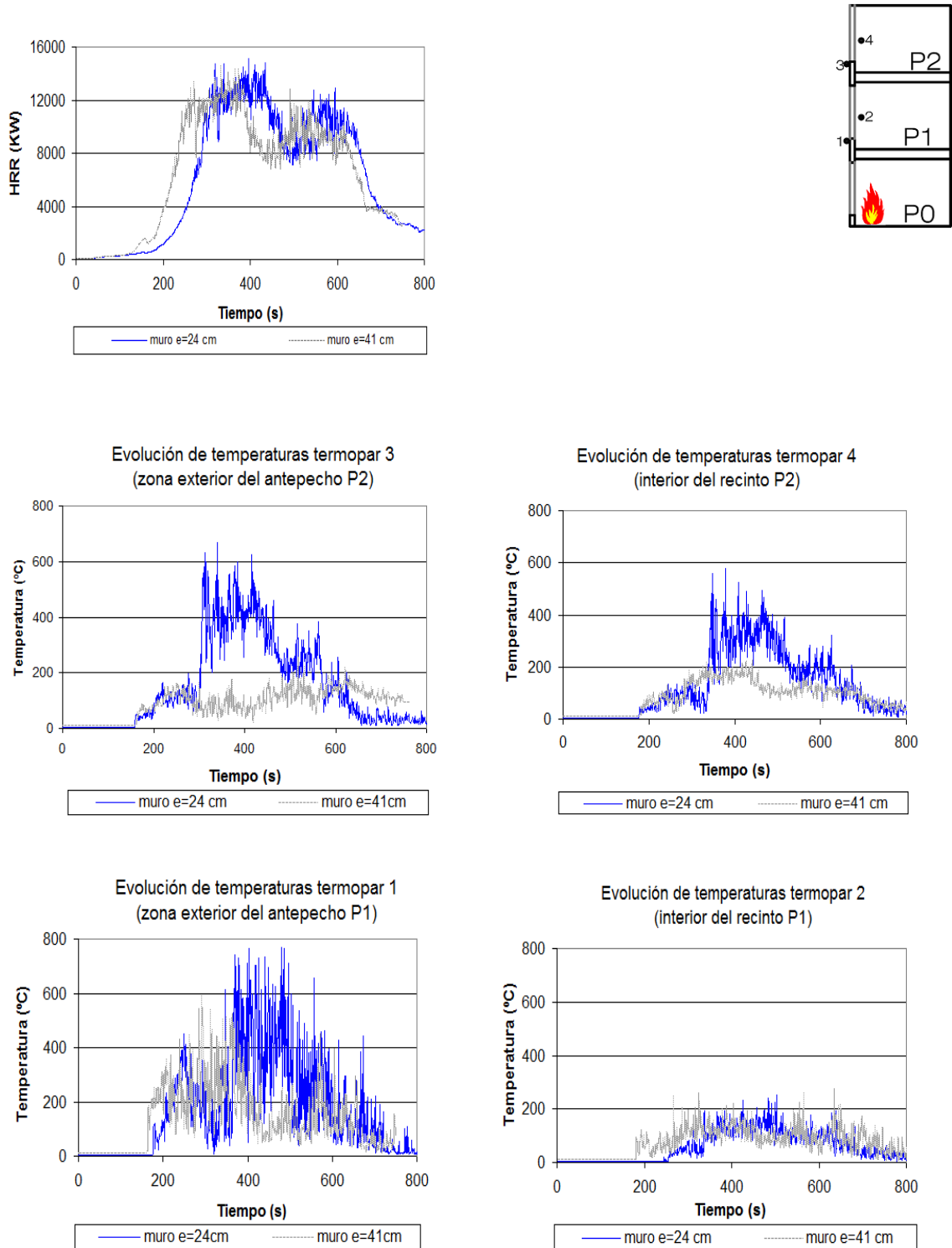


Fig. 6.45

Las temperaturas registradas muestran que el flujo de calor tiene menor alcance en altura en el muro E=41, lo que indica que el cambio de trayectoria producido por este muro tiene un efecto que contribuye a reducir la incidencia el flujo de calor y también la probabilidad de propagación a las plantas superiores.

Cabe considerar que el efecto de proyección provocado por el espesor del muro $E=41$ es leve, y por tanto podría ser insuficiente para limitar la incidencia del flujo de calor sobre la P1, sin embargo puede contribuir a la reducción del flujo de calor sobre la P2 y con ello podría reducir la probabilidad de propagación del incendio a las plantas superiores. Estas consideraciones se realizan en base a lo que se aprecia en las curvas comparativas de las temperaturas registradas en los termopares 1, 2, 3 y 4.

Elementos salientes

Indefectiblemente los elementos salientes forman parte de la configuración geométrica de las fachadas ya sea en forma de aleros, balcones, retranqueos, elementos estructurales, elementos ornamentales, elementos de control solar, etc. En una situación de propagación exterior del fuego estos elementos pueden actuar como deflectores en la medida que cambian la trayectoria del fuego y del flujo de calor [Yokoi 1960], [Harmanthy 1974]. Los elementos salientes constituyen uno de los factores geométricos que de forma más determinante influyen en la propagación del fuego. Su papel en relación a la trayectoria de las llamas y del flujo de calor puede ser favorable o desfavorable en función de su configuración, tamaño o ubicación.

Aunque la influencia de los elementos salientes se asocia principalmente a la propagación del fuego, también en algunas situaciones puede existir una correlación entre el tamaño del elemento y el nivel de disipación térmica del incendio en el recinto de origen, lo cual puede repercutir en un incremento de las temperaturas en el interior de éste [Suzuki et al. 2001].

Tipos de elementos salientes

Este aspecto se ha analizado mediante la comparativa de tres tipos diferentes de elemento saliente (Fig. 6.9).

Alero (elemento saliente horizontal) 40 cm

Parteluces (elementos salientes verticales) 40 cm

Trama (combinación de los dos anteriores) 40 cm

Gráficos de la simulación	Figuras 6.46
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.47

Tipos de elementos salientes

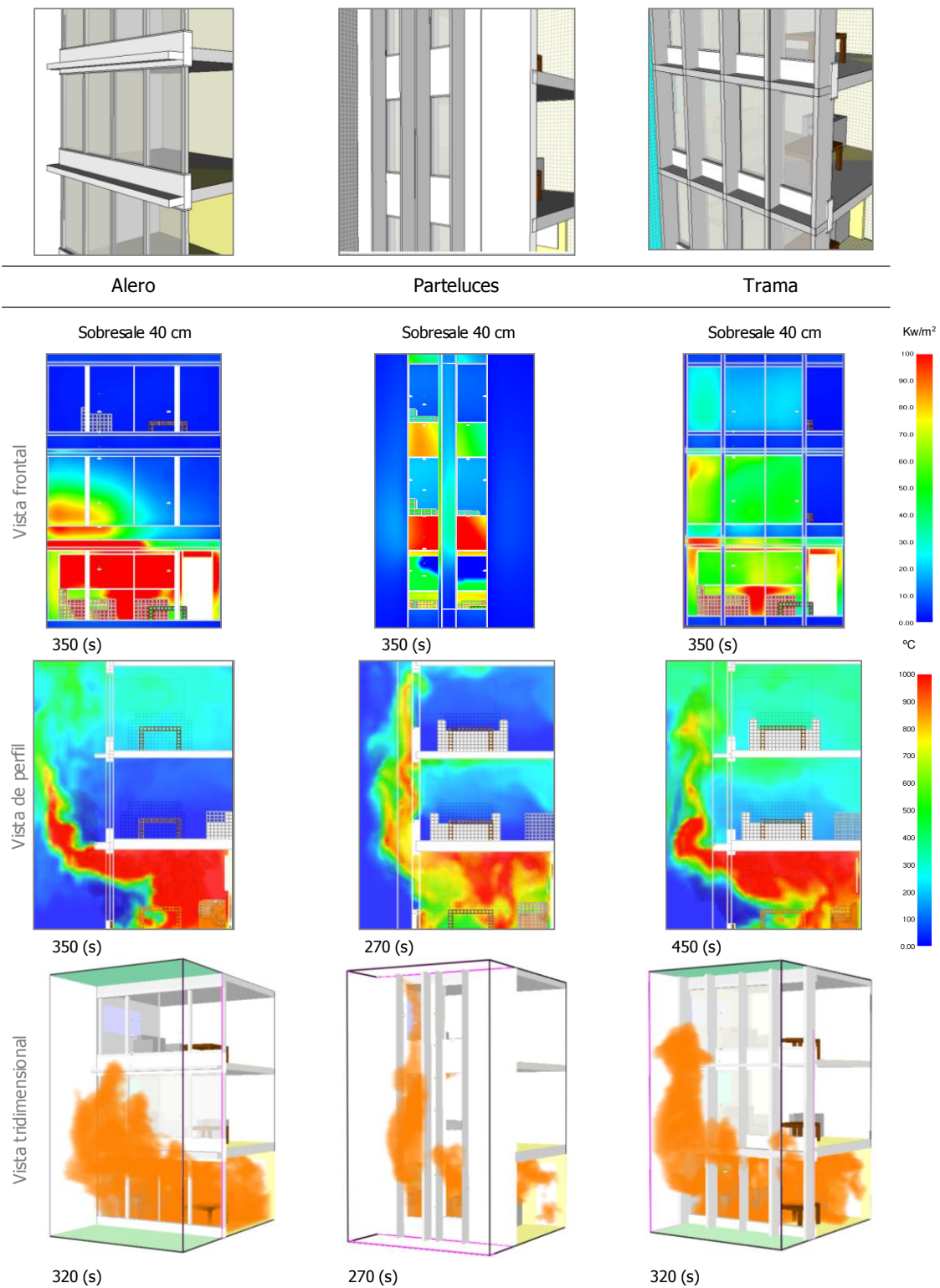


Fig. 6.46
Se aprecia un comportamiento diferenciado en la propagación del fuego según el tipo de elemento saliente.

Tipos de elementos salientes

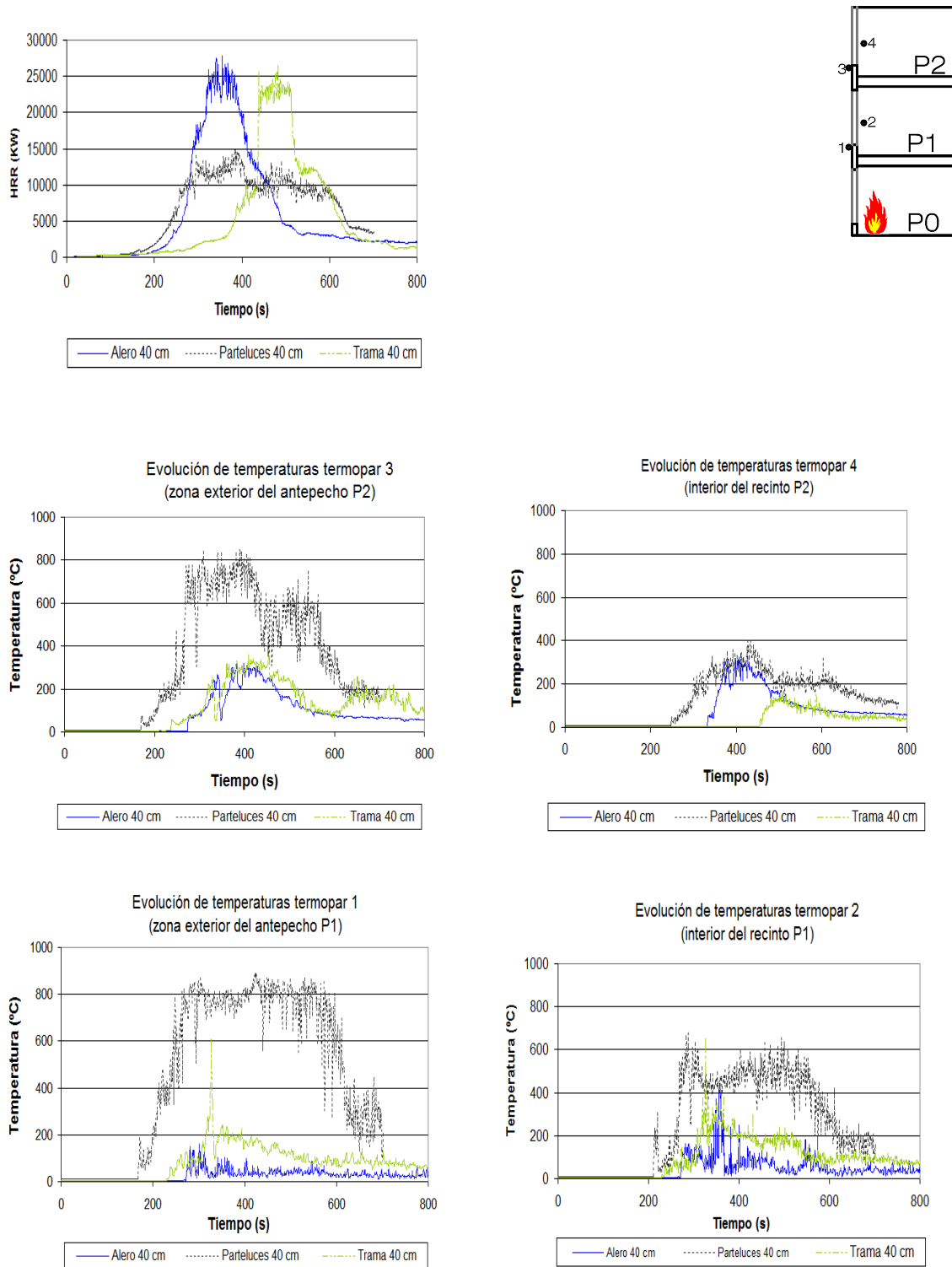


Fig. 6.47 Las curvas de temperatura hacen aún más evidente el comportamiento diferenciado en cada caso.

Se ha podido observar un comportamiento diferenciado del penacho de fuego en los tres casos, el cual viene definido principalmente por cambios en la trayectoria y la forma del penacho de fuego de acuerdo al tipo de elemento saliente y su disposición.

En los gráficos se observa que el **alero** tiende a desviar la trayectoria del penacho de fuego hacia el exterior alejándolo de la superficie de la fachada, los **parteluces** tienden a canalizarlo y concentrarlo sobre la zona que delimitan, por tanto la forma del penacho se torna alargada y ceñida a la fachada. Los elementos con los dos componentes, denominados, en este estudio, **trama**, no desvían claramente la trayectoria del penacho de fuego pero tampoco la canalizan. El efecto combinado de los elementos produce un cambio de régimen en el comportamiento del penacho, el cual se torna fluctuante e irregular. Cabría considerar que estas fluctuaciones podrían ser más acusadas en presencia de flujos de ventilación, teniendo en cuenta que las condiciones de ventilación definidas en estos escenarios corresponden a un flujo natural (ver apartado 6.4).

En las curvas comparativas (termopares 1, 2, 3 y 4) se aprecia que los picos de temperatura más altos se dan en el caso de los **parteluces**, también se puede ver que las curvas del elemento **trama** presentan altibajos bruscos, lo cual refleja el comportamiento fluctuante que se mencionó antes. El **alero** actúa principalmente como un obstáculo que limita el avance del flujo vertical de la propagación.

Las curvas comparativas de la velocidad de cesión del calor *HRR* muestran que la evolución del incendio ha sido diferente en los tres casos, esto se debe a que los tamaños de las ventanas en los tres escenarios son distintos. No obstante, reflejan consecuentemente la importancia del área efectiva de ventilación, del cual se habló en el punto anterior. Este aspecto se dejó en segundo término para dar prioridad al efecto de la configuración de los elementos salientes.

Ubicación de los aleros

Este aspecto se ha analizado mediante la comparativa de tres posiciones diferentes de un alero de 25 cm respecto a la configuración de una fachada con ventanas grandes (Fig. 6.10). Se ha elegido este tamaño de vuelo del alero por dos motivos: en primer lugar porque son recurrentes los elementos ornamentales con estas características en la fachada (friso, cornisa, alféizar, etc.) y en segundo lugar para que fuese más perceptible la incidencia del flujo de calor sobre la superficie de la fachada en las distintas situaciones.

A (en el alféizar de la ventana) 25 cm

M (en medio de la franja de separación entre plantas) 25 cm

D (en el dintel de la ventana) 25 cm

Gráficos de la simulación	Figuras 6.48
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.49

Según se observa en los gráficos (perfil de la propagación) el comportamiento del fuego es similar en los elementos ubicados en la posición **A** y **M**. Inicialmente el penacho se ciñe sobre la superficie asumiendo una forma “triangular”⁵ que se da por efecto del ángulo que forman la superficie vertical (franja) y el alero. Una vez superado el obstáculo del alero el penacho se torna fluctuante e incide de forma irregular sobre la fachada. En la ubicación **D** se aprecia una trayectoria del penacho más definida hacia el exterior y menos fluctuante que en los casos anteriores.

⁵ I. Oleszkiewicz (1990a) se refirió a la forma “triangular” que adopta el penacho de fuego al descargar sobre una superficie vertical ubicada justo arriba de la ventana (franja). El ancho máximo de la llama se supone que es dos tercios la altura de la ventana (ver apartado 4.5.2).

El efecto de los aleros como elementos capaces de reducir la incidencia de la propagación del fuego a través de la fachada, es quizás uno de los aspectos más estudiados sobre la propagación exterior del fuego. [Yokoi 1960, Harmanthy 1974, Oleszkiewicz 1991, Suzuki et al. 2001 entre otros]. En todos los estudios revisados el elemento saliente ha sido estudiado considerando solo una posición: en el dintel de la ventana. Sin embargo es muy frecuente encontrar este tipo de elementos ubicados en las posiciones propuestas en este estudio, por tal motivo se decidió incluir estas variables.

Ubicación de los aleros

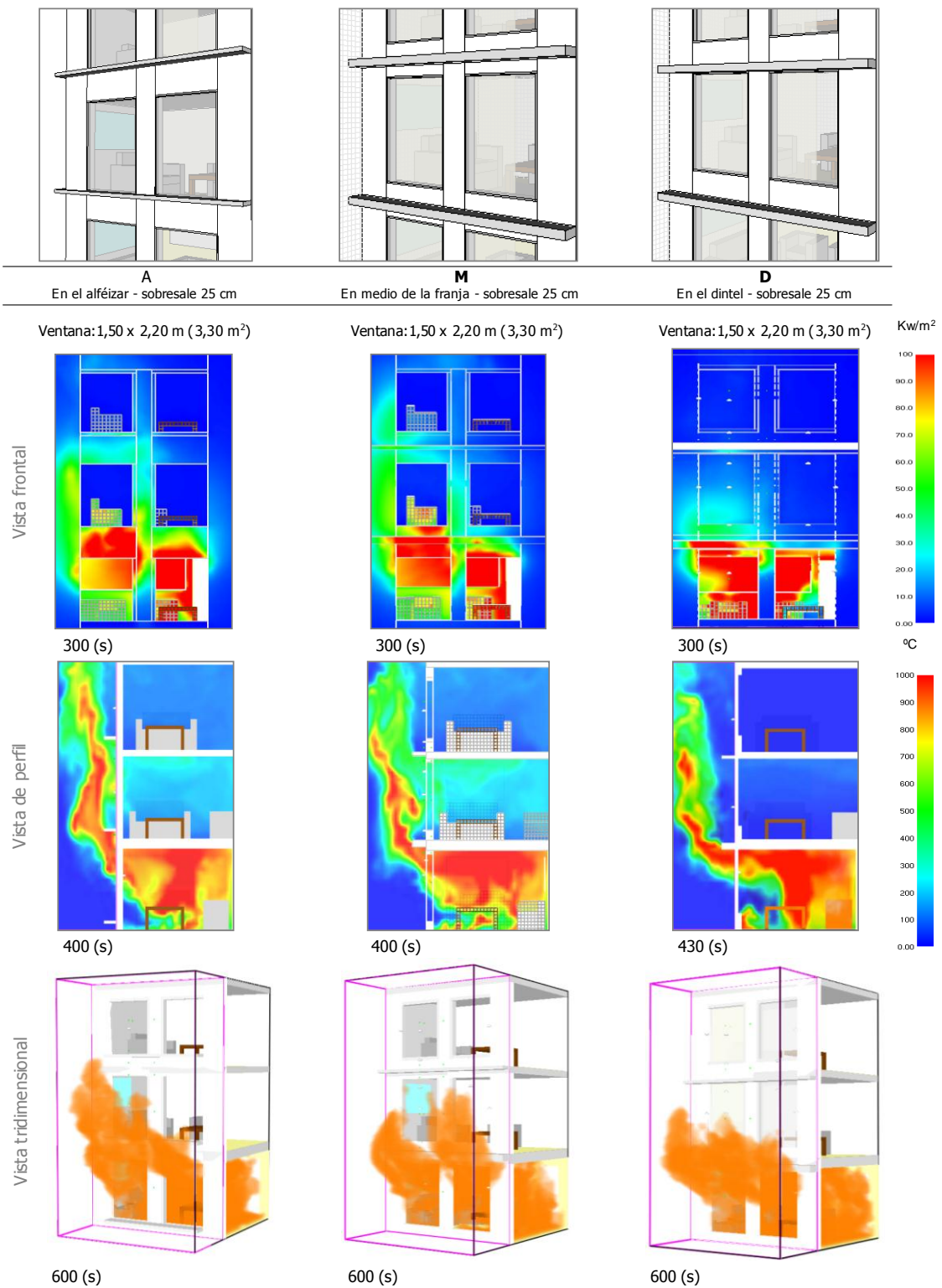


Fig. 6.48
Se aprecia una desviación más clara del penacho del fuego en la posición D.

Ubicación de los aleros

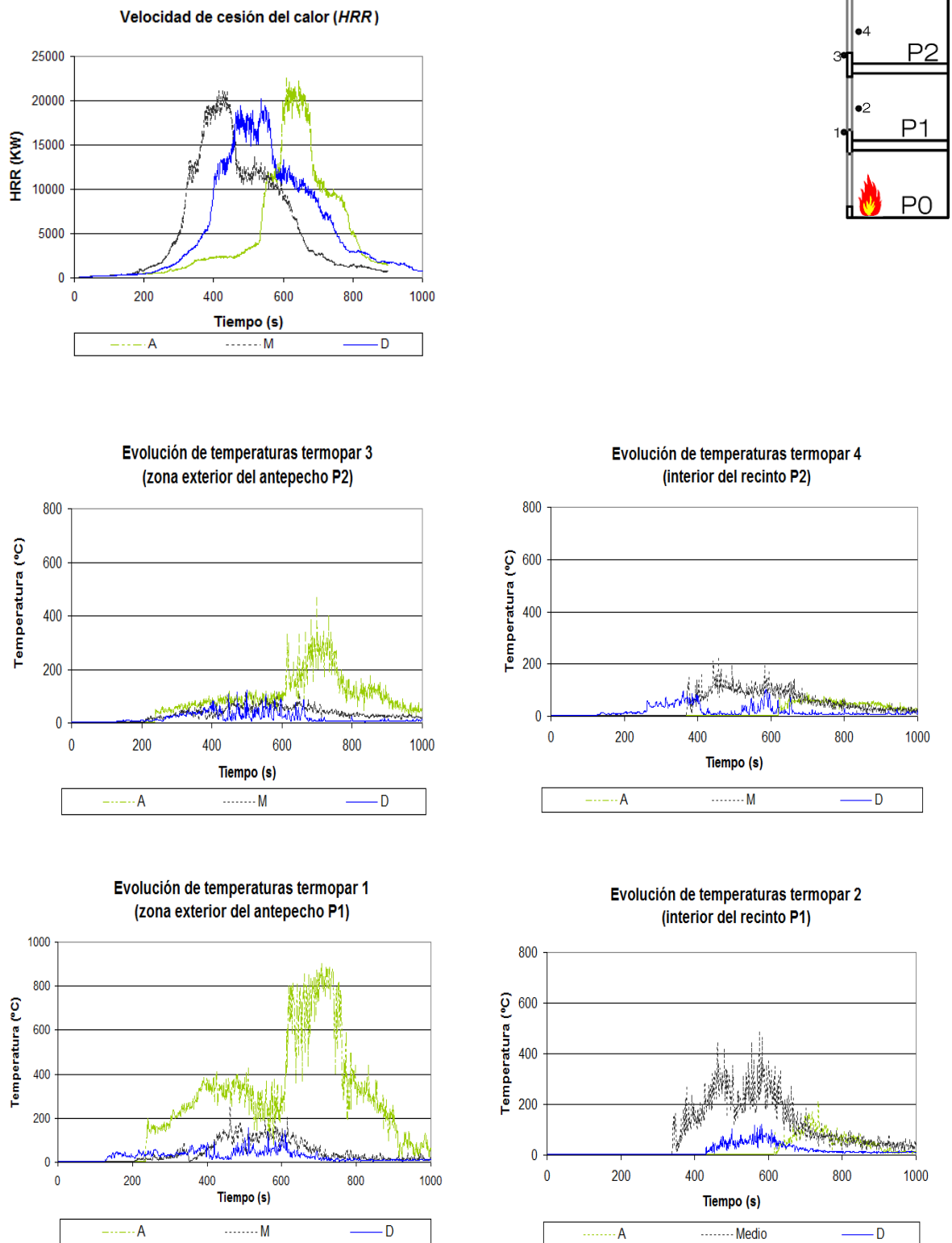


Fig. 6.49 De acuerdo a las curvas de temperatura se podría afirmar que la posición A es la más desfavorable.

Los gráficos que muestran la incidencia del flujo de calor sobre la fachada (vista frontal) y las curvas de temperatura aportan más detalles al respecto. Se puede considerar que el alero ubicado en **A** es la ubicación más desfavorable. La trayectoria de las llamas es desviada por el alero de forma leve y tardía permitiendo la acumulación de flujo de calor sobre la superficie, en especial sobre la P1 en donde se aprecia un incremento importante de las temperaturas (termopar 1 y 3). El alero ubicado en **M** desvía de forma más adecuada el penacho de fuego respecto al anterior, sin embargo éste presenta mayor inestabilidad y fluctuaciones, lo cual puede repercutir en una mayor probabilidad de penetración a las plantas superiores (termopares 2 y 4). El alero ubicado en **D** es el que presenta el comportamiento más favorable, de forma clara desvía el penacho hacia el exterior y evita la incidencia directa de las llamas sobre la fachada, no obstante el flujo de calor radiado sobre la fachada podría continuar siendo un riesgo a considerar, debido a que el tamaño de vuelo del alero no brinda suficiente protección, según se verá a continuación.

Tamaño de los aleros

Este aspecto se ha analizado mediante la comparativa de seis tamaños de vuelo de los aleros, se ha tenido en cuenta que el tamaño del elemento saliente y la franja de separación entre plantas sumen 1 m de acuerdo a lo estipulado en el documento básico SI del CTE [4], tal como se indica en la tabla siguiente. Se ha querido partir en todos los casos de la situación de propagación más desfavorable, por ello se han implementado los elementos a evaluar en escenarios con ventanas corridas (según la clasificación considerada para evaluar el tamaño de las ventanas) (Fig. 6.11).

Franja	C	Cm	85	75	60	40	0	0
Alero	D	Cm	15	25	40	60	80	150

Gráficos de la simulación	Figuras 6.50 Figuras 6.52
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.51 Figuras 6.53

Tamaño de los aleros

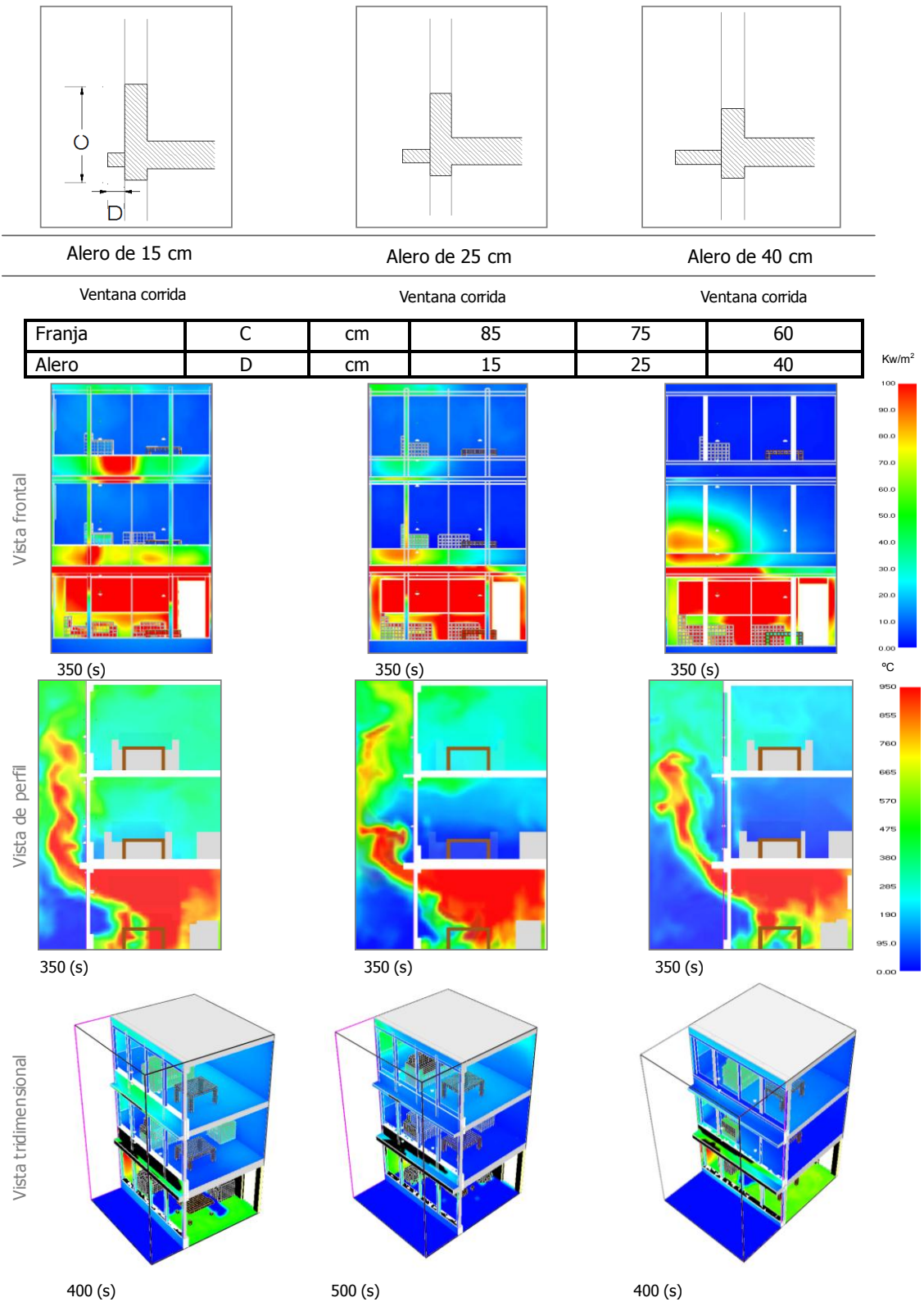
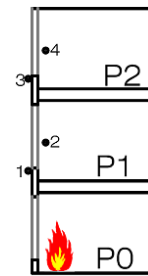
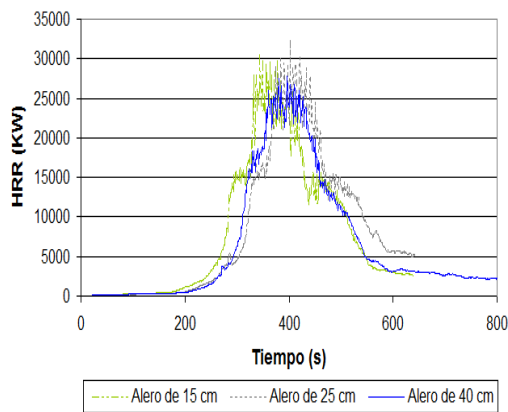
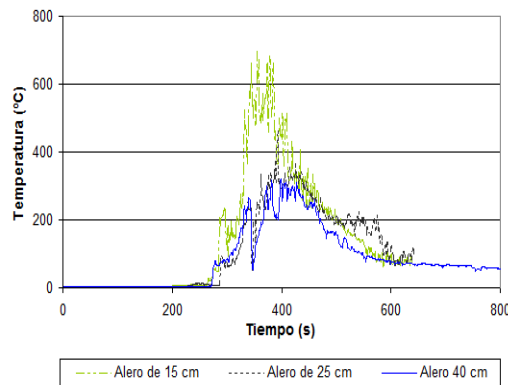


Fig. 6.50 Se aprecia que aun un pequeño alero de 15 cm tiene un efecto en la trayectoria del penacho de fuego, la desvía ligeramente.

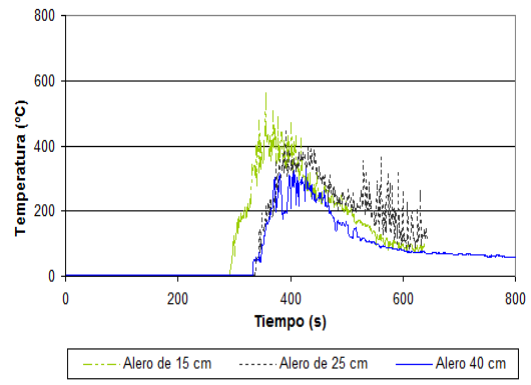
Tamaño de los aleros



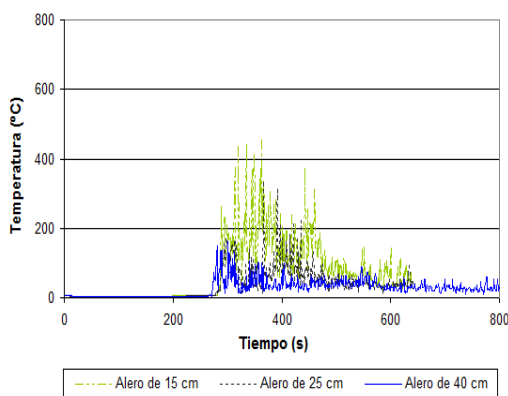
Evolución de temperaturas termopar 3 (zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 4 (interior del recinto P2)



Evolución de temperaturas termopar 1 (zona exterior del antepecho P1)



Evolución de temperaturas termopar 2 (interior del recinto P1)

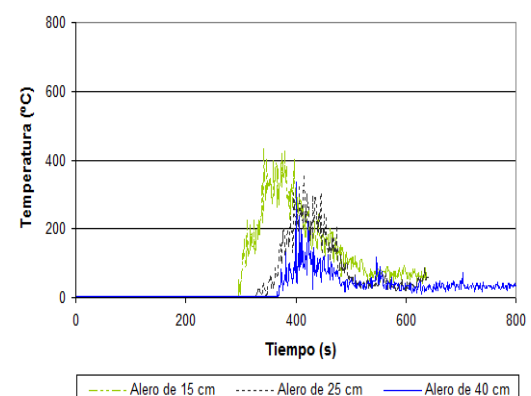


Fig. 6.51

Aunque los tres aleros considerados desvían la trayectoria del fuego, el nivel de protección que aportan es insuficiente debido a su tamaño.

Tamaño de los aleros

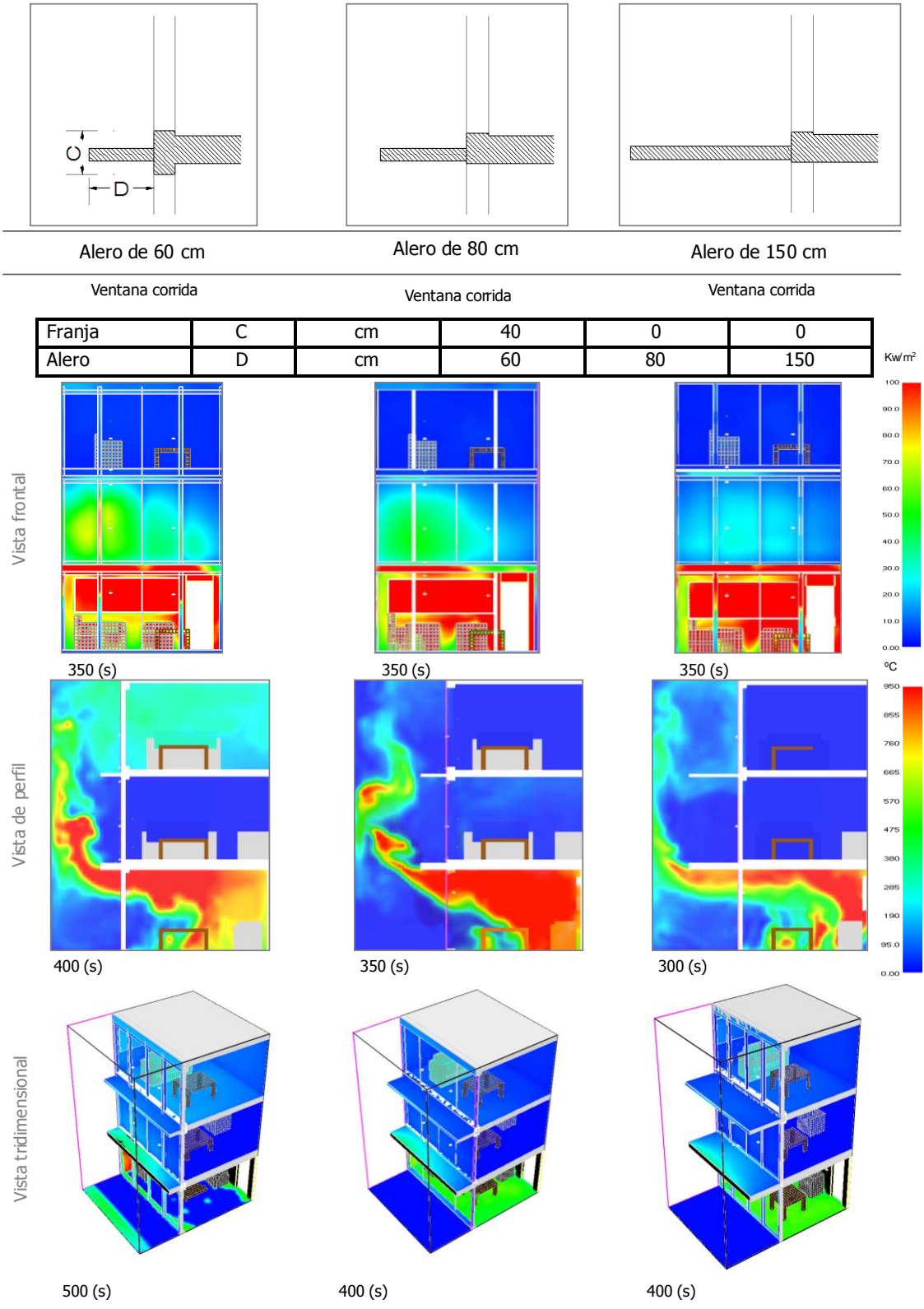
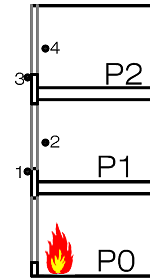
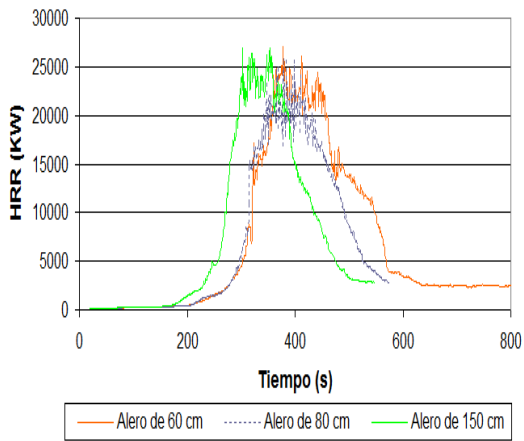
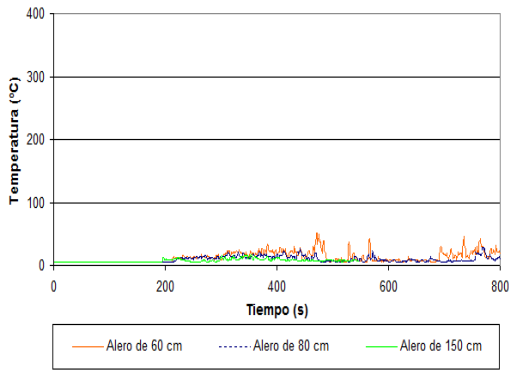


Fig. 6.52 El alero desvía la trayectoria del penacho de fuego con más efectividad cuanto mayor es su tamaño de vuelo.

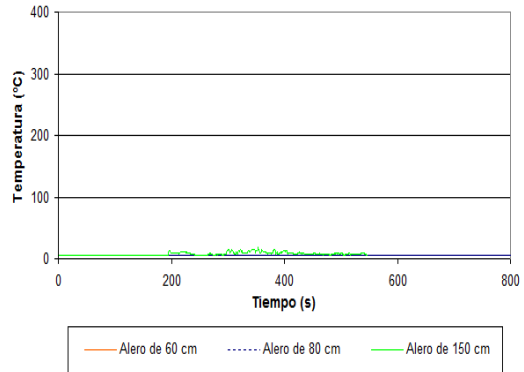
Tamaño de los aleros



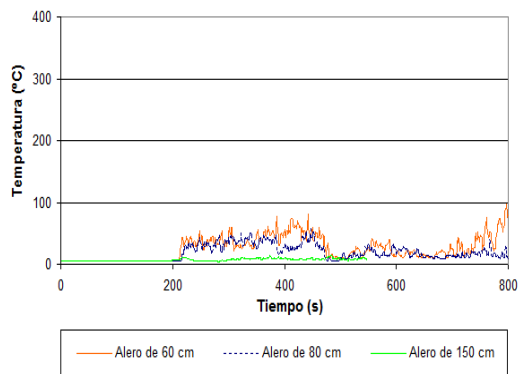
Evolución de temperaturas termopar 3 (zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 4 (parte exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 1 (zona exterior del antepecho P1)



Evolución de temperaturas termopar 2 (interior del recinto P1)

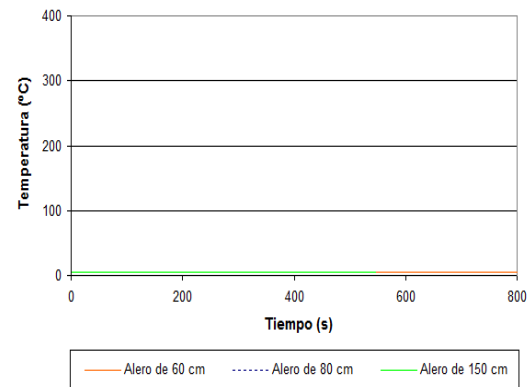


Fig. 6.53 Los aleros de 60 cm o más desvían con mayor claridad el flujo de calor y son un obstáculo para la propagación vertical del fuego.

Los aleros cumplen un papel muy importante en lo referente al control de la propagación exterior del fuego y el nivel de exposición de las fachadas al flujo de calor. El nivel de protección que aporta la presencia de este elemento viene definido principalmente por su tamaño, sin embargo, no hay que perder de vista que las características de la propagación también dependen de factores como: las condiciones del recinto de origen del incendio y su contenido combustible, las características del revestimiento de la fachada y la geometría de las ventanas.

En los gráficos (perfil de la propagación) se pueden apreciar las diferencias que se dan en la trayectoria y forma del penacho de fuego según el tamaño del alero. Cuanto mayor es el tamaño del alero más inclinada y alejada de la fachada es la trayectoria del penacho de fuego. Por lo tanto, resulta evidente que cuanto más grande es el alero la incidencia del flujo de calor sobre la superficie de la fachada es menor. Los resultados de las curvas de temperatura también reflejan esta tendencia; los termopares 1 y 3 (zona exterior del antepecho P1 y P2) en los casos de aleros de **15**, **25** y **40** cm registran temperaturas que llegan hasta los 600°C. Pero en los casos de los aleros de **60**, **80** y **150** cm las temperaturas decrecen significativamente, estas no superan los 50°C.

Los aleros de **15**, **25** y **40** cm desvían ligeramente la trayectoria de las llamas hacia el exterior, por tanto el flujo de calor transferido por el penacho permanece muy cerca de la fachada. El penacho presenta una forma curvilínea y el frente de las llamas retorna sobre la superficie con movimientos fluctuantes. Debido a esto no se descarta la posibilidad de propagación del fuego a las plantas superiores en los tres casos. En los aleros de **60**, **80** y **150** cm la trayectoria del penacho es desviada con más contundencia hacia el exterior, en especial en los dos últimos casos, en los cuales la forma del penacho es claramente condicionada por la forma del alero hasta adoptar una forma predominantemente horizontal con el alero de **150** cm.

Los elementos salientes a partir de **60** cm de vuelo desvían con efectividad la trayectoria de las llamas, no obstante, el alero con un vuelo a partir de **80** cm, adicionalmente proporciona un aceptable nivel de protección frente al flujo de calor emitido por el penacho de fuego, lo cual puede reducir la probabilidad de rotura de las ventanas y penetración del fuego a las plantas superiores.

Otra situación que se ha podido observar relacionada con el tamaño de los aleros es el grado de fluctuación del penacho de fuego. Los elementos de poco vuelo suponen un

obstáculo leve que genera perturbaciones en el flujo de calor y por ello su régimen se torna más fluctuante respecto a los casos con aleros de mayor tamaño. Esta situación se puede ver tanto en las curvas de temperatura como en los gráficos en los cuales se aprecia un perfil del flujo de calor con mayor cantidad de vórtices⁶.

El tamaño del alero eventualmente podría contribuir al aumento de la temperatura en el interior del recinto debido a que impide una correcta disipación térmica [Suzuki et al. 2000], sin embargo, en los casos planteados en este estudio el tamaño de las ventanas facilita la evacuación constante del flujo de calor y entrada de aire fresco.

Disposiciones de la normativa relacionadas con la geometría de las fachadas

Tal como se ha visto en la sección 3.5.1 las medidas estipuladas por el CTE en referencia a la propagación exterior del fuego se perciben como escasas, inflexibles, poco claras y de difícil implementación en algunas tipologías de fachadas. Su aplicación, desde el punto de vista del diseño de la fachada genera una configuración monótona en la cual cobran un protagonismo, en ocasiones excesivo, las franjas horizontales que separan las aberturas de las ventanas de una planta a otra, independientemente de la tipología de fachada de la que se trate.

El centro de esta problemática se sitúa en el concepto de la compartimentación de los edificios que consiste en dividir el edificio en sectores de incendio capaces de retener o evitar el paso del incendio a otro sector. Este criterio constituye uno de los principios fundamentales de toda estrategia de protección contra incendios en la edificación. Dicha compartimentación ha de tener continuidad en los elementos de cerramiento de los sectores de incendio, por lo tanto, la fachada se convierte en un elemento de delimitación parcial (teniendo en cuenta las aberturas de las ventanas) del sector de incendio mediante unas franjas resistentes, las cuales deben ser al menos E1 60 y tener una altura mínima de 1 m. Dichas franjas tienen como función crear una distancia de protección entre los elementos débiles de la fachada (aberturas y zonas acristaladas). Tal como está planteada por la norma esta exigencia condiciona la configuración y el diseño de la fachada tanto en sentido vertical como horizontal.

⁶La vorticidad es un concepto matemático usado en dinámica de fluidos que se puede relacionar con la cantidad de circulación o rotación de un fluido.

Separación horizontal

Este aspecto se ha analizado teniendo en cuenta lo dispuesto en el CTE [3] en referencia a las distancias de separación para limitar la propagación horizontal del fuego. En particular se ha tenido en cuenta la situación en la cual las partes de la fachada que no son al menos EI 60 (zonas acristaladas) están ubicadas en recintos que se encuentran a 180°, es decir, uno al lado del otro. En este supuesto la normativa determina que la distancia debe ser de 50 cm. (Fig. 6.12).

Se han considerado tres casos (prueba 1, 2 y 3) en los que se combinan distintas condiciones que influyen en el comportamiento del penacho de fuego que descarga desde las ventanas del incendio. En la tabla siguiente se describen las características de cada caso.

Tabla 6.14 Características de los casos evaluados

Prueba	Tipo de escenario (ver sección 6.4)	Forma de las ventanas	Tamaño de las ventanas	Tipo de fachada
1	Básico 2	PAV (proporción alargada vertical)	0,90 x 1,80 m (2,25 m ²)	FOC (Fachada opaca convencional)
2	Básico 2	Cuadrada	1,60 x 1,60 m (2,56 m ²)	FOV (Fachada opaca ventilada)
3	Básico 2 (con incremento de la carga de fuego)	PAH (proporción alargada horizontal)	2,30 x 1,70 m (3,91 m ²)	FOC (Fachada opaca convencional)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.54
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.55

Los resultados obtenidos muestran que en ninguna de las situaciones consideradas ocurre la propagación horizontal del fuego. En los gráficos de la simulación (perfil de la propagación) se puede apreciar que el tamaño de las ventanas y el aumento de la carga térmica (*pruebas 2 y 3*) repercuten en la propagación vertical del fuego pero no modifican el alcance horizontal del flujo de calor sobre la fachada (vista frontal). En la *prueba 2* se observa que la propagación vertical del fuego ocurre tanto a través las ventanas como a través de la cámara ventilada, sin embargo no hay propagación horizontal en ninguno de los casos.

Separación horizontal

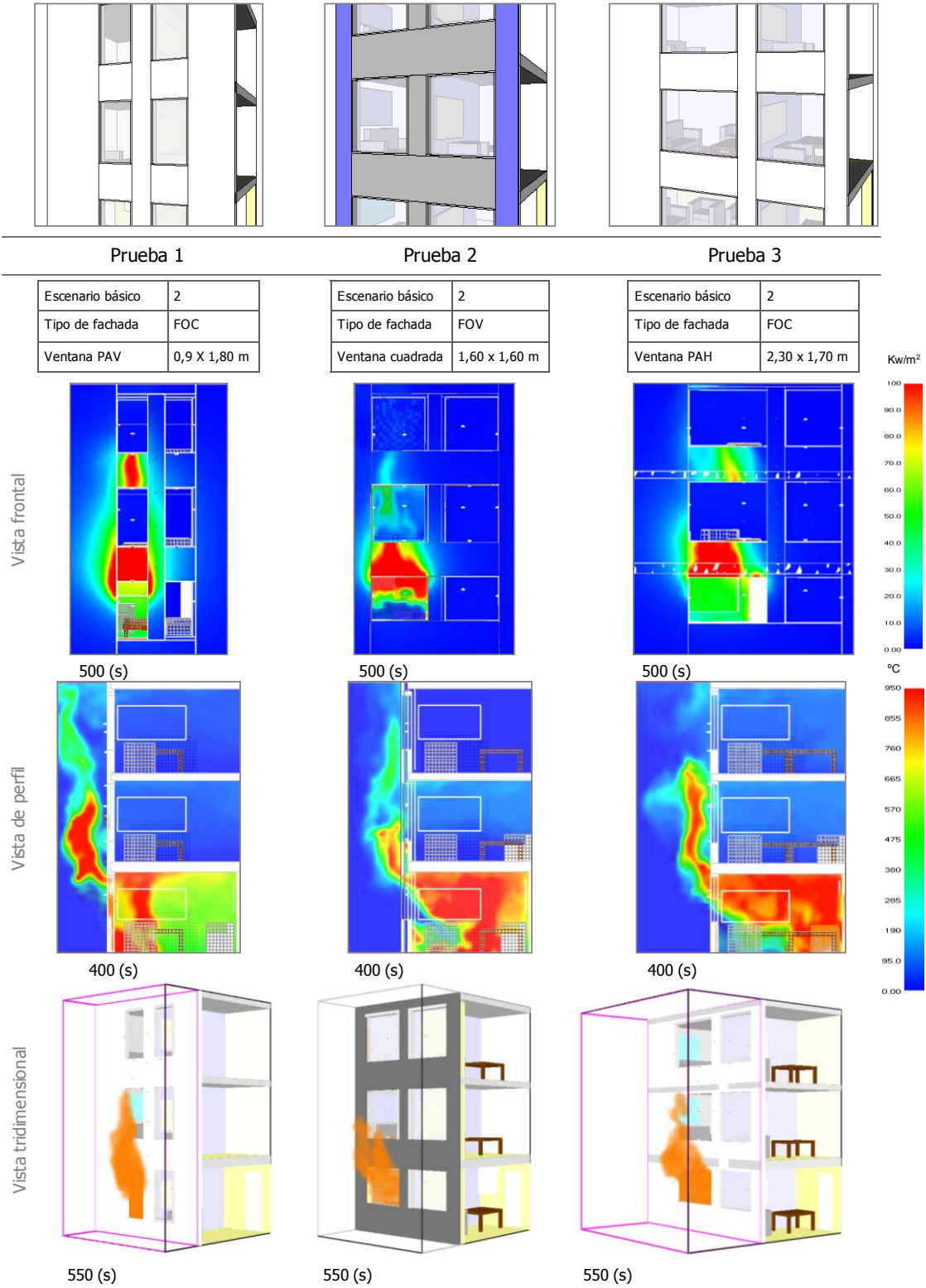


Fig. 6.54
En ninguna de las situaciones planteadas ocurre la propagación horizontal del fuego.

Separación horizontal

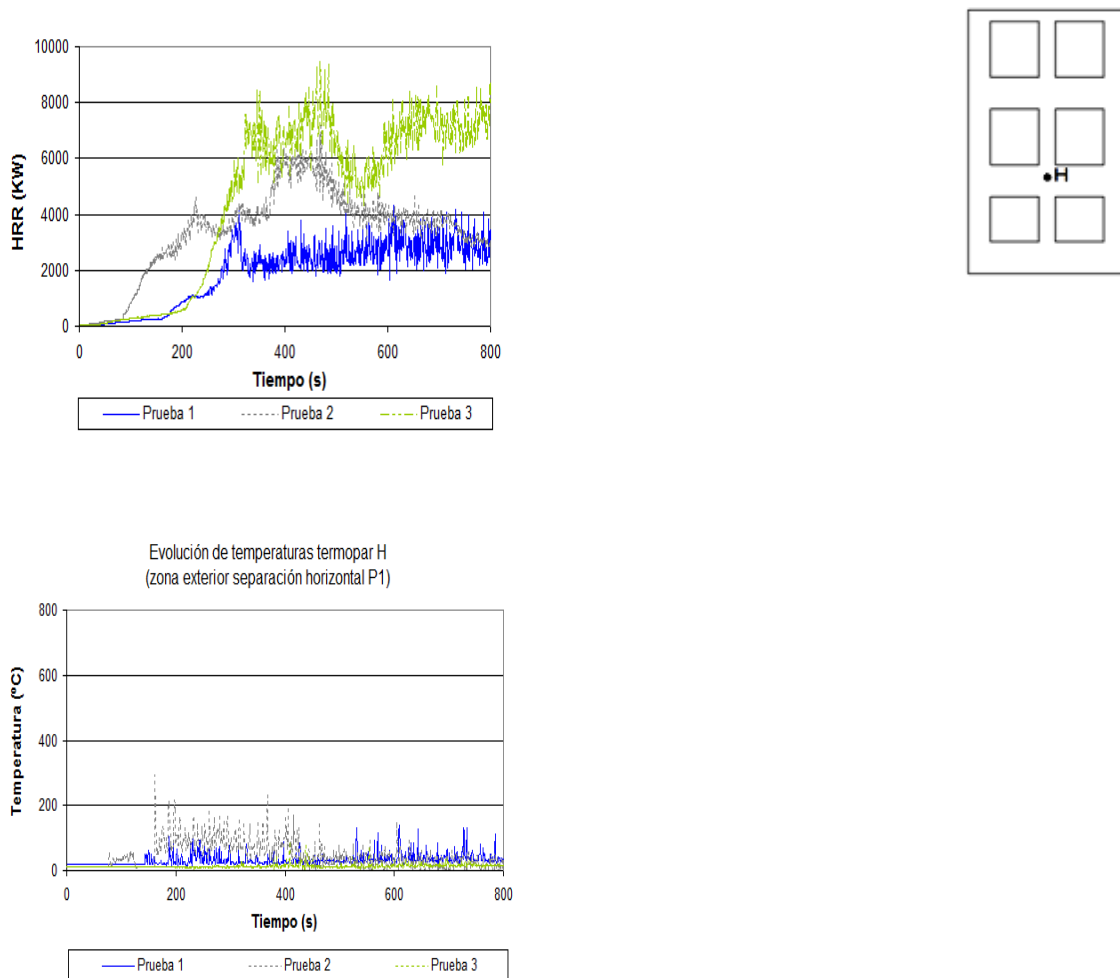


Fig. 6.55
Se aprecia un incremento poco significativo de las temperaturas sobre la superficie de separación horizontal de las ventanas.

Los resultados de las simulaciones llevan a considerar que la distancia horizontal estipulada por la normativa es adecuada y suficiente. A priori se pensó que 50 cm podría ser una distancia escasa para evitar la propagación horizontal del fuego, sin embargo, de acuerdo a lo observado en las simulaciones parece ser una distancia efectiva. La propagación exterior del fuego es un fenómeno altamente convectivo y por tanto su naturaleza predominante es ascendente; una propagación horizontal podría ocurrir eventualmente por la contribución de materiales combustibles en el revestimiento de la fachada o por influencia de factores atmosféricos muy específicos.

Separación vertical

Este aspecto se ha analizado considerando la medida estipulada por CTE DB SI 2 [4] para limitar la propagación vertical del fuego de una planta a otra, la cual consiste en interponer una franja de separación de 1 m (mínimo) con integridad y aislamiento térmico de al menos EI 60 (Fig. 6.13).

Gráficos de la simulación	
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.56 Figuras 6.57

Las comprobaciones en referencia a esta disposición están encaminadas a evaluar la situación a partir de dos apreciaciones:

1. La franja de 1 m es una medida de protección generalizada, la cual ha de ser implementada en todos los tipos de fachadas sin considerar el sistema constructivo o configuración. La normativa no hace referencia alguna a la geometría de las ventanas.
2. La franja puede ser compensada con un elemento saliente, sin importar en qué proporción se realice, siempre que la suma de los dos elementos sea 1 m.

Las consideraciones sobre el primer aspecto mencionado se apoyan en los análisis dedicados al tamaño de las ventanas, pues tal como se ha advertido el comportamiento del fuego puede cambiar considerablemente en función de este factor (Fig. 6.42 y Fig. 6.43). Se puede considerar que la efectividad de la franja de 1 m como elemento que limita la propagación del fuego a las plantas superiores está supeditada en gran medida al tamaño de las ventanas por las que emerge el penacho hacia el exterior.

En fachadas cuyas ventanas tienen un área de ventilación efectiva por debajo de los 3 m², es decir aquellas que a efectos de este estudio se han denominado ventanas tipo, la franja de 1 m se podría considerar una medida válida como atenuante de la propagación del fuego. Sin embargo en fachadas con ventanas grandes o ventanas corridas podría pasar a ser un elemento de protección insuficiente.

Separación vertical

Comparativa de los aleros de 15, 25 y 40 cm con la franja de 1 m.

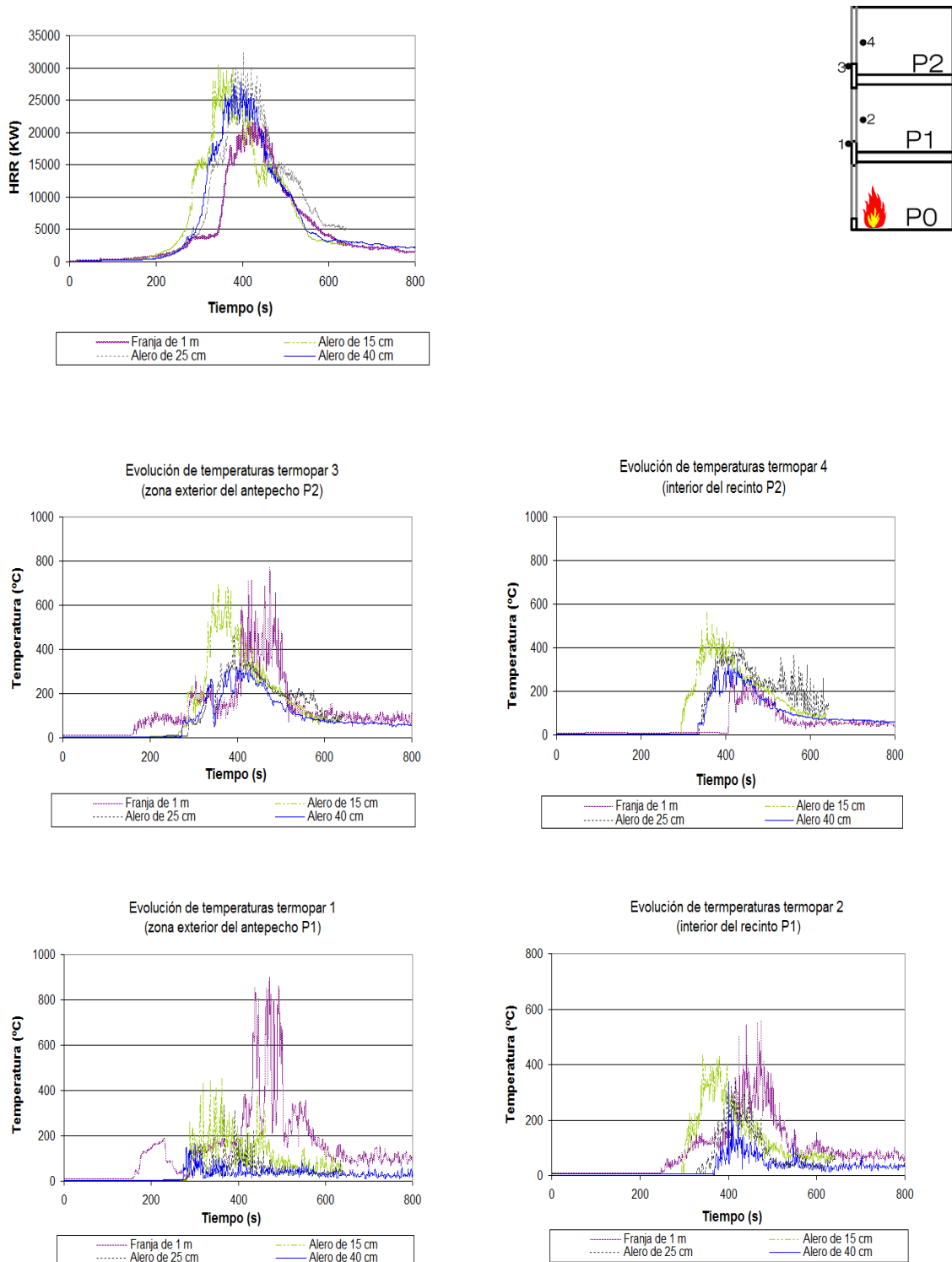


Fig. 6.56

Se aprecia que aun los aleros de poco tamaño de vuelo, como son los de 25 y 40 cm pueden aportar un nivel de protección mayor que la franja de 1 m.

Separación vertical

Comparativa de los aleros de 60, 80 y 150 cm con la franja de 1 m.

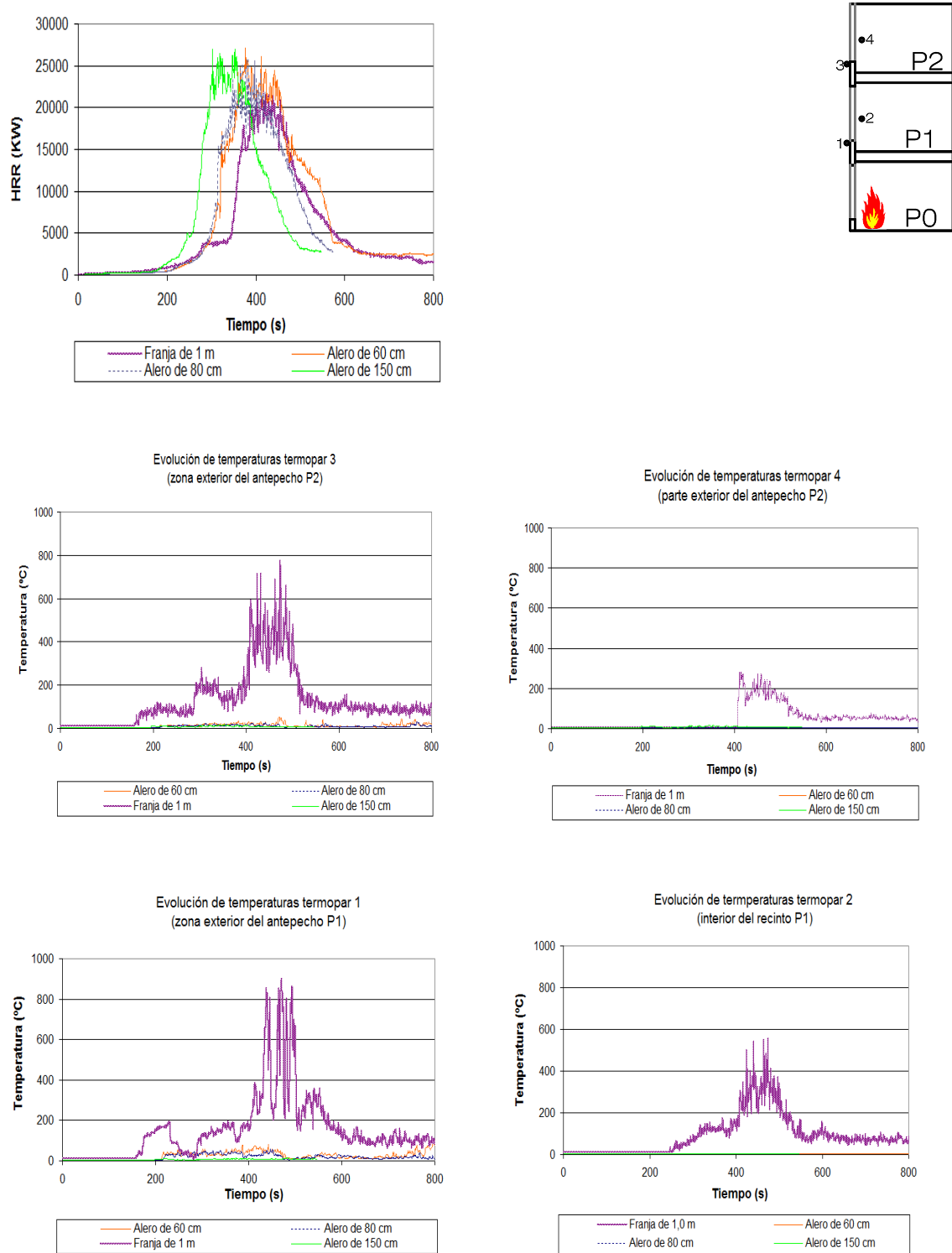


Fig. 6.57
En definitiva, la franja ofrece un nivel de protección muy inferior al que se consigue mediante un alero.

Las consideraciones relacionadas con el segundo aspecto se apoyan en las curvas comparativas de temperatura que muestran la incidencia del flujo de calor sobre la fachada con los aleros de **15, 25 y 40** cm respecto a la **franja de 1 m** (Fig. 6.56).

A juzgar por las temperaturas registradas, los aleros de poco tamaño de vuelo como son los de **25 y 40** cm aportan un nivel de protección mayor respecto al aportado por la franja de 1 m. sin embargo este nivel de protección puede ser insuficiente según las temperaturas que se aprecian sobre la superficie de la fachada (termopar 1). Según se ha explicado en el análisis anterior (tamaño de los aleros) los aleros con 80 cm de vuelo o más pueden aportar un nivel de protección aceptable.

Con esta especificación en la medida estipulada la normativa sugiere que la franja y el alero tienen un comportamiento equivalente frente a la propagación del fuego sin embargo, de acuerdo a lo observado en las pruebas en uno y otro caso podemos afirmar que sus papeles son considerablemente diferentes⁷.

⁷I. Oleszkiewicz (1991) en sus estudios acerca de la influencia de los elementos salientes en la propagación del fuego concluyó que la franja de 1 m ofrece una protección del 50% en relación a un alero de la misma dimensión. Para conseguir que una franja alcance una protección equivalente a la ofrecida por un alero de 1 m, la dimensión de la franja daría lugar a un tamaño de ventana casi impracticable.

Los estudios realizados por Yokoi (1960) son considerados la base científica que dio origen a la implementación de la franja de separación entre plantas, la cual en la actualidad forma parte de distintas normativas, incluido el CTE. No obstante Yokoi también hizo énfasis en el impacto que los factores geométricos pueden causar sobre la trayectoria y tamaño del penacho de fuego. Por tanto el problema ha sido que las referencias en este sentido no han sido tomadas en consideración por las normativas.

Ubicación de las franjas respecto a los forjados

Como se ha indicado con anterioridad, los aspectos analizados en torno al factor geométrico son de carácter general y por tanto son aplicables a cualquiera de las tipologías de fachada propuestas en este estudio. No obstante, el aspecto que se analiza a continuación se asocia normalmente con los sistemas de fachada de vidrio **FV** (muros cortina). La ubicación de la franja de 1 m respecto al forjado del edificio y la configuración de la fachada, forma parte de los aspectos a considerar para determinar el detalle constructivo de este punto de la edificación; el cual es considerado un punto crítico del sistema. Las principales dificultades asociadas a este punto de las **FV** se deben a la naturaleza y comportamiento dispar entre los componentes de la fachada y los del edificio, así como de la necesidad de compaginar en un mismo detalle constructivo aspectos de tipo técnico, estético y normativo (ver apartado 4.4.2).

Al margen de otras consideraciones, este análisis se centra en el efecto que causa sobre la propagación del fuego la ubicación de la franja respecto a la configuración general de la fachada. Para ello se han tomado tres posiciones distintas de la franja (Fig. 6.14).

Posición 1 (la mayor parte de la franja como antepecho)

Posición 2 (la franja repartida proporcionalmente, ubicada en medio del forjado)

Posición 3 (la mayor parte de la franja como capitalzado)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.58
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.59

Se aprecian algunas diferencias en los tres casos, las cuales vienen definidas principalmente por la trayectoria y la forma del penacho de fuego. En los gráficos de la simulación (perfil de la propagación) se puede observar que la franja en la **posición 1** no obstaculiza el paso del fuego, lo que produce una propagación más fluida en relación a los otros dos casos. La incidencia del flujo de calor sobre las dos plantas superiores es muy alta, debido a que las llamas permanecen ceñidas a la superficie sin presentar grandes variaciones en su comportamiento.

Ubicación de la franjas respecto a los forjados

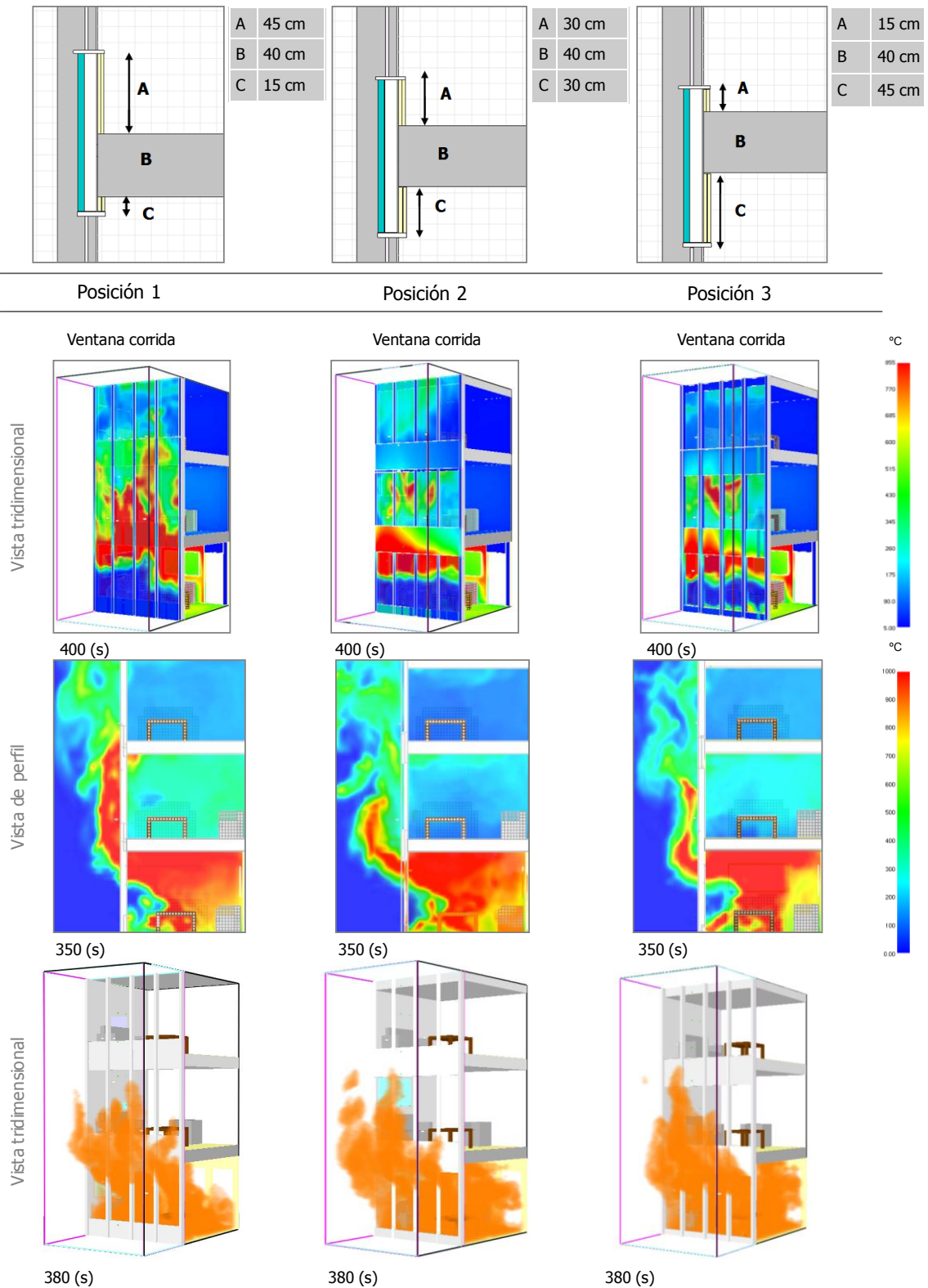


Fig. 6.58 Se puede apreciar un comportamiento diferenciado en el penacho de fuego en los tres casos.

Ubicación de la franjas respecto a los forjados

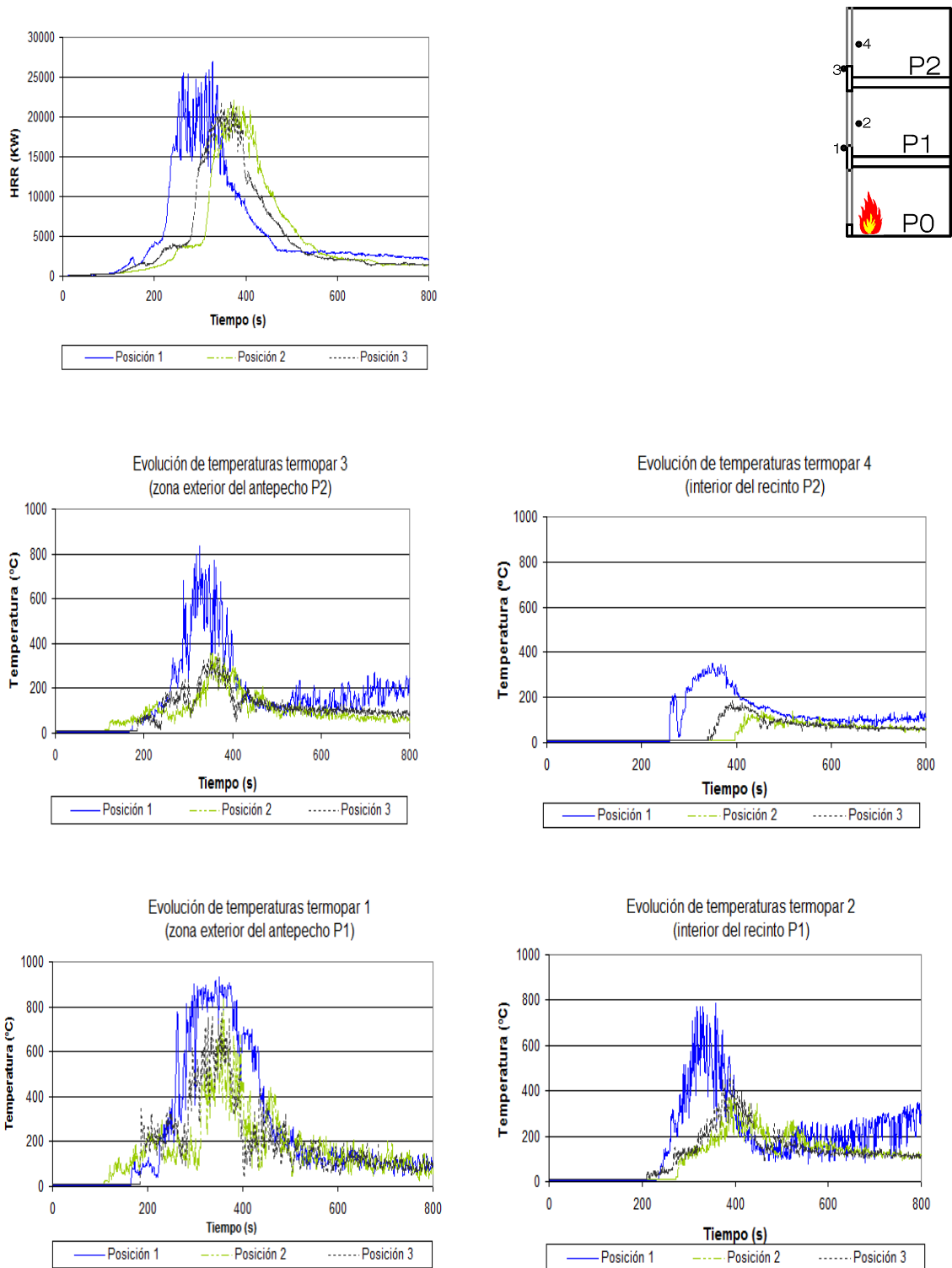


Fig. 6.59
 En la posición 1 la incidencia del flujo de calor sobre las dos plantas superiores es muy alta, debido a que las llamas permanecen ceñidas a la superficie sin presentar grandes variaciones en su comportamiento.

En las **posiciones 2 y 3** encontramos que la ubicación de la franja obstaculiza la trayectoria del penacho de fuego generando una forma curvilínea en su trayectoria. Esta forma que describe el penacho, lo desplaza levemente del plano de fachada y en su retorno incide sobre las ventanas y la superficie de la fachada especialmente sobre la P1.

Las curvas de temperatura también reflejan el comportamiento descrito anteriormente y permiten apreciar el grado de incidencia del flujo de calor en cada caso. El flujo de calor sobre la superficie de la P1 (termopar 1) en los tres casos es muy intenso, los picos de temperatura registrados rondan los 750°C. Sobre la P2 la situación es diferente, las temperaturas registradas para la **posición 1** son notablemente mayores en relación a los otros dos casos; mientras el pico de temperatura más elevado en la **posición 1** es de 800°C en las **posiciones 2 y 3** no supera los 400°C. De acuerdo a esto se podría considerar que el obstáculo generado por la franja reduce levemente el alcance de la propagación⁸.

A juzgar por las temperaturas registradas en el interior de las P1 y P2 (termopares 2 y 4) la probabilidad de propagación a las plantas superiores es muy alta, lo cual resulta lógico si se tiene en cuenta la dimensión de las ventanas y lo poco efectiva que resulta la franja de 1 m en este tipo de configuraciones de fachada.

Las curvas comparativas del *HRR* muestran una evolución del incendio similar en los tres casos, salvo por un leve repunte en la intensidad del incendio en la **posición 1**. Ello es razonable si se considera el área de ventilación efectiva, pues aunque el tamaño de las ventanas es el mismo en los tres casos, la forma en la cual fluye el aire al recinto es distinta por el cambio de configuración que produce la ubicación de la franja.

⁸ Los resultados obtenidos son afines con lo estudiado experimentalmente por Harrison & Spearpoint (2006) respecto a la dinámica de los humos. Ellos concluyeron que la presencia de obstáculos en el borde de la abertura de descarga reduce su dinámica natural. Consideraron que el efecto curvilíneo del flujo de la propagación a causa del obstáculo tiene implicaciones importantes para los recintos de las plantas superiores.

Soluciones singulares

Los dos casos que se exponen a continuación ejemplifican el uso adecuado del factor geométrico de la fachada para reducir la probabilidad de propagación exterior del fuego. Se trata de dos ejemplos de fachada de vidrio **FV** (muro cortina) con una configuración general característica de esta tipología de fachadas: grandes superficies acristaladas y franjas de 1 m como elemento de separación entre plantas de acuerdo a lo exigido por el CTE [4]. Ambas propuestas reflejan una manera coherente de resolver la franja desde la comprensión de la dinámica del fuego, el diseño de la fachada y las buenas prácticas constructivas. De esta forma se consigue un doble objetivo: por un lado cumplir con lo exigido por la normativa en relación a la protección contra el fuego, y por otro lado hacer frente a los riesgos reales asociados a la propagación del incendio en esta tipología de fachadas. Esto es especialmente relevante puesto que, como se pretende poner de manifiesto en este estudio, cumplir con las exigencias de la normativa no garantiza en todos los casos alcanzar un nivel de seguridad aceptable.

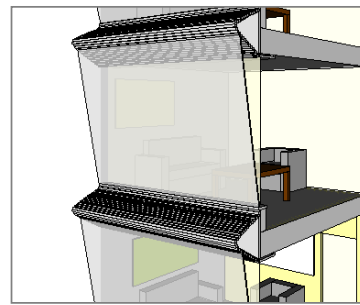
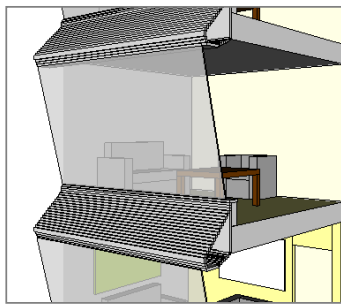
La solución en ambos ejemplos se basa en la disposición de los elementos que componen la fachada, los cuales configuran una geometría basada en planos inclinados que influyen en la trayectoria del fuego impidiendo su proyección vertical sobre la línea de fachada. El buen desempeño de la solución constructiva está definido por la disposición de los planos que componen el sistema y por los componentes y materiales que configuran los detalles constructivos, dichos detalles tienen un importante nivel de complejidad (Fig. 6.62). Cabe reiterar, que el estudio de los casos se remite a la configuración geometría de la fachada y no se centra en los detalles constructivos. Siguiendo la línea de los análisis precedentes, este análisis se centra en el efecto de la geometría de la fachada en la propagación exterior del fuego. Para ello se han implementado en los escenarios una representación simplificada de la geometría que conforman (Fig. 6.15).

Ejemplo 1 Edificio Génova (Madrid)

Ejemplo 2 Edificio Diagonal 682 (Barcelona)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.60
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.61

Soluciones singulares



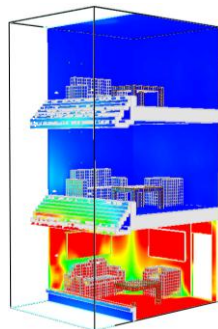
Ejemplo 1

Ejemplo 2

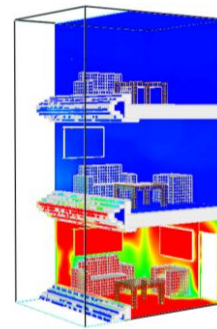
Edificio Génova (Madrid)

Edificio Diagonal 682 (Barcelona)

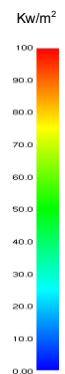
Vista tridimensional



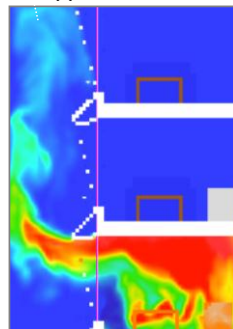
350 (s)



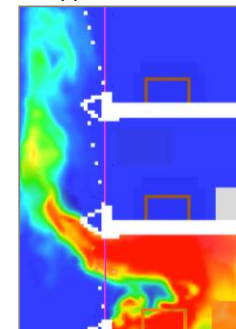
350 (s)



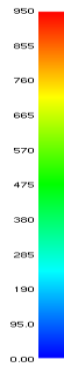
Vista de perfil



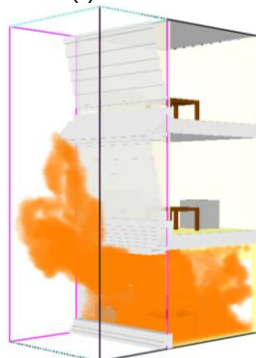
400 (s)



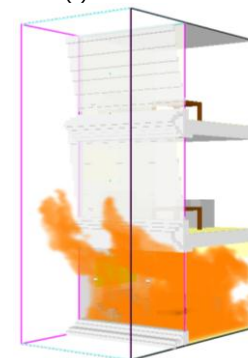
400 (s)



Vista tridimensional



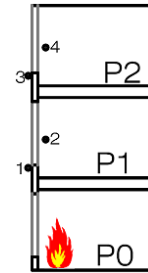
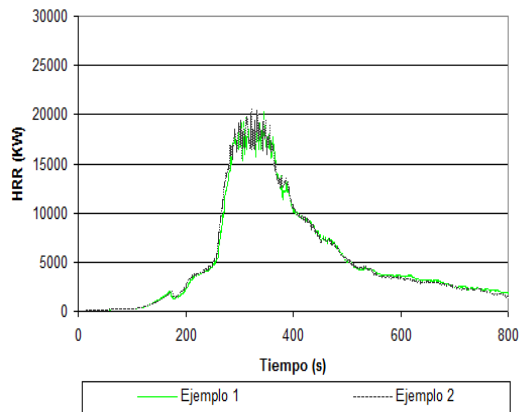
350 (s)



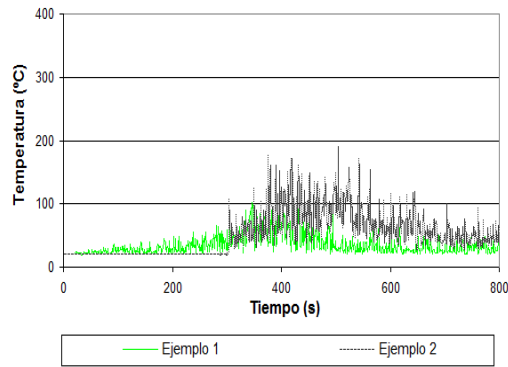
350 (s)

Fig. 6.60
Los elementos que conforman la fachada actúan como deflectores debido a su forma.

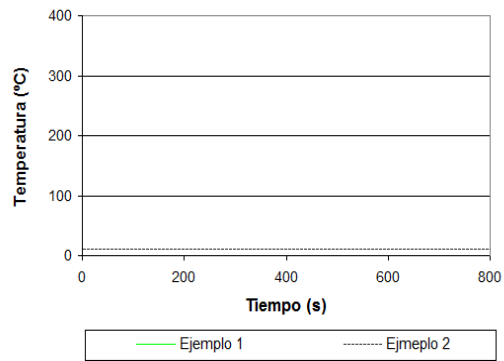
Soluciones singulares



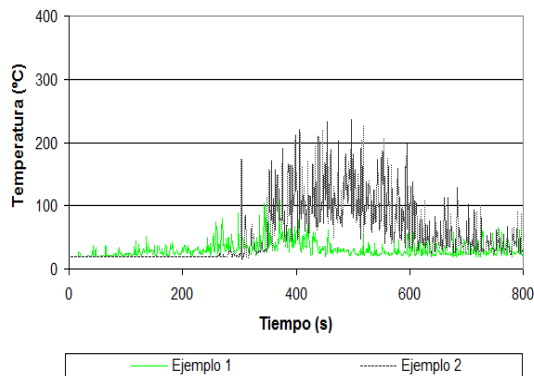
Evolución de temperaturas termopar 3 (zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 4 (interior del recinto P2)



Evolución de temperaturas termopar 1 (zona exterior del antepecho P1)



Evolución de temperaturas termopar 2 (interior del recinto P2)

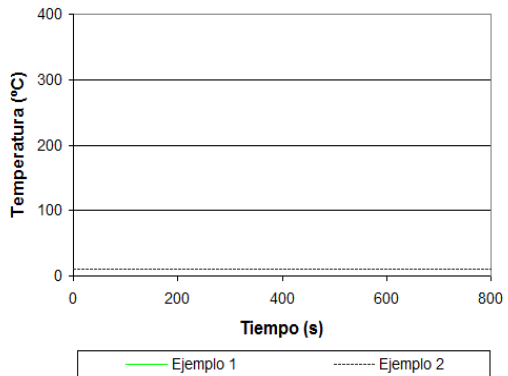


Fig. 6.61

En general, se aprecia un buen comportamiento de las dos soluciones, en especial si se observa la probabilidad de penetración a las plantas superiores. Sin embargo la geometría del ejemplo 1 aporta un mayor control del flujo de calor sobre la superficie.

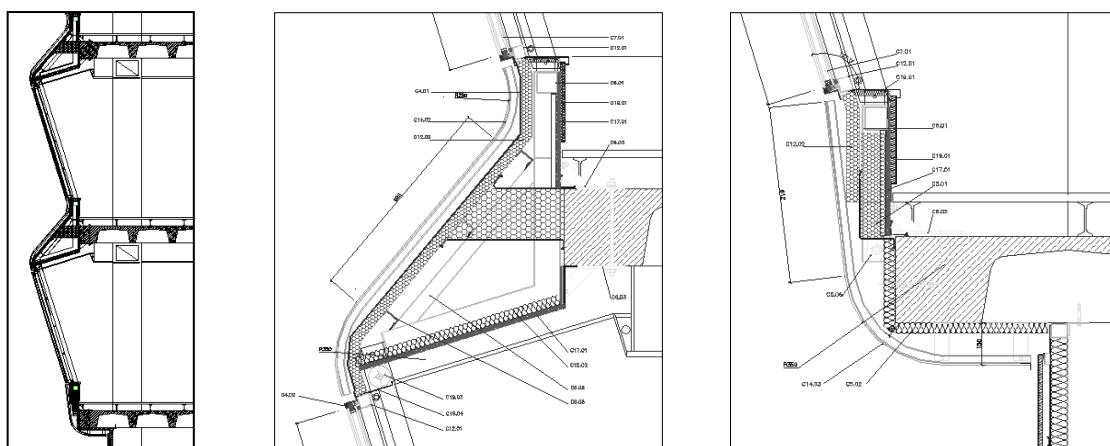


Fig. 6.62 Detalles constructivos fachada edificio Génova Madrid (ver también apartado 3.8.4)
 Información suministrada por: Arq. Xavier Ferrés.

Según se aprecia en los gráficos de la simulación (perfil de la propagación), en los dos casos la trayectoria del fuego es desviada hacia el exterior por los elementos que configuran la franja; en consecuencia, la forma del penacho de fuego se torna curvilínea e inclinada. En los dos ejemplos se observa que la geometría tiene un doble efecto sobre la propagación del fuego: por un lado, el elemento inclinado ubicado en el borde superior de la ventana desvía efectivamente el penacho de fuego hacia el exterior, y por otro, el ángulo de inclinación del plano de las ventanas hace que éstas estén desplazadas respecto de la línea de fachada, alejándolas del flujo de calor transferido por el penacho de fuego. Con ello se reduce significativamente la incidencia del flujo de calor, pudiendo incluso, evitar la rotura de los vidrios⁹. En las simulaciones realizadas no se desactivaron los elementos correspondientes a las ventanas de la P1 y P2, sin embargo esta situación también depende de otros factores, como la intensidad del incendio o las condiciones exteriores de ventilación. El nivel de protección aportado por los casos **ejemplo 1** y **ejemplo 2** se podría equiparar al comportamiento observado con aleros de 80 y 40 cm respectivamente. La mayor incidencia del flujo de calor se aprecia sobre la superficie de la P1 y P2 (termopares 1 y 3) del **ejemplo 2**, sin embargo se trata de temperaturas con picos máximos de 200°C. En general, se aprecia una baja probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores, lo cual resulta muy interesante considerando que se trata de una configuración de fachada con ventanas corridas.

⁹ S. Yokoi (Citado por Quintiere en Harmanty, 1978: 151) resaltó, como una de las prioridades del control de la propagación vertical del fuego, evitar que la exposición del flujo de calor sobre las ventanas de las plantas superiores excediera los 500°C con el fin de prevenir la rotura de los vidrios.

6.5.2 Elementos constructivos de las fachadas

Este punto se centra en los tipos de fachada ligera incluidos dentro del estudio, concretamente, en las representaciones simplificadas implementadas en los escenarios **FOV**, **FV**, **FV+BS**. Según se explicó en el apartado 4.4 las fachadas ligeras se perciben como las más vulnerables ante una situación de incendio. En general, los elementos que las constituyen tienen una débil respuesta frente al fuego y las altas temperaturas. Pese a estar conformados por elementos de materiales no combustibles (generalmente aluminio¹⁰ o acero) los montantes y travesaños que conforman la subestructura de las fachadas ligeras presentan un comportamiento termo mecánico débil y además son buenos conductores del calor, motivo por el cual a temperaturas relativamente bajas (si se consideran temperaturas típicas de un incendio cerca de 1000°C) dejan de cumplir su función estructural, lo que representa un riesgo significativo por la posibilidad de caída de segmentos de la fachada. También son puntos negativos de su comportamiento frente al fuego los delgados paneles que conforman las partes opacas del revestimiento pues permiten una fácil transmisión del calor a la subestructura de la fachada, así como las grandes superficies acristaladas, teniendo en cuenta que el vidrio común puede estallar o fundirse con facilidad¹¹. La disposición de los elementos que conforman la fachada puede ocasionalmente facilitar rutas de propagación del fuego; también los elementos mismos a causa de las altas temperaturas pueden presentar roturas, grietas o desprendimientos, los cuales podrían dar paso a la propagación de las llamas y los humos a otras estancias de la edificación. Mediante los escenarios creados se pretende observar el comportamiento del fuego en estas tipologías de fachada, considerando hipotéticos fallos ocasionados por las altas temperaturas, posibles rutas de propagación por falta de elementos de protección y peligros asociados al uso de materiales combustibles.

Los aspectos constructivos han sido evaluados desde una perspectiva geométrica, puesto que se ha considerado su disposición dentro de los sistemas que conforman. No se pretende evaluar la resistencia de los elementos estudiados o los detalles de

¹⁰ La subestructura de sistemas de muro cortina de aluminio no tienen una resistencia significativa frente al fuego. La mayoría de de muros cortina provistos con aluminio no modificado (con mayor resistencia) proveen una estabilidad e integridad de tan sólo 10 ó 20 minutos. Documento técnico, *Standard for Curtain Walling* elaborado por el *Center for window and Cladding Technology (CWCT)*.

¹¹ El vidrio es un material incombustible, tiene una capacidad aislante muy baja y por tanto una inercia térmica prácticamente nula. Comienza a reblandecer a 700°C y a los 900°C se funde. Es muy sensible al choque térmico, normalmente no soporta una diferencia de 30 ó 40°C entre su cara interior y exterior sin romperse.

las reacciones químicas que tienen lugar en los materiales, pero sí realizar consideraciones referentes al comportamiento del fuego en los sistemas estudiados y a las temperaturas a las que pueden estar expuestos los elementos constructivos en las diferentes situaciones planteadas.

Cámara ventilada y subestructura de la fachada

Los sistemas de fachada ventilada **FOV**, a grandes rasgos, consisten en una piel interior de soporte estructural y una piel exterior rígida y liviana cuya función principal es proteger la edificación ante los agentes externos. Estas dos pieles están separadas por una cámara ventilada que aloja en su interior una capa de aislamiento térmico y la subestructura metálica de sujeción de la piel exterior. La cámara ventilada tiene un papel fundamental en el correcto funcionamiento del sistema, el cual se caracteriza principalmente por aportar excelentes prestaciones higrotérmicas a la edificación. El tiro de aire natural generado por la diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la cámara asegura un adecuado desempeño de la fachada tanto en invierno como en verano. Sin embargo, este tiro de aire (efecto chimenea) que en condiciones normales ofrece grandes ventajas, en una situación de incendio puede tener consecuencias muy negativas debido a que la cámara ventilada puede convertirse en una vía rápida de propagación del fuego si no está provista de adecuadas barreras cortafuegos que impidan el paso de las llamas y los humos.

La disposición adecuada de las barreras cortafuegos es fundamental para compartimentar la cámara ventilada e impedir que ésta sirva como canal de propagación del fuego. La cámara puede compartimentarse mediante barreras cortafuegos ubicadas en cada planta del edificio a la altura de los forjados o mediante elementos cortafuego integrados al telar de las ventanas (ver apartado 4.4.3). Estas dos opciones han sido consideradas en los escenarios realizados. Para analizar algunas situaciones de riesgo asociadas a esta tipología de fachada se han considerado cinco casos que combinan diferentes condiciones en sus componentes como se explica en la Fig. 6.16 y 6.17 y se especifican en el cuadro 6.1.

Comparativa de casos 1 y 2 (cámara ventilada sin compartimentar)

Comparativa de casos 1, 2 y FOC (fachada opaca convencional)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.63
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.64 Figuras 6.65

Fachadas ventiladas FOV

Cámara ventilada no compartimentada

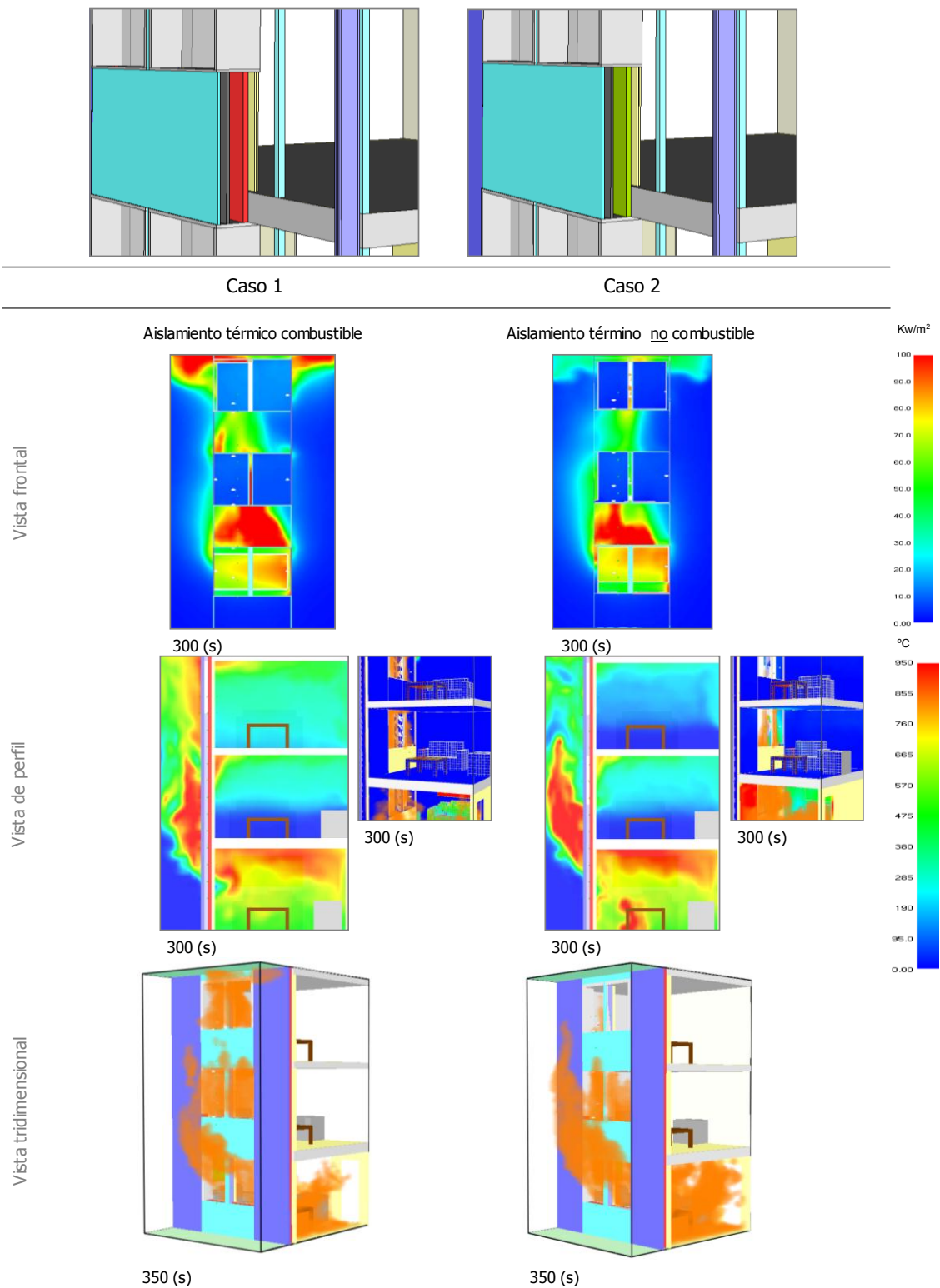


Fig. 6.63 El material combustible de aislamiento térmico genera una propagación a través de la cámara notablemente más intensa (Caso 1).

Cámara ventilada no compartimentada

Casos 1 y 2.

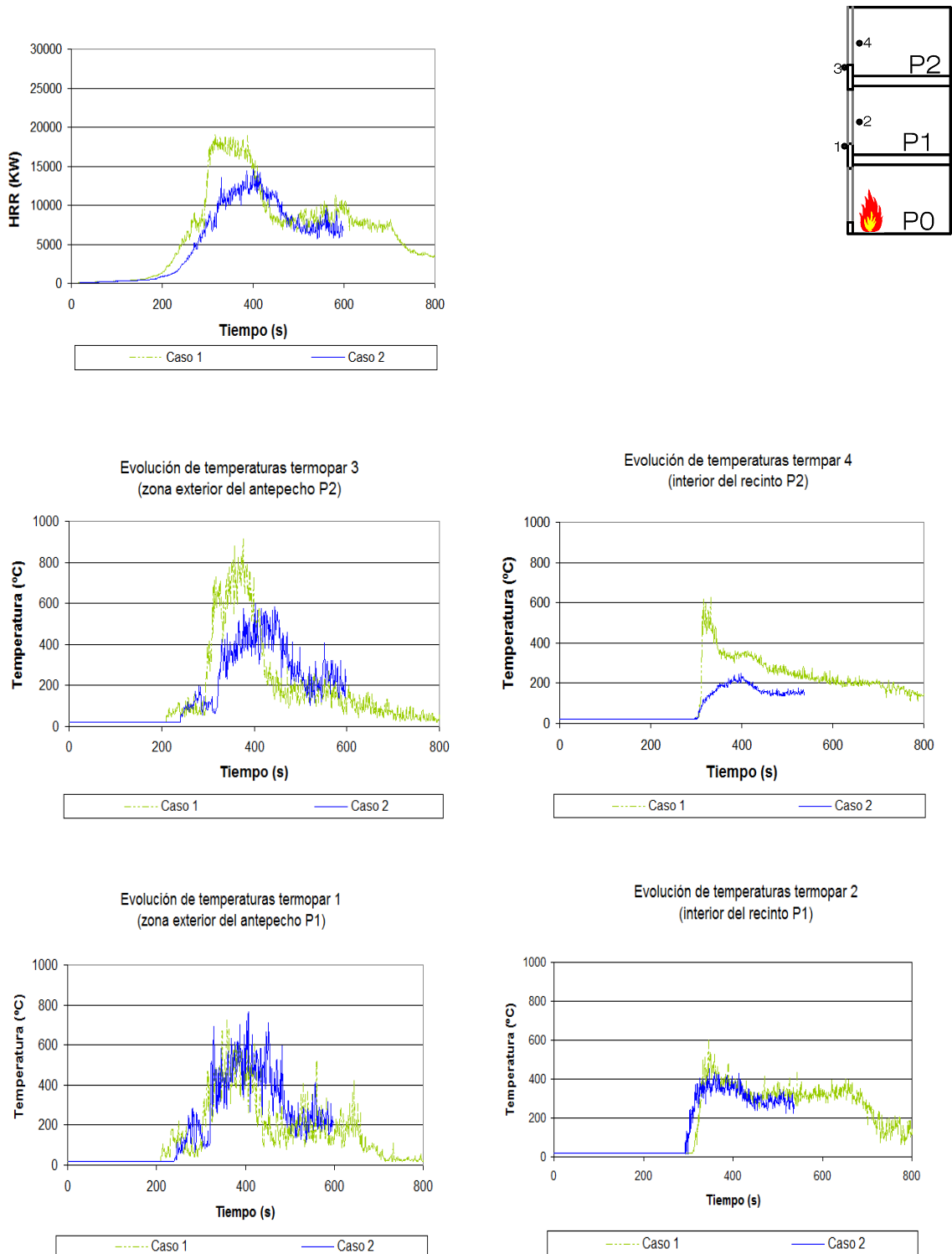


Fig. 6.64
El tiro de aire natural genera una propagación del fuego rápida a través de la cámara, independientemente de la clase de reacción de material del aislamiento térmico.

Tal como se indicó en el apartado 6.4, para observar este tipo de propagación del fuego se partió de una hipótesis basada en la poca estabilidad térmica que puede tener la carpintería de las ventanas (telar de las ventanas), teniendo en cuenta que la temperatura de fusión del aluminio ronda los 566 – 650°C y que por tanto puede comenzar a reblandecerse en torno a los 450 - 500°C. Por ello, a efectos de las simulaciones correspondientes se ha tomado como temperatura de referencia 500°C; cuando los elementos que conforman las carpinterías de las ventanas alcanzan esta temperatura se considera que fallan (son desactivados) dando paso a la propagación del fuego a través de la cámara ventilada.

De acuerdo a los resultados se puede considerar que la cámara ventilada constituye un riesgo potencial de propagación del fuego. El tiro de aire natural propicia una propagación rápida a través de la cámara, independientemente de las características del material de aislamiento térmico alojado en ésta. No obstante, si el material de aislamiento térmico es combustible, puede aportar mayor intensidad a la propagación. Esta diferencia se puede apreciar en los gráficos de la simulación de los **casos 1 y 2**. También se puede observar en las curvas de evolución de las temperaturas, en las cuales es evidente que la intensidad es mayor. Se aprecian, en distintos momentos, picos de temperatura más elevados en el **caso 1**. En este sentido también es interesante observar la curva comparativa del *HRR*. A pesar de que en ambos casos la propagación a través de la cámara ventilada ocurre de forma rápida, en el **caso 1** la intensidad del fuego es mucho mayor. Llama la atención la sobresaliente intensidad que se observa en el penacho de fuego a la altura de la P2, esta situación se puede ver favorecida por el flujo de calor que emerge a través de la cámara ventilada.

Cámara ventilada no compartimentada

Casos de cámara ventilada no compartimentada comparados con tipología **FOC**

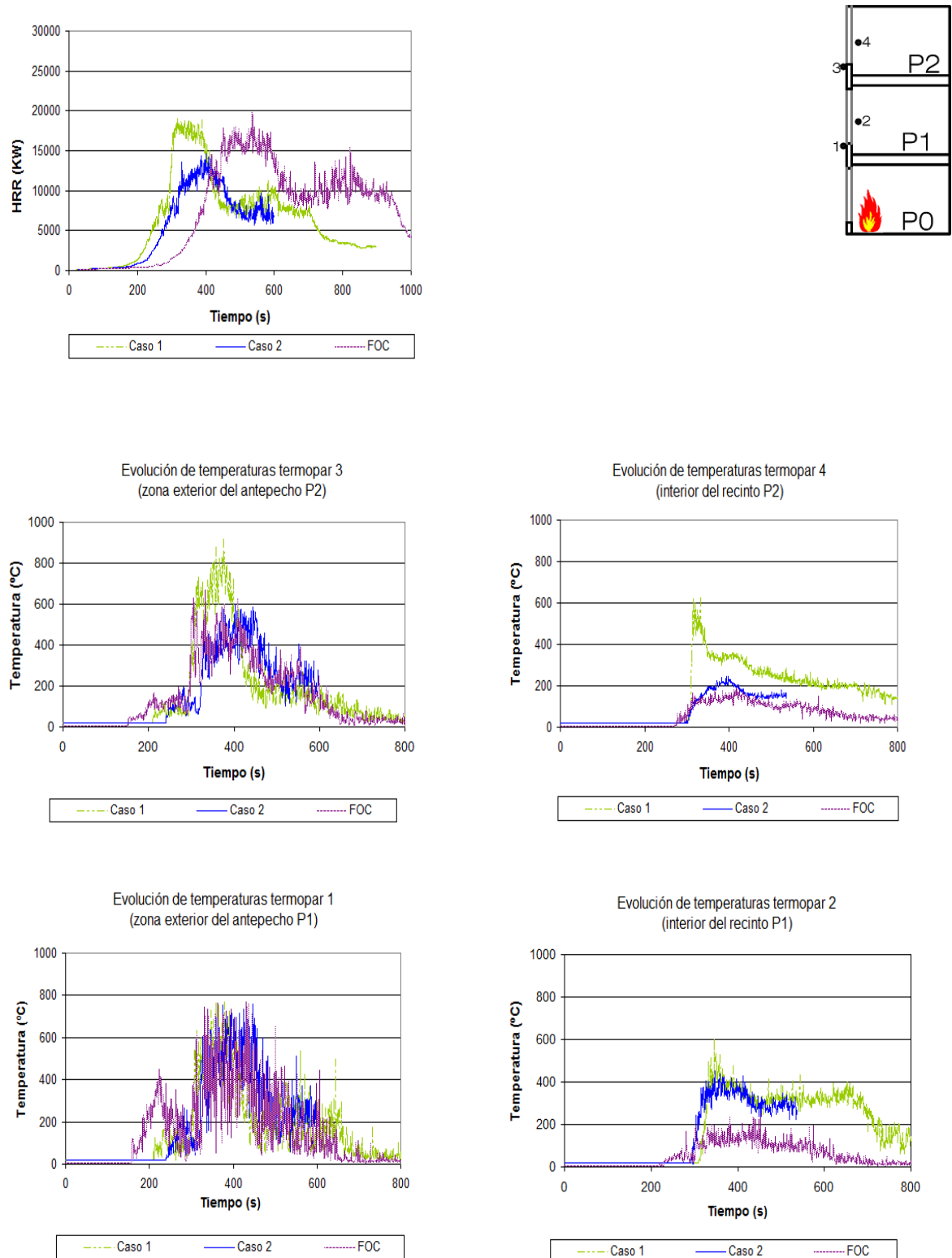


Fig. 6.65

La comparativa de curvas de temperatura muestra que la propagación del fuego a través de la cámara ventilada incrementa la posibilidad de que el fuego penetre a las plantas superiores.

En la Fig. 6.65 se puede ver una comparativa adicional en la que se incorpora a los **casos 1 y 2** un escenario de tipología **FOC**, es decir, sin cámara ventilada pero con unas características equivalentes en cuanto a la configuración de las ventanas. Se puede apreciar que la acción del fuego sobre la superficie exterior de la fachada es similar en los tres casos (termopares 1 y 3), salvo por el pico máximo de temperatura que alcanza el **caso 1** a la altura de la P2 (termopar 3), lo cual resulta lógico teniendo en cuenta la combustibilidad del material de aislamiento térmico.

Lo anterior indicaría que la propagación exterior del fuego a través de las ventanas o efecto *leap frog* ocurre de forma similar en los tres casos. Según se explicó en el apartado 4.4.3 la propagación del fuego a través de una fachada ventilada ocurre de forma simultánea a través de las ventanas y a través de la cámara ventilada. Sin embargo, la propagación a través de la cámara es mucho más eficaz.

La diferencia más acusada entre los **casos 1 y 2** respecto al tipo **FOC** se observa en los termopares 2 y 4 lo que indica que la probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores es mucho mayor cuando el fuego se propaga a través de la cámara ventilada.

Comparativa casos 3 y 4 (Cámara ventilada compartimentada)

- **Caso 3** compartimentación mediante barrera cortafuegos
- **Caso 4** compartimentación mediante telar de la ventana resistente al fuego

Comparativa de casos 1, 2, 3, 4 y 5

Gráficos de la simulación	Figuras 6.66
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.67 Figuras 6.68

Se aprecian resultados similares entre los **casos 3 y 4**. Los gráficos extraídos de la simulación muestran un penacho de fuego y un flujo de calor sobre la superficie de la fachada con características muy semejantes, es por ello que se han unificado en los mismos gráficos.

En las curvas comparativas se aprecian diferencias en los picos de temperatura pero no son muy relevantes. El **caso 4** presenta unos picos de temperatura levemente superiores a los del **caso 3**. La probabilidad de propagación a las plantas superiores es baja en ambos casos, lo que corroboraría que una adecuada compartimentación

resulta efectiva como mecanismo de control de la propagación a través de la cámara ventilada, ya sea mediante una barrera cortafuegos en el interior de la cámara ventilada o mediante un telar resistente al fuego capaz de impedir el paso de las llamas y los humos a la cámara ventilada cuando el penacho de fuego se proyecta a través de la ventana. Este es uno de los aspectos que resalta la importancia de la compartimentación de la cámara ventilada y que se aprecia observando los **casos 1 y 2** respecto a los **casos 3 y 4**.

En la Fig. 6.68 se amplía la comparativa incorporando a los casos anteriores el **caso 5**. Este escenario, al igual que el **caso 3**, está provisto de barreras cortafuego por planta, pero su principal diferencia con los casos anteriores es que el material de revestimiento es combustible¹². Se puede observar que las temperaturas más altas registradas sobre la superficie de la facha se dan en el **caso 5**, además con una marcada diferencia (termopares 1 y 3).

¹² Una de las principales amenazas asociadas a los materiales de revestimiento combustibles es el elevado flujo de calor radiado. I. Oleszkiewicz (1990b) a partir de unos ensayos realizados a escala real estableció la altura del penacho de fuego y la densidad de flujo de calor radiado por diferentes materiales de revestimiento de fachada.

Fachadas ventiladas

Cámara ventilada compartimentada

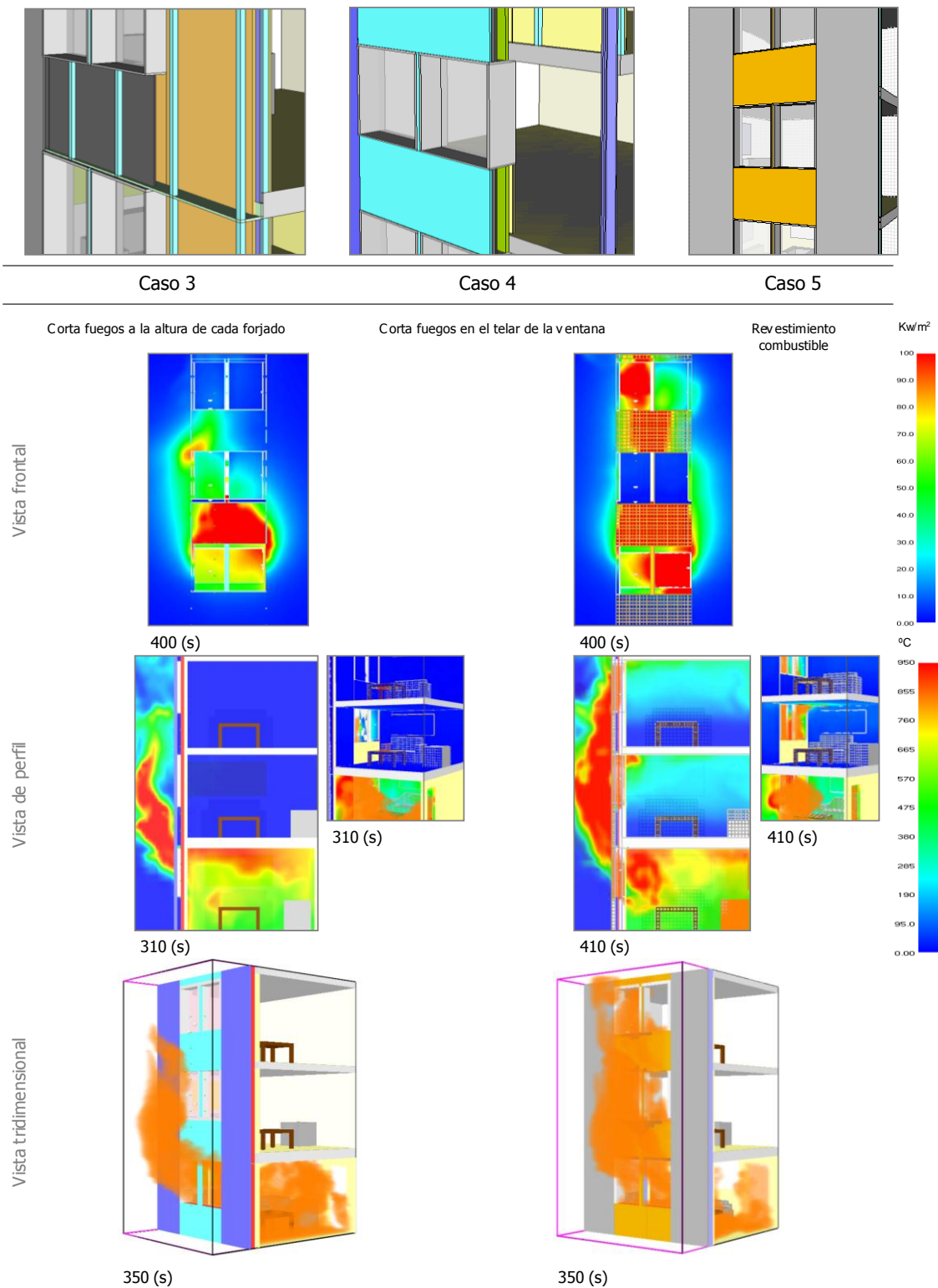


Fig. 6.66

Los gráficos de la izquierda corresponden al caso 3. Los correspondientes al caso 4 no se han incluido debido a su similitud con los del caso 3. En ambos casos la compartimentación de la cámara evita la propagación del fuego a través de ésta. Los gráficos de la derecha corresponden al caso 5, en ellos se aprecia una propagación intensa por la aportación del material combustible del revestimiento.

Cámara ventilada compartimentada

Casos 3 y 4

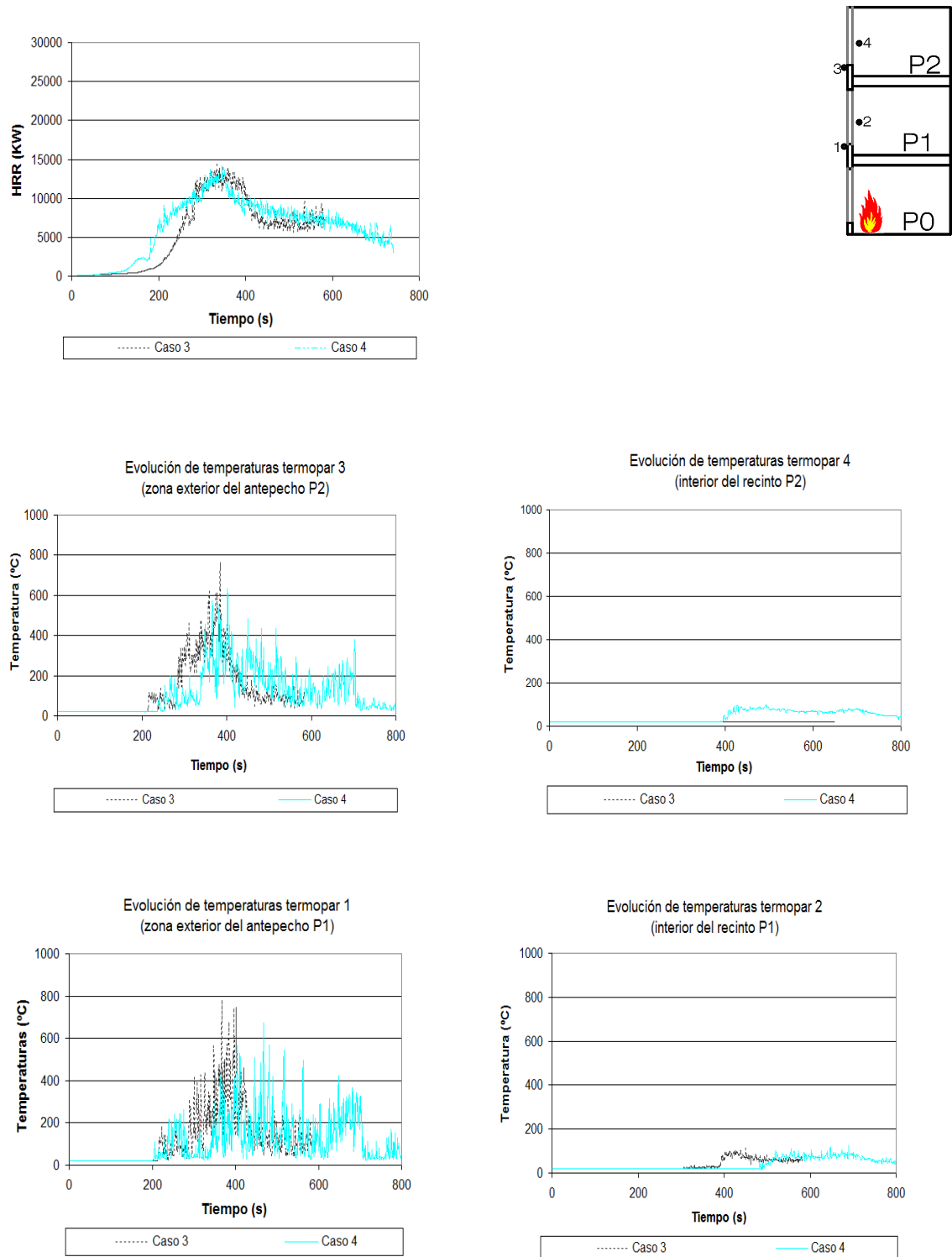


Fig. 6.67
 Una adecuada compartimentación resulta efectiva como mecanismo de control de la propagación a través de la cámara ventilada, ya sea mediante una barrera cortafuegos en el interior de la cámara ventilada o mediante telares resistentes al fuego en torno a las ventanas.

Cámara ventilada no compartimentada y compartimentada

Comparativa de todos los casos propuestos según la tabla 6.1.

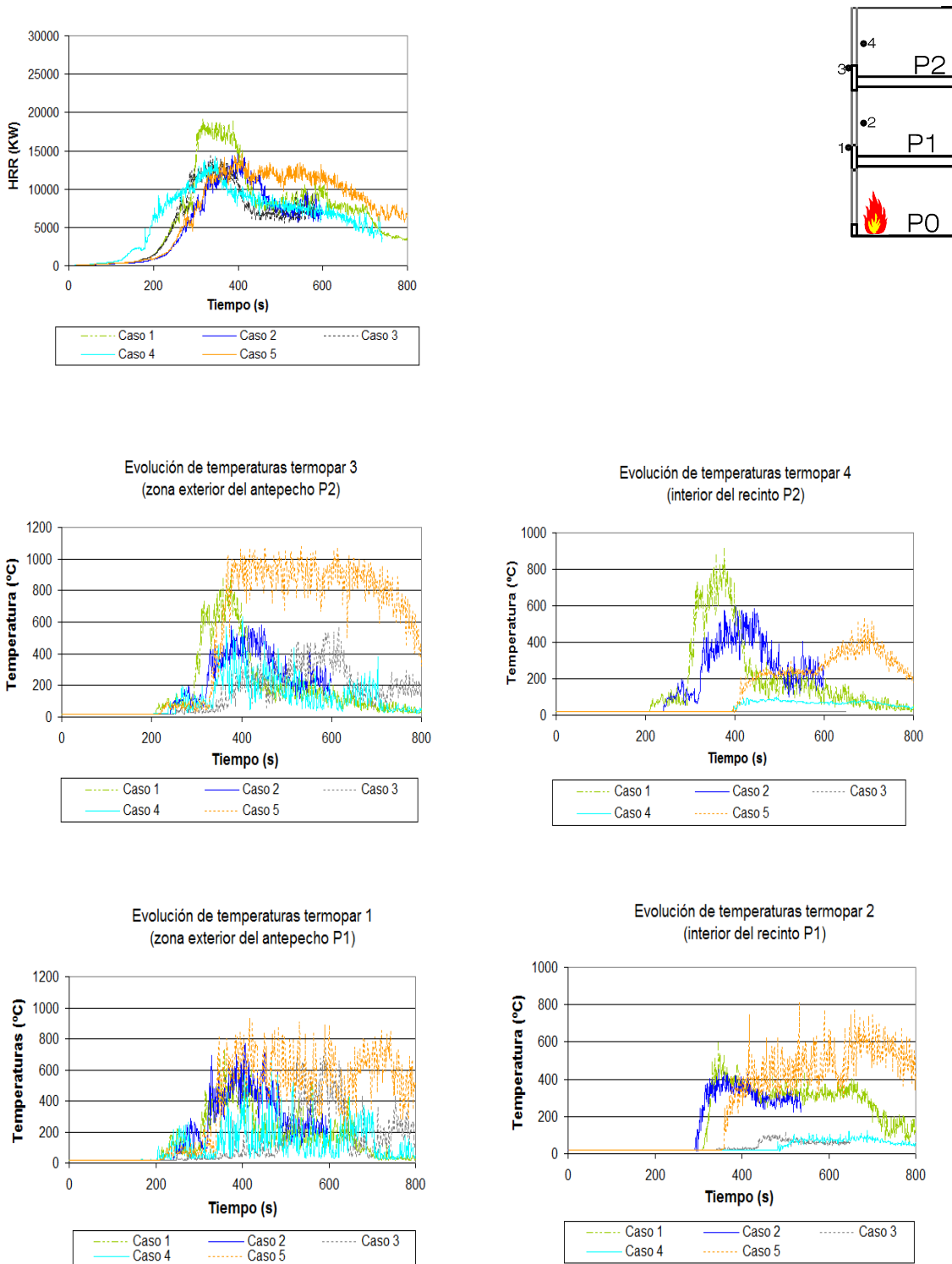


Fig. 6.68

Se observa que las temperaturas más altas registradas se dan por la aportación del material de revestimiento combustible (caso 5). No obstante, la probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores también en alta cuando el fuego se propaga a través de la cámara ventilada.

La probabilidad de penetración a las plantas superiores también es considerablemente más alta en el **caso 5**, si bien también es alta en los **casos 1 y 2**, en especial a la P2 (termopar 4).

Atendiendo a lo anterior podría subrayarse que aunque normalmente la mayor amenaza de propagación del fuego se relaciona con los materiales de revestimiento combustible, la propagación a través de la cámara ventilada es un riesgo que merece ser considerado con especial atención.

Comparativa casos 1, 2, 3, 4 y 5 (subestructura de la fachada ventilada)

Comparativa de casos 1, 2, 3, 4 y 5 (barreras cortafuegos)

Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.69 Figuras 6.70

Otro aspecto que resulta importante considerar en los cinco casos propuestos es el relacionado con la incidencia de la propagación del fuego sobre la subestructura de la fachada ventilada. Se han dispuesto dos termopares ubicados en el montante central de la subestructura de la fachada ventilada con el fin de determinar el grado de afectación que puede sufrir la subestructura por la acción directa del fuego o por la transmisión del calor. Uno ubicado 3,5 m de altura (termopar 5) y el otro ubicado a 6 m de altura (termopar 6). En los resultados se observa, como es de suponer, que las más altas temperaturas registradas corresponden a los **casos 1 y 2**, aquellos cuya fachada ventilada no tiene elementos de compartimentación. De acuerdo a los datos que recogen las curvas, los picos máximos de temperatura alcanzados superan los 800°C en ambos casos. Teniendo en cuenta estas temperaturas se podría considerar dentro de las posibilidades el peligro de colapso de la subestructura. En contraste se aprecia que en el **caso 3**, el cual corresponde a una fachada ventilada provista con barreras cortafuegos, las temperaturas máximas están por debajo de los 200°C.

Subestructura de las fachadas ventiladas (FOV)

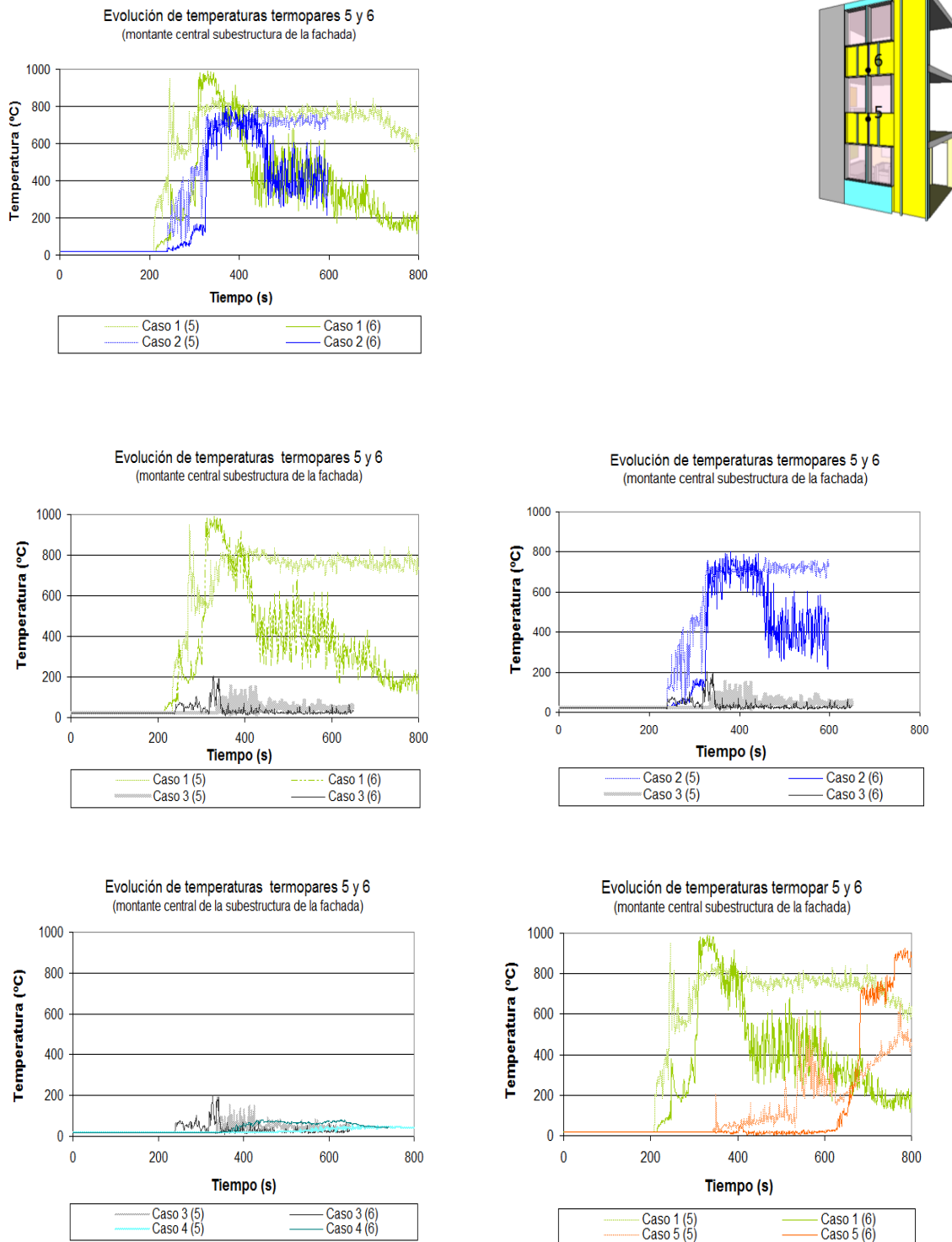


Fig. 6.69
Las temperaturas más altas registradas en los termopares 5 y 6 (subestructura de la fachada) corresponden a los casos 1 y 2, aquellos cuya fachada ventilada no tiene elementos de compartimentación.

Esta situación también corrobora la importancia de la implementación de las barreras cortafuegos, más aún si se tiene en cuenta que el aluminio es un material usado con frecuencia en la fabricación de elementos estructurales de fachada¹³. De acuerdo a lo anterior se podría considerar que la presencia de una adecuada compartimentación de la cámara ventilada contribuiría a minimizar el riesgo de colapso.

Siguiendo con el mismo aspecto de observación, pero esta vez en la comparativa de los **casos 3 y 4**, (fachadas ventiladas provistas de elementos de compartimentación) se puede apreciar que las temperaturas a las cuales estaría sometido el elemento estructural no son significativas. También se aprecia que las temperaturas registradas en el **caso 4** son más bajas respecto al **caso 3**. Teniendo en cuenta que los metales son excelentes conductores del calor resulta más efectivo impedir de forma rotunda la entrada del fuego a la cámara ventilada, en este caso mediante un telar resistente y bien sellado. Las barreras cortafuegos (**caso 3**) impiden la propagación a través de la cámara ventilada, pero no impiden que el fuego entre parcialmente a la cámara. Por lo tanto, la subestructura de la fachada puede quedar expuesta al flujo de calor de forma localizada y transmitir el calor por conducción a todo el elemento estructural. Por ello en determinadas situaciones de riesgo especial es importante considerar esta situación.

En relación a este mismo aspecto resulta interesante observar lo que ocurre con el elemento de la subestructura de la fachada en la comparativa de los **casos 1 y 5**, los escenarios más desfavorables por contener materiales combustibles. En el **caso 1** el material de aislamiento térmico y en el **caso 5** el revestimiento de la fachada. De acuerdo a lo que se observa en las curvas comparativas, el elemento estructural estaría sometido a temperaturas muy altas, en ambos casos, se observa un pico máximo por encima de los 800°C.

¹³ El aluminio es un buen conductor del calor y tiene un comportamiento débil frente al calor. Alcanza su temperatura crítica (pierde su capacidad portante) en torno a los 450 - 500°C y su punto de fusión ronda los 566 – 650°C.

Elementos de compartimentación de la cámara y capialzado del recinto de origen del incendio

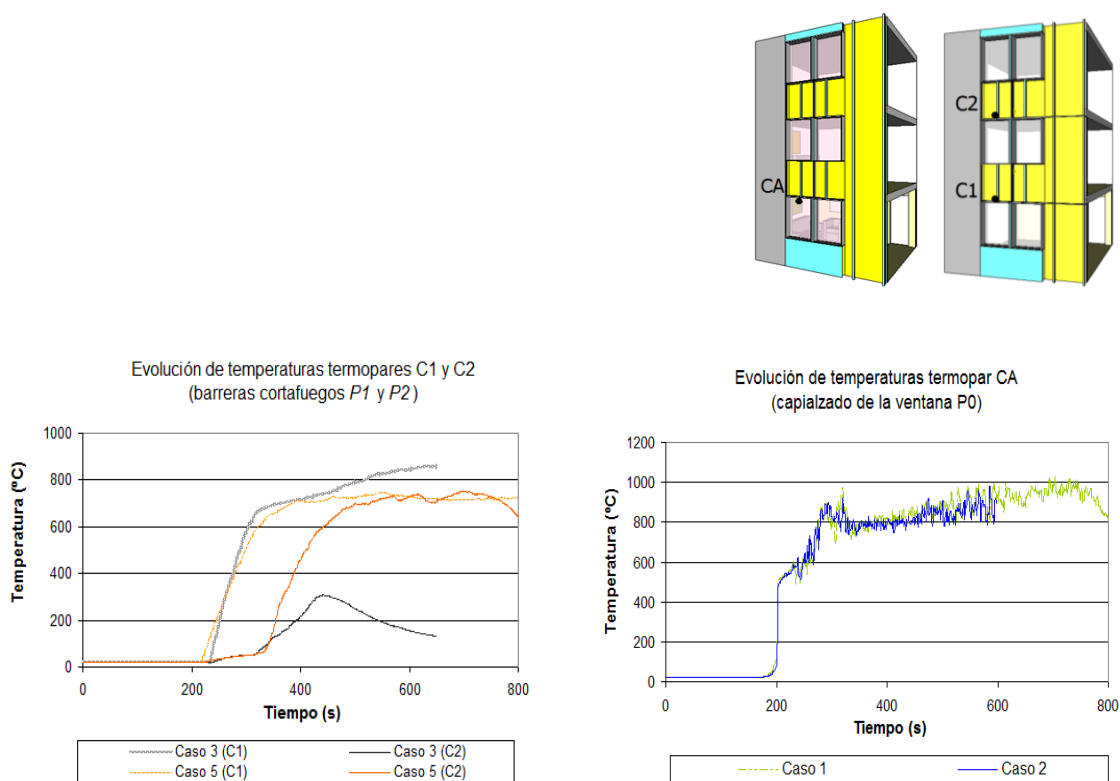


Fig. 6.70
Es importante tener en cuenta que los capialzados son elementos especialmente atacados por el fuego durante la descarga del penacho de fuego, conviene por tanto, considerar el uso de materiales estables frente al fuego para este propósito.

La diferencia está en la velocidad a la que alcanzan dicho pico máximo. En el **caso 1** ocurre rápidamente, cerca de los 300 segundos y en el **caso 5** cerca de los 800 segundos. Según se ha visto en los análisis previos, la cámara ventilada es un medio de propagación del fuego muy eficaz debido a que canaliza de forma rápida la propagación. En el **caso 5** el material de revestimiento tiene gran capacidad de desprendimiento de calor como consecuencia de sus propiedades térmicas, por ello la densidad de flujo de calor generado por el revestimiento puede llegar a ser muy alta y puede ser transmitida con facilidad a la subestructura de la fachada a través de las delgadas placas del revestimiento.

Las Fig. 6.70 muestran un aspecto relacionado con lo anterior, pero ahora los elementos que se toman en consideración son las barreras cortafuegos. Para este propósito los termopares se han ubicado justo encima de los cortafuegos, en la P1 (termopar C1) y en la P2 (termopar C2). Se han dispuesto en la zona más afectada por la propagación, es decir, sobre las ventanas del lado izquierdo de los escenarios.

Es importante tener en cuenta que no se pretende determinar el nivel de resistencia del elemento cortafuegos o realizar consideraciones referentes al comportamiento del material, pero sí determinar de forma aproximada las temperaturas a las cuales podría estar expuesto el elemento en la situación de incendio planteada.

Los resultados muestran temperaturas de exposición que oscilan entre 700 – 800°C, excepto en el caso del termopar C2 del **caso 3**, en el cual el flujo de calor máximo ronda los 300°C. Es por ello que estos elementos deben reunir condiciones específicas relacionadas con su estabilidad frente al fuego, para que puedan ofrecer un nivel de protección idóneo. El gráfico siguiente ilustra las temperaturas a las cuales podría estar expuesto el capialzado de la ventana por la cual se proyecta el penacho de fuego (termopar CA). El capialzado es, sin duda, uno de los elementos más afectados por el incendio a durante la propagación exterior. Según el gráfico, los picos máximos de temperatura se acercan a los 1000°C.

Aspectos estipulados por la normativa

En este punto se repasan algunos de los aspectos mencionados en el punto anterior, considerando las disposiciones del CTE relacionadas con las fachadas ventiladas.

Como se ha indicado en el capítulo 3 la normativa no hace referencia explícita a los cerramientos ligeros, lo cual da lugar a un margen de interpretación muy amplio de las medidas a aplicar y supone inconvenientes en su ejecución.

Disposiciones en relación a los espacios ocultos

El CTE incluye las cámaras ventiladas dentro de un grupo denominado espacios ocultos. Las disposiciones sobre las cámaras ventiladas las encontramos en el documento básico SI parte 1 numeral 3.2 el cual dice: (...) se limita a tres plantas y a 10 m el desarrollo vertical de las cámaras no estancas en las que existan elementos cuya clase de reacción al fuego no sea B-s3, d2, BL-s3, d2 ó mejor. Según la disposición de la normativa las barreras cortafuegos se deben disponer cada tres plantas, y solo cuando el aislamiento térmico de la cámara ventilada no cumple con la clase de reacción al fuego exigida. La resistencia de la barrera ha de ser la misma exigible al elemento constructivo al que pertenece el elemento de compartimentación, por tanto sería EI 60. Para revisar estos aspectos se han elaborado escenarios de seis plantas de altura (Planta baja + 5) con una altura total de 18 m. Estos escenarios han

permitido valorar los aspectos relacionados con la cámara ventilada¹⁴ considerando la altura estipulada por la normativa (Fig. 6.18).

En el punto anterior se ha dicho que la cámara ventilada puede considerarse en sí misma una potencial vía de propagación del fuego independientemente de que existan materiales combustibles que contribuyan a una propagación más intensa y más rápida. Partiendo de esta premisa, en este punto se han considerado solamente las dos situaciones que se describen en la tabla siguiente:

Tabla 6.15 características de los casos evaluados

Caso	Barrera corta fuegos	Cámara compartimentada	Características del telar de la ventana (Alféizar, capialzado, jambas)	Material de aislamiento térmico	Material de Revestimiento
2	No	No	Baja estabilidad frente al fuego	No combustible	No combustible
3	Sí	Sí	Baja estabilidad frente al fuego	Combustible	No combustible

Caso 2 (cámara no compartimentada)

Caso 3 (cámara compartimentada)

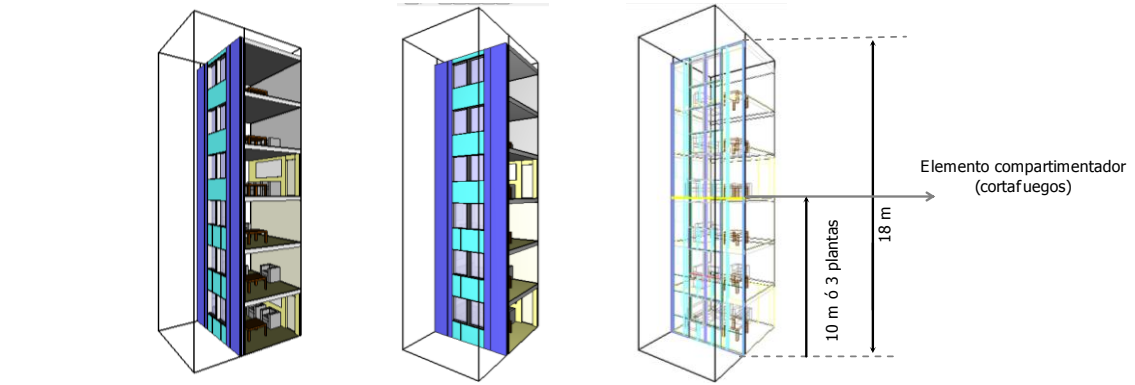
Gráficos de la simulación	Figuras 6.71 Figuras 6.72
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.73

Los gráficos de las simulaciones reflejan el alcance del flujo de calor convectivo del penacho del fuego, el cual emite un calor con temperaturas en torno a los 400°C a la altura de la P4. En los gráficos del **caso 1** se puede apreciar, además del potencial del flujo de calor del penacho de fuego, la facilidad y rapidez con la cual se puede propagar el fuego a través de la cámara ventilada.

De los datos obtenidos se observa que la propagación a través de la cámara ventilada puede tener una extensión muy superior a la del penacho de fuego proyectado por las ventanas. El gráfico que registra las temperaturas de los termopares T1, T2 y T3 ubicados en el interior de la cámara, muestra unos picos de temperatura que rondan los 180°C, lo cual resulta interesante teniendo en cuenta que están situados a 11 y 18 m de altura respectivamente.

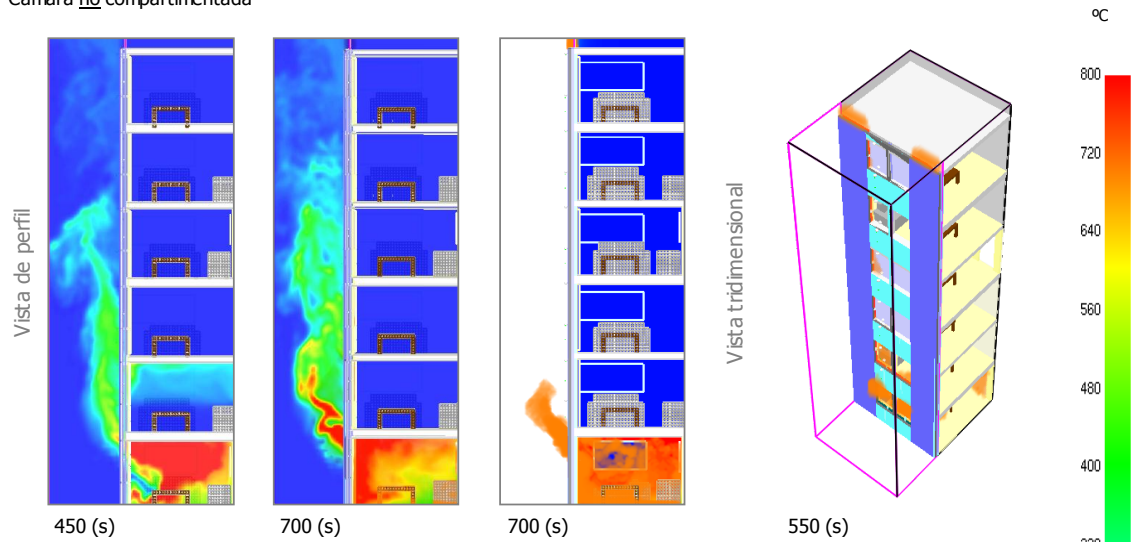
¹⁴ Las barreras cortafuego en sistemas de fachada ventilada idealmente tendrían que disponerse en cada planta de la edificación y su fijación se debe realizar a la estructura portante del edificio y en ningún caso a la fachada. El propósito es alcanzar un nivel de control aceptable sobre la propagación del fuego a través de la cámara ventilada. [S. Colwell - B. Martin 2002].

Compartimentación de la cámara ventilada de acuerdo a lo estipulado en el CTE



Caso 2

Cámara no compartimentada



Caso 3

Cámara compartimentada

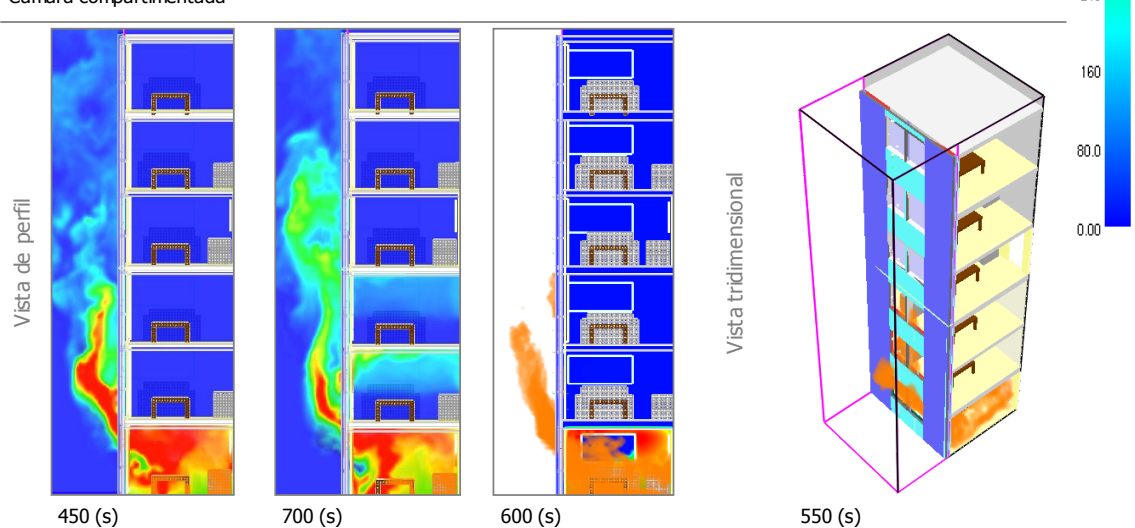
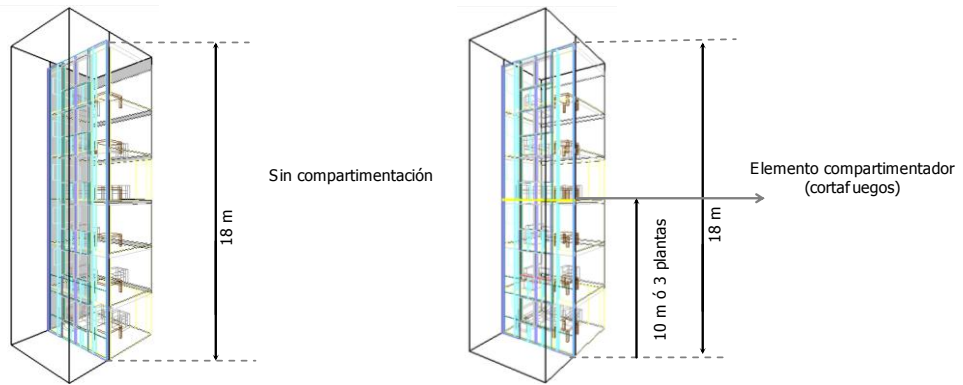


Fig. 6.71

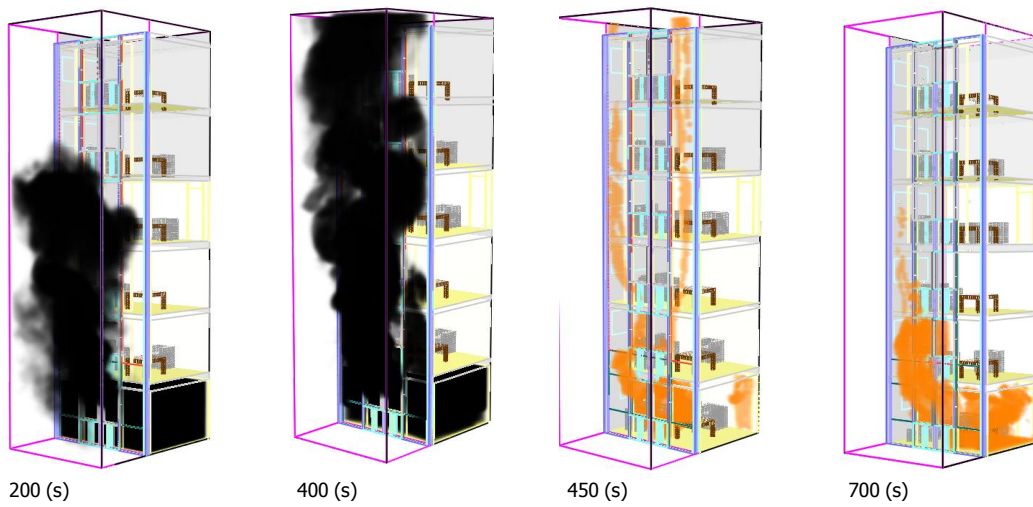
La propagación a través de la cámara ventilada puede tener una extensión muy superior a la del penacho de fuego proyectado por las ventanas.

Compartimentación de la cámara ventilada de acuerdo a lo estipulado en el CTE



Caso 2

Cámara no compartimentada



Caso 3

Cámara compartimentada

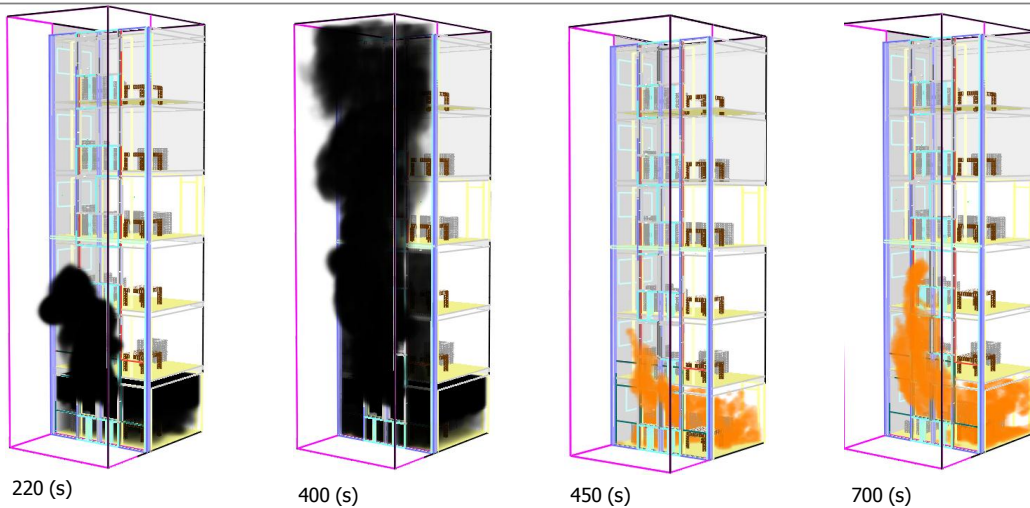


Fig. 6.72
La cámara ventilada puede ser una potencial ruta de propagación del fuego aun cuando el material de aislamiento térmico sea incombustible.

Compartimentación de la cámara ventilada de acuerdo a lo estipulado en el CTE

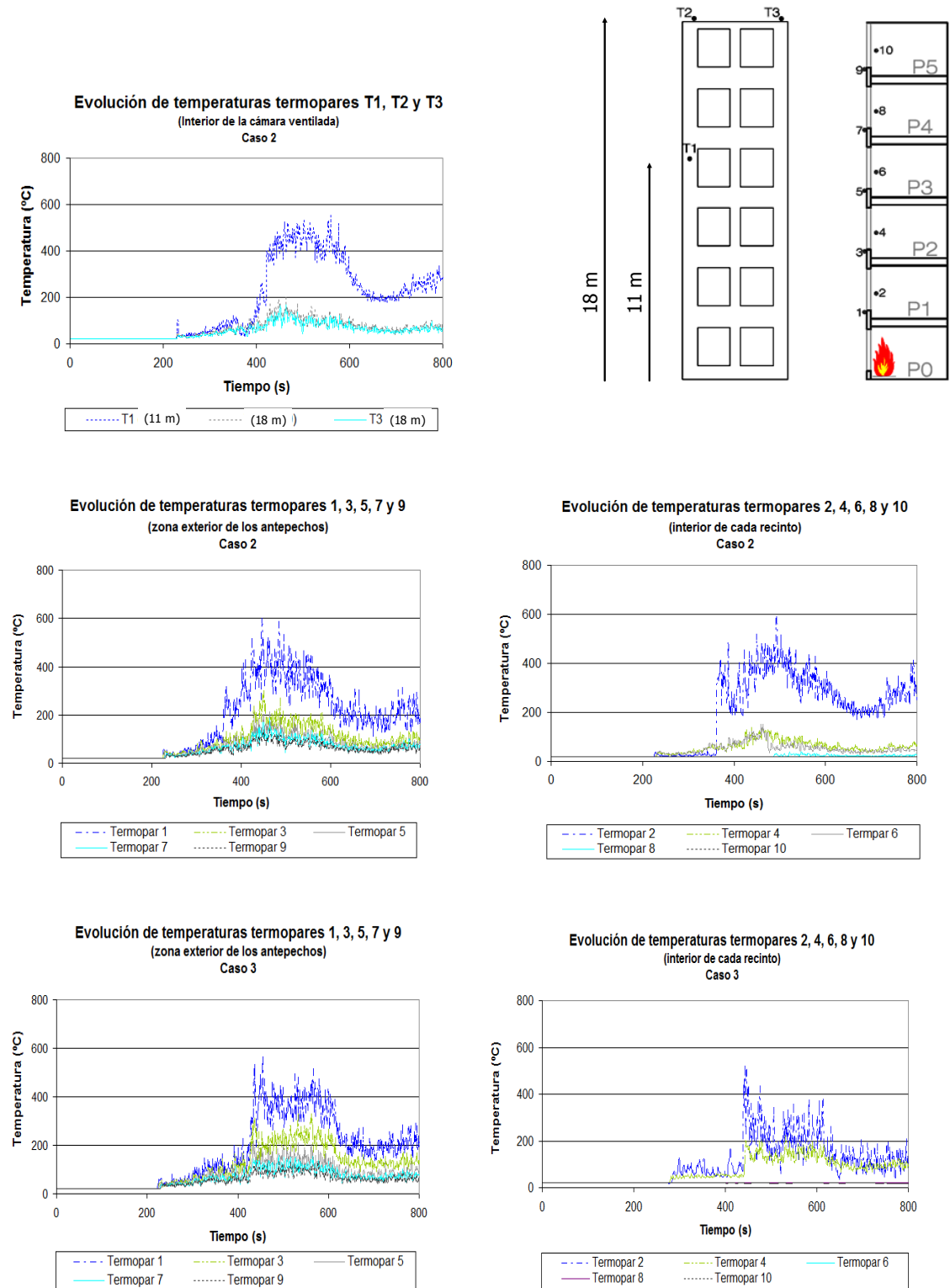


Fig. 6.73

Los termopares T2 y T3 ubicados en la parte superior de la cámara registraron temperaturas que rondan los 180°C, ello indicaría que el fuego podría propagarse a través de la cámara, varias plantas hacia arriba en corto tiempo. No compartimentar la cámara ventilada equivale a pasar por alto un riesgo potencial de propagación del fuego en una situación de incendio.

Respecto al comportamiento del fuego en la cámara ventilada se podría considerar que la ausencia de elementos de compartimentación representa un riesgo considerable en una situación de incendio.

En los gráficos del **caso 2** se puede apreciar que la barrera cortafuegos, implementada según lo indicado por la norma cada tres plantas, efectivamente limita el paso de la propagación del fuego, sin embargo las dos plantas que no están provistas de la barrera cortafuegos quedan desprotegidas y por tanto queda servida la posibilidad de penetración del fuego a las plantas superiores a través de la cámara.

Disposiciones en relación a los materiales

El CTE recoge en su documento básico SI sección 2 [5] las únicas disposiciones que hacen referencia a los materiales de revestimiento de las fachadas y los materiales de aislamiento térmico ubicados en las cámaras ventiladas. Todo material empleado en estas superficies que ocupe más del 10% del total deberá certificar una clasificación B-s3, d2. En el párrafo siguiente se aclara que la medida se aplica únicamente en edificaciones que superen los 18 m de altura; para aquellas que no superan esta altura sólo se exige dicha clasificación en una franja de 3,5 m de altura, y únicamente en zonas accesibles al público (accesos de edificios, terrazas, etc.). Según se ha explicado en el apartado 3.5.1 estas medidas resultan poco restrictivas, teniendo en cuenta el amplio porcentaje de edificaciones de vivienda en ciudades como Barcelona que no superan los 18 m de altura. Se han realizado unos escenarios que combinan elementos salientes en la configuración de la fachada y revestimiento combustible de fachada en proporción del 10% de la superficie total (Fig. 6.19) con el propósito de estudiar de forma más amplia la influencia de este aspecto. En particular se han considerado fachadas con aleros no combustibles con las siguientes dimensiones:

Alero de 40 cm (RC) - Alero de 40 cm (RNC) (*revestimiento combustible y revestimiento no combustible respectivamente*)

Alero de 60 cm (RC) - Alero de 60 cm (RNC)

Alero de 80 cm (RC) – Alero de 80 cm (RNC)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.74
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.75

Material de revestimiento combustible

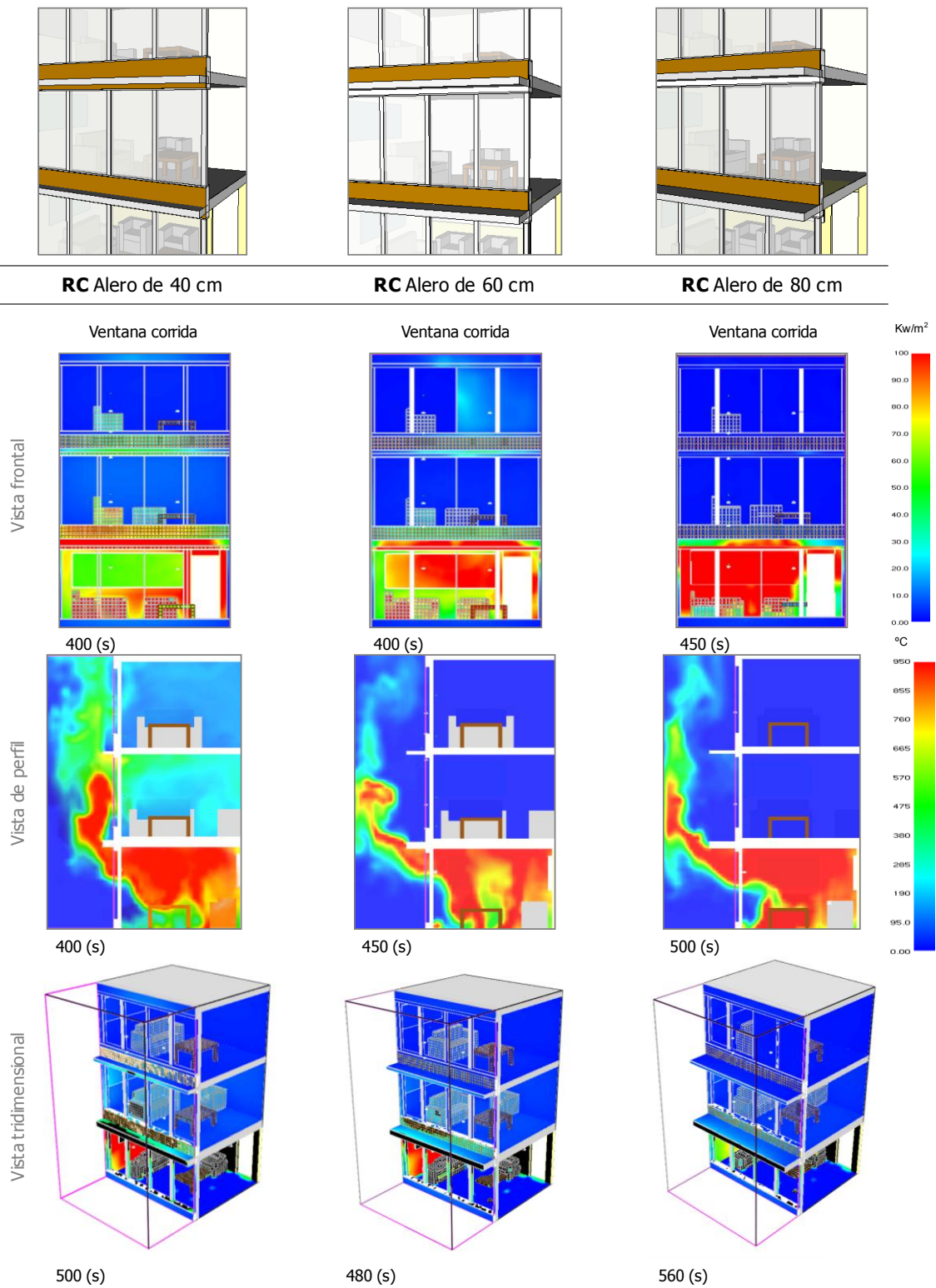


Fig. 6.74
Se ha determinado que el revestimiento combustible ocupe el 10% de la superficie total de la fachada de acuerdo a lo estipulado en el CTE [5].

Material de revestimiento combustible

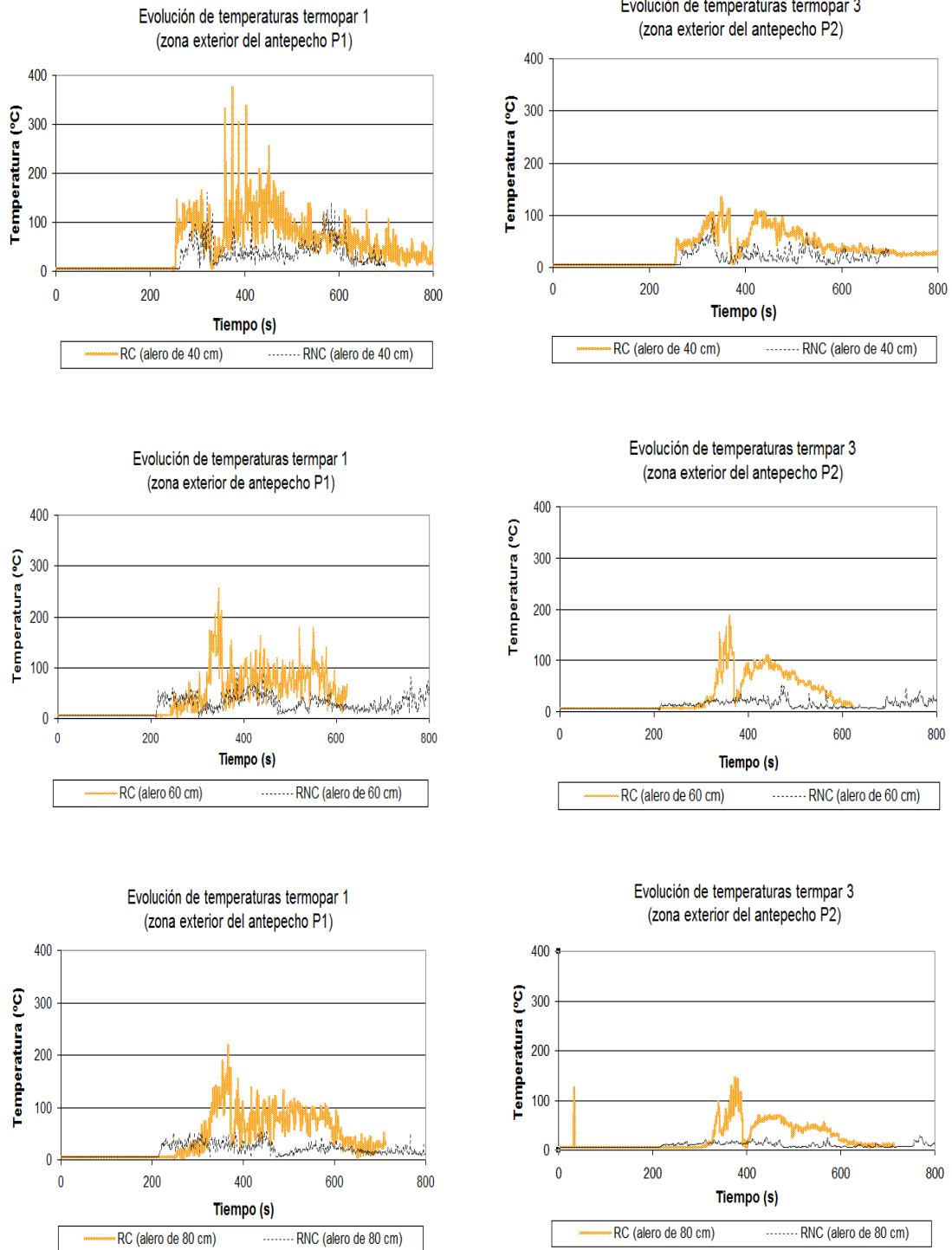


Fig. 6.75

La efectividad de un alero como medio de control de la propagación vertical depende, entre otras cosas, de las propiedades térmicas de los materiales de revestimiento. Un alero que resulta efectivo para proteger una fachada con revestimiento incombustible, puede ser insuficiente para proteger una fachada con revestimiento combustible.

Según se ha visto en el apartado 6.5.1 en los análisis dedicados a la configuración geométrica de la fachada, los aleros son elementos capaces de desviar la trayectoria del fuego y por tanto de limitar su propagación vertical a través de la fachada. El grado de protección que puede brindar este elemento es directamente proporcional a su tamaño y basado en ello se concluía que mediante un alero de 80 cm se podría obtener una reducción considerable del flujo de calor sobre la superficie de la fachada.

Según se aprecia en los gráficos de las simulaciones de los casos planteados, en este punto ocurre de igual manera: los aleros desvían la trayectoria del fuego, pero se hace evidente que la incidencia del flujo de calor sobre la fachada es mayor debido al grado de combustibilidad del material de revestimiento¹⁵. Esto se puede apreciar también en las curvas comparativas de los **Aleros de 40, 60 y 80** cm en su versión **RC** respecto a los aleros en versión **RNC**. Como era de esperar, se observa que cuanto más pequeño es el alero, mayor es la superficie de exposición afectada por el flujo de calor. No obstante, resulta interesante apreciar el grado de afectación de la fachada en los casos de los **RC** respecto a los casos con **RNC**. Según las temperaturas observadas y teniendo en cuenta las propiedades térmicas de los materiales combustibles, el riesgo de ignición y posterior propagación no es descartable en ninguno de los casos planteados.

Teniendo en cuenta lo observado, sería preciso considerar que según las propiedades térmicas de los materiales de revestimiento de las fachadas (poder calórico, densidad, temperatura de ignición etc.) el alero de 80 cm de vuelo podría ser un elemento de protección insuficiente.

¹⁵ Los materiales combustibles en las superficies de las fachadas representan un riesgo considerable porque alcanzan su punto de ignición a temperaturas bajas. Constituyen una fuente ideal para que ocurran fuegos secundarios, como por ejemplo: propagación desde un edificio vecino, desde el mismo edificio, como consecuencia de una pavesa ardiente transportada por el aire, etc.

Soluciones constructivas del encuentro del forjado y la fachada

Según se ha visto en el capítulo 4, la solución constructiva del encuentro del forjado y la fachada en las **FV** (muros cortina) es un asunto que por su importancia y complejidad requiere no solo de un buen criterio constructivo y de diseño, sino además de conocimiento en los diferentes aspectos técnicos y normativos que involucra. Por todo ello se entiende que sea considerado un punto crítico de este sistema de fachadas. La disposición contemplada por el CTE referente a la propagación vertical del fuego (franjas de 1 m) es uno de estos aspectos involucrados y su implementación ha dado lugar a soluciones y detalles constructivos para todos los gustos.

Para estudiar algunos aspectos relacionados con este aspecto se han realizado unos escenarios que representan, de forma simplificada, dos de los detalles más utilizados para resolver este punto de las **FV**.

También se ha considerado evaluar el comportamiento de las **FV** con una configuración libre de franjas de 1 m. Este tipo de configuraciones, caracterizadas por grandes superficies de vidrio separadas entre plantas solo por un elemento opaco del mismo espesor del forjado, son permitidas por la normativa cuando la superficie de cada planta de la edificación no es suficiente para constituir un sector de incendio; ya sea por el tamaño de la edificación, la forma en la cual se distribuyen los sectores de incendio o porque el edificio certifica una estrategia global de protección en la cual limita el riesgo de propagación del fuego exterior mediante soluciones de protección activa.

Estos aspectos se han analizado mediante los siguientes escenarios (Fig. 6.20 y Fig. 6.21).

SF (Sin franja de 1 m)

Solución 1 (franja + cortafuegos 1) detalle constructivo con cortafuegos acoplado al forjado

Solución 2 (franja + cortafuegos 2) detalle constructivo con cortafuegos integrado al panel de la fachada.

Las características generales de los detalles constructivos están recogidas en la siguiente tabla.

Tabla 6.16 características de los casos evaluados

Soluciones del encuentro forjado fachada	Posición 1	Fijación frontal	Fijación apoyada
SF		•	
Solución 1	•	•	
Solución 2	•	•	•

Nota: La **posición 1** se refiere al aspecto considerado en el análisis: ubicación de la franja respecto al forjado (Fig. 6.14).

Gráficos de la simulación	Figuras 6.76
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.78

En los análisis realizados en la sección anterior, referentes a la influencia de la configuración de las ventanas se han expuesto los diferentes riesgos asociados a las fachadas con ventanas grandes y ventanas corridas, las cuales son características de las **FV**. En general se puede considerar que la propagación del fuego en este tipo de fachadas puede ser muy destructiva debido a la proporción y alcance del fuego, el grado de afectación que puede sufrir la superficie de la fachada y la elevada probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores. Dada las características de la propagación del fuego en este tipo de fachadas, la protección aportada por las franjas de separación entre plantas exigidas por la norma puede ser poco significativa.

Soluciones de cortafuegos

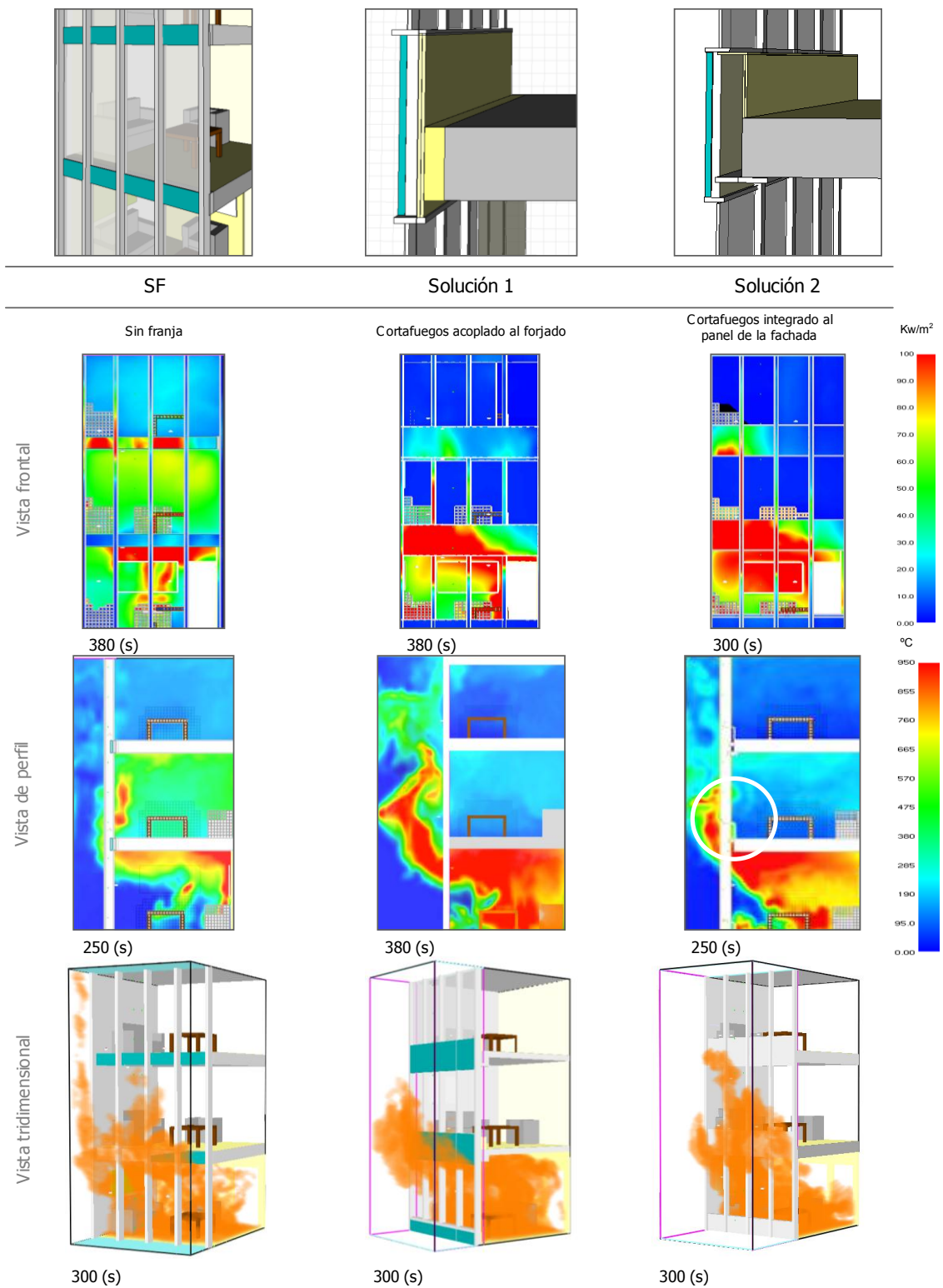


Fig. 6.76 Dadas las proporciones del penacho de fuego que se proyecta a través de este tipo de fachadas, las franjas de 1 m pueden resultar insuficientes.

Desde esta perspectiva resultan previsibles los resultados observados en el caso **SF**. Según se aprecia en los gráficos de la simulación (perfil de la propagación) la penetración del fuego a la P1 ocurre con facilidad y rapidez, la ausencia de la franja de separación entre ventanas simplifica notablemente el salto del penacho a la planta siguiente. En los caso **Solución 1** y **Solución 2** también se observa un gran penacho de fuego con forma curvilínea incidiendo continuamente sobre la fachada, pero la penetración del fuego a las plantas superiores es menos agresiva y evidente respecto al **SF**. La franja genera un leve obstáculo que retarda la propagación.

La incidencia de las llamas y el flujo de calor transmitido sobre la superficie de la fachada, podría alcanzar a afectar la subestructura de la fachada. Según se aprecia en las curvas de temperatura de los elementos estructurales, estos alcanzan temperaturas en torno a los 500°C (Perfiles P1, P2, P3 y P4). Esta transmisión del calor resulta lógica teniendo en cuenta que las placas opacas de revestimiento son particularmente delgadas y que para el caso planteado no se ha considerado ningún tipo de aislamiento en los elementos estructurales metálicos. Este último punto tendría que ser considerado a fin de evitar que los elementos de fijación alcancen su temperatura crítica y se produzca un colapso en la fachada.

Con el propósito de ampliar las observaciones relacionadas con los detalles constructivos y la subestructura de la fachada, se ha considerado un aspecto adicional en el caso **Solución 2**. Se trata de una hipótesis de fallo por la incidencia del fuego y las altas temperaturas que da lugar a una pequeña brecha (3 cm) en el sello cortafuegos cuando éste alcanza 700°C de temperatura (se desactiva una pequeña parte de la placa cortafuegos). Esta hipótesis se aplica considerando una eventual ruta de penetración del fuego a través de fisuras en las placas o fallos en las uniones mecánicas entre elementos. En el caso **Solución 1** no se ha considerado ninguna hipótesis de fallo. El planteamiento de este detalle constructivo es más consistente y los elementos constructivos están más integrados, por lo tanto no da lugar a considerar desprendimiento de piezas (Fig. 6.21).

Se ha podido observar en los gráficos que efectivamente el fuego y el humo podrían penetrar eventualmente a través de la brecha del elemento cortafuegos, pero no se aprecia otro efecto derivado de esta situación. No obstante, al observar las curvas de temperatura en los elementos estructurales se observa un incremento en las temperaturas de los elementos estructurales. Esto pone de manifiesto la importancia

de que estos detalles constructivos tengan una integridad y un aislamiento suficientes para soportar fuertes flujos de calor e incidencia directa de las llamas.

Elementos de fijación

Los elementos de fijación o anclajes de las fachadas ligeras están encargados de vincular adecuadamente dos elementos constructivos de naturaleza muy distinta: la estructura del edificio (rígida y pesada) y la fachada (ligera y flexible). Estos deben estar en capacidad de soportar los requerimientos de cargas estáticas y dinámicas a las que está sometido el edificio y transmitirlos adecuadamente (apartado 4.4.2). En relación a su comportamiento frente al fuego deben ser tomados en consideración algunos aspectos de protección teniendo en cuenta que los materiales con los que son construidos (aluminio y acero) tienen un comportamiento débil frente al fuego. Normalmente los elementos de fijación pueden ir anclados al intradós (colgada del forjado), trasdós (apoyado en el forjado) o a la parte frontal de los forjados. A efectos de este análisis solo se han considerado las dos últimas opciones porque son las más comunes. Para estudiar este aspecto se ha partido del escenario de **FV** provisto con el detalle constructivo **Solución 2** que ha sido estudiado en el punto anterior. Se ha aplicado la hipótesis de fallo explicada anteriormente con el propósito de verificar el comportamiento de los elementos de fijación en las dos ubicaciones consideradas (Fig. 6.22).

Fijación apoyada

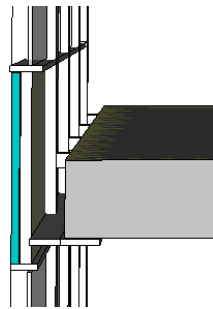
Fijación frontal

Gráficos de la simulación	Figuras 6.77
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.78

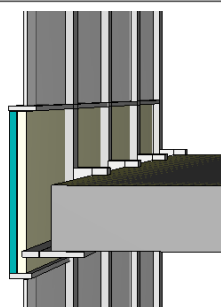
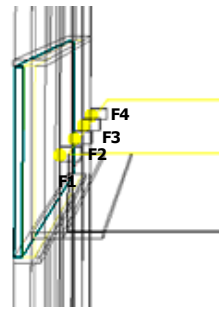
Los gráficos de la simulación aportan en este caso imágenes poco esclarecedoras debido al nivel de detalle necesario para observar esta situación. Sólo se puede apreciar que el fuego y el humo penetran a través de la brecha del elemento cortafuegos de la P1. Sin embargo, las curvas de temperatura permiten deducir algunos aspectos más concretos. Se aprecia una diferencia poco significativa en las temperaturas de los dos casos *fijación apoyada* y *fijación frontal*. Las temperaturas registradas en las *fijaciones frontales* son un poco más elevadas. De ello se deduce que las fijaciones situadas en esta posición podrían quedar más expuestas al fuego en la situación de que se ha planteado de penetración a través de la cavidad del encuentro forjado fachada.

Sistemas de fijación

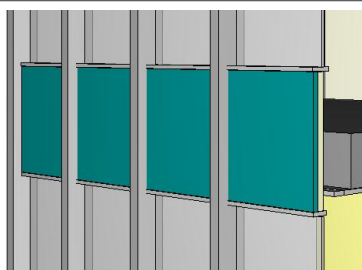
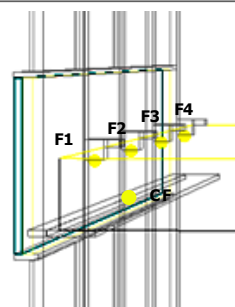
Solución 2



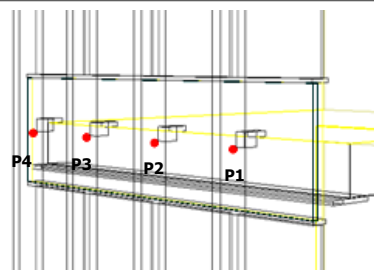
Fijación frontal



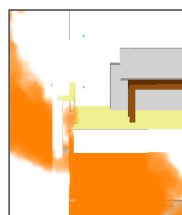
Fijación apoyada



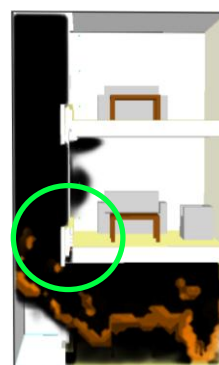
Perfiles estructurales



200 (s)



200 (s)



200 (s)



200 (s)

Fig. 6.77

Se ha asumido una hipótesis de fallo por desprendimiento de una pequeña pieza de la barrera cortafuegos Solución 2, con el fin de evaluar la posición de las fijaciones a partir de una situación desfavorable.

Perfiles estructurales y sistemas de fijación

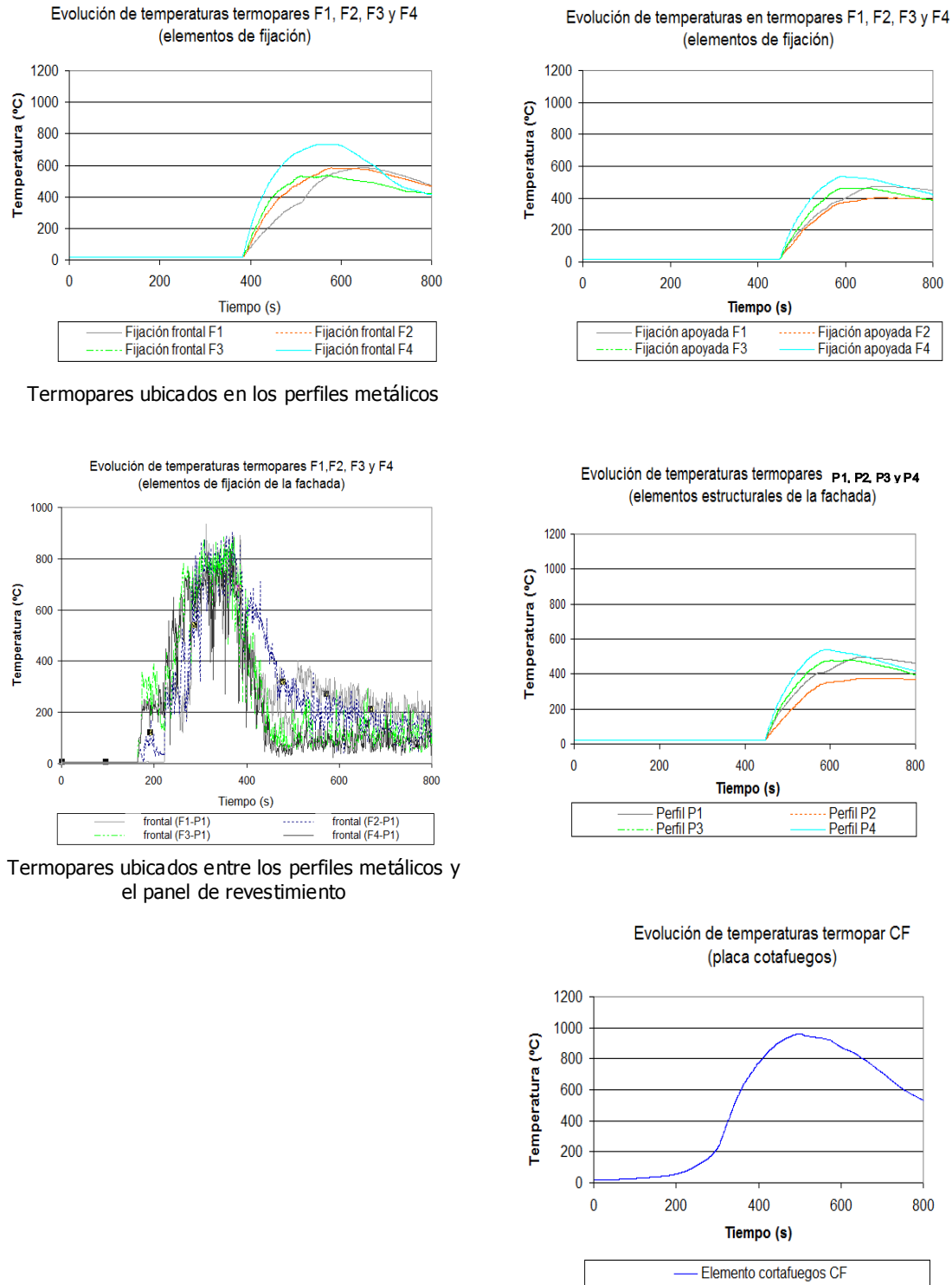


Fig. 6.78

Se ha podido observar que los elementos de fijación frontal son los que presentan mayor afectación, sin embargo la diferencia de temperaturas respecto los de fijación apoyada no es muy significativa.

Elementos de protección solar

Una característica representativa de las **FV** es la variedad de elementos complementarios que pueden tener ya sea por temas estéticos, técnicos o de control solar. Estos últimos pueden formar parte de las fachadas adoptando diferentes formas y sistemas. Generalmente estos elementos están contruidos en materiales metálicos ligeros y se sujetan directamente a la fachada mediante anclajes. El tipo de elemento de protección que se ha considerado a efectos de este análisis es el denominado *brise soleil*, el cual consiste en una segunda piel colocada sobre una fachada que por lo general es una **FV**. Está conformada por lamas, ya sean regulables o fijas, que se estructuran en un marco metálico que se une mediante fijaciones a la fachada. El propósito del *brise soleil* es controlar el paso de la luz solar al interior del edificio. La distancia entre lamas puede variar en función del diseño o las disposiciones técnicas relacionadas con el efecto del sol sobre la fachada.

El CTE no hace referencia en ninguno de sus apartados a este tipo de elementos constructivos, sin embargo, la Ordenanza Municipal de la ciudad de Barcelona, lo menciona en el apartado de sectorización Artículo 6º sección 6.4, y determina que este tipo de segunda piel debe tener como mínimo un 75% de su superficie abierta de forma permanente.

Teniendo en cuenta esta disposición de la Ordenanza Municipal de Barcelona se han considerado dos casos de estudio (Fig. 6.23).

FV+BS 1 (fachada de vidrio + *brise soleil* abierto el 75%)

FV+BS 2 (fachada de vidrio + *brise soleil* abierto el 92%)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.79
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.80

Según se aprecia en los gráficos, el principal inconveniente que presenta esta segunda piel de *brise soleil*, es que buena parte del penacho de fuego no se proyecta de forma natural hacia el exterior, sino que es condicionado por la presencia del elemento sobrepuesto generando un efecto de canalización que contribuye a una rápida propagación ascendente. Ocurre algo similar a lo que se da en las fachadas ventiladas sin compartimentación, solo que el tiro de aire en este caso es menor,

debido a que la diferencia de presiones entre la interfaz y el exterior también es menor. De igual modo se observa que la propagación a través de la interfaz de las dos pieles supera con claridad el alcance vertical del penacho de fuego.

El efecto del tiro de aire es más acusado en el caso **FV+BS 1** que en el caso **FV+BS 2**. Llama la atención observar que aunque en este último caso el porcentaje de apertura es muy grande, el efecto de canalización de la propagación continua siendo perceptible.

En las curvas comparativas se pueden apreciar en el caso **FV+BS 1** temperaturas ligeramente superiores sobre la superficie de la fachada de ambas plantas (termopares 1 y 3) y significativamente más elevadas en los termopares del interior de las **P1** y **P2** (termopares 2 y 4). Lo cual indica que la probabilidad de propagación a las plantas superiores sería considerablemente mayor en el caso **FV+BS 1**.

Elementos de protección solar

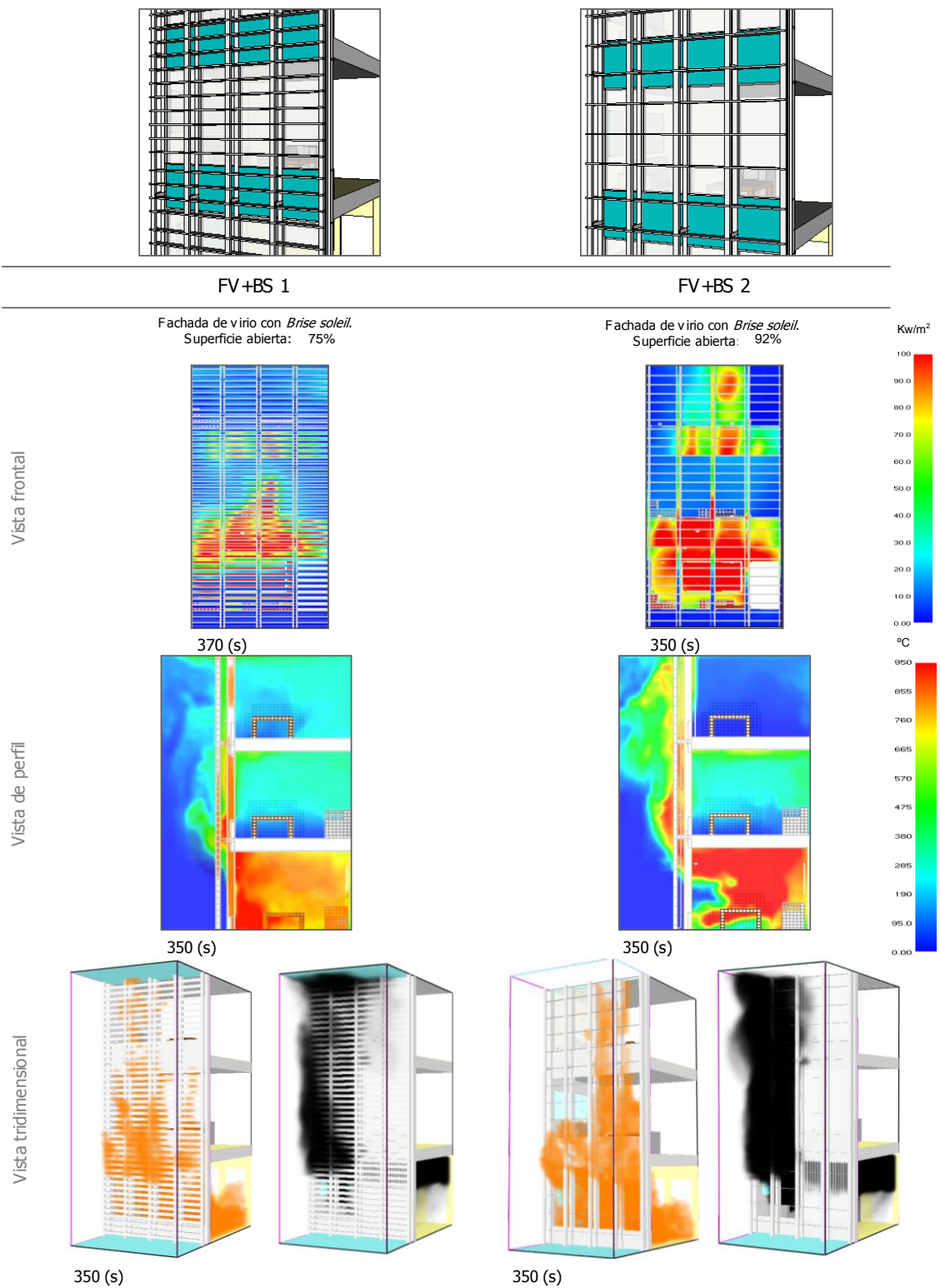


Fig. 6.79

Se aprecia que buena parte del penacho de fuego no se proyecta hacia el exterior, sino que se canaliza a través de la interfaz de las dos pieles de la fachada. Con el humo pasa algo similar.

Elementos de protección solar

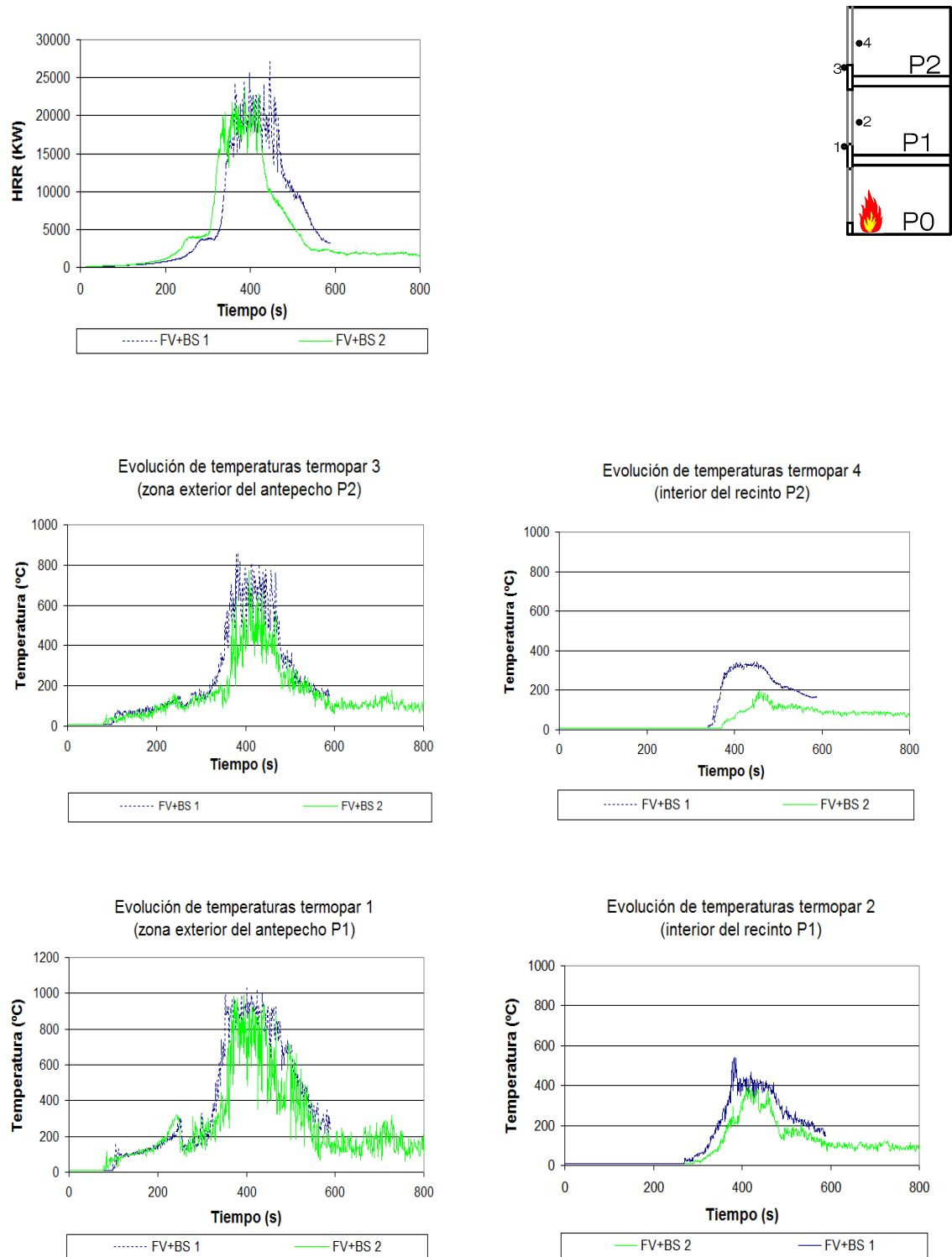


Fig. 6.80
 El efecto del tiro de aire es más acusado en el caso FV+BS 1. Las mayores diferencias se aprecian en los termopares que evalúan la probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores (termopares 2 y 4).

6.5.3 Factores Climatológicos

Los factores climatológicos tales como el viento, la temperatura, la humedad y la presión son aspectos de suma importancia en los procesos de combustión y propagación del fuego. Seguramente el más influyente es el viento; el comportamiento del fuego puede cambiar de forma radical e imprevisible en presencia de flujos de ventilación. Teniendo en cuenta la enorme complejidad de estos fenómenos y más aún si se asocian a otro igualmente complejo como el fuego, lo que se pretende en este punto es analizar situaciones puntuales de propagación del fuego bajo unas condiciones bien delimitadas con el fin de realizar consideraciones vinculadas al tema central del estudio.

Flujos de viento

Las observaciones en torno a este fenómeno se han realizado de acuerdo a siete casos en los cuales se combinan diferentes orientaciones y velocidades de viento, así como algunas tipologías de fachada (Fig. 6.24 y tabla 6.3). Todos los casos parten de unas condiciones comunes de temperatura ambiente y humedad relativa que se describen el siguiente cuadro:

Parámetros generales	
Temperatura °C	10
Humedad relativa %	50

Las primeras observaciones se pueden agrupar en los tres casos siguientes:

Ventilación 1		
Intensidad baja	Flujo a barlovento	0,5 m/s (1,8 k/h)
-	-	-

Ventilación 2		
Intensidad media	Flujo a barlovento	3,0 m/s (10,8 k/h)
Intensidad media	Flujo ascendente	2,0 m/s (7,2 k/h)

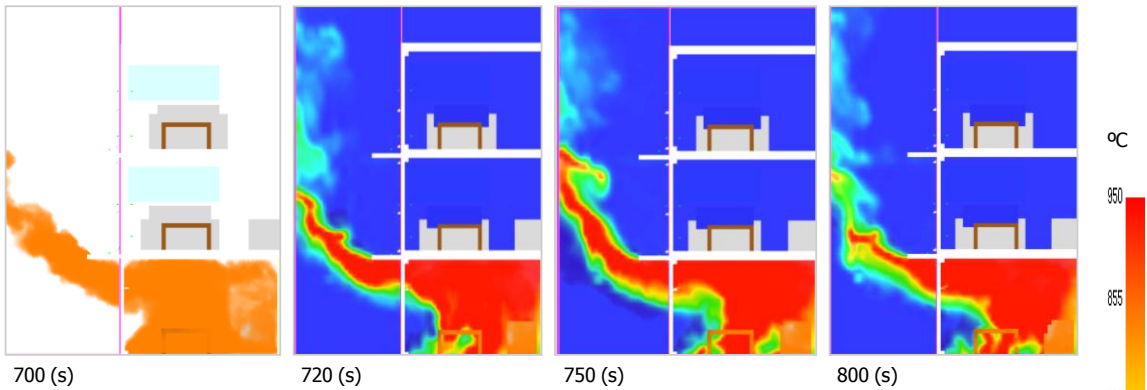
Ventilación 3		
Intensidad alta	Flujo a barlovento	6,0 m/s (21,6 k/h)
Intensidad media	-	3,0 m/s (10,8 k/h)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.81
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.83

Flujos ventilación (Fig. 6.24 y tabla 6.3)

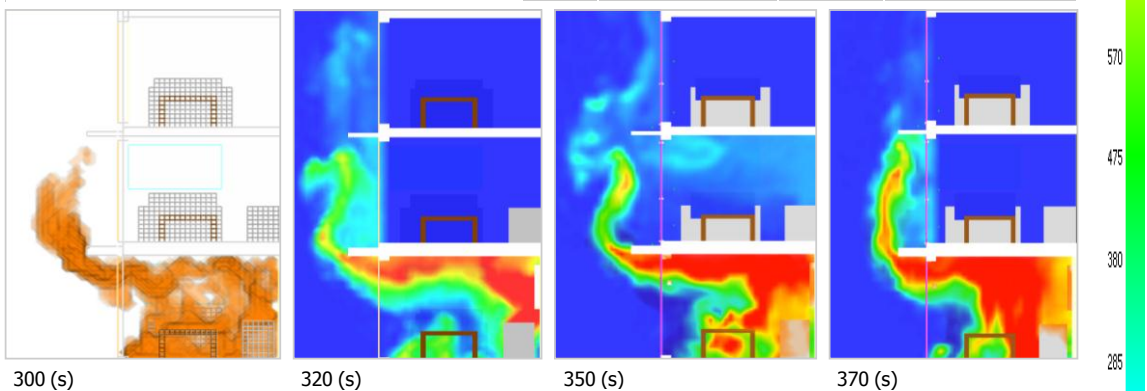
Ventilación 1 (Alero de 80 cm)

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Baja	Flujo a barlovento	→	0,5 m/s (1,8 k/h)
Humedad relativa %	50	-	-	-	-



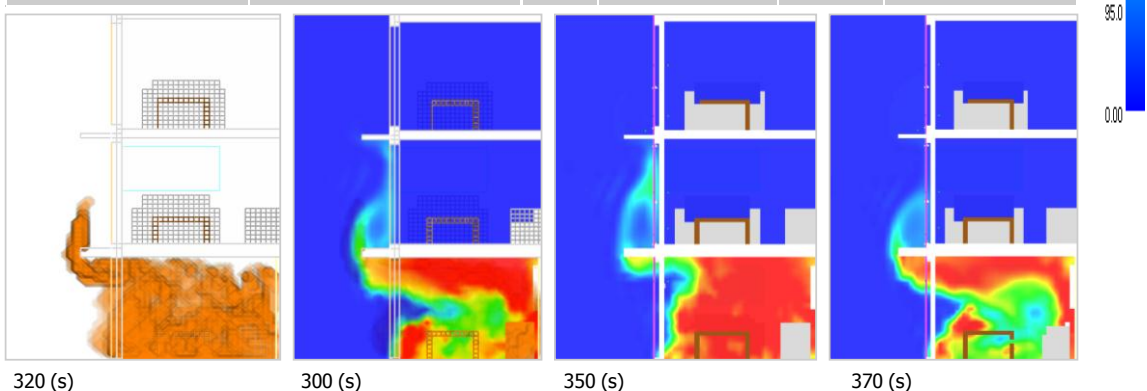
Ventilación 2 (Alero de 80 cm)

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Media	Flujo a barlovento	⇨	3,0 m/s (10,8 k/h)
Humedad relativa %	50	Media	Flujo ascendente	↑	2,0 m/s (7,2 k/h)



Ventilación 3 (Alero de 80 cm)

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Alta	Flujo a barlovento	⇨	6,0 m/s (21,6 k/h)
Humedad relativa %	50	Media	-	↑	3,0 m/s (10,8 k/h)



Comparativa de perfiles de distribución de temperaturas y extensión de las llamas en una fachada FOC con alero de 80 cm, con diferentes combinaciones de ventilación.

Fig. 6.81
Un flujo de viento moderado puede acelerar la propagación del fuego, pero un flujo de viento muy intenso puede minimizarla.

Estos tres casos han sido probados en un escenario **FOC** con alero de 80 cm, lo cual permite observar con más claridad el cambio de trayectoria del penacho de fuego y la influencia del viento sobre la capacidad de protección del alero. Según se aprecia en los gráficos el comportamiento del penacho de fuego puede variar considerablemente en función de los flujos de viento. En el caso **ventilación 1** se observa un penacho de fuego alargado y poco fluctuante. La influencia del viento en este caso resulta imperceptible debido a su poca intensidad. El alero condiciona la forma y la trayectoria del penacho de fuego la cual es dirigida hacia el exterior. Por lo tanto desde el punto de vista de la protección el alero cumple de forma óptima su papel de deflector de las llamas y del flujo de calor. Debido a esto la incidencia del flujo de calor sobre la fachada es mínima.

En el caso **ventilación 2** es apreciable la influencia del viento en el comportamiento del penacho de fuego. Se observa cierta perturbación en la trayectoria del fuego, lo cual repercute en el flujo de calor e incide de forma irregular sobre la fachada. El alero aunque sigue actuando como elemento deflector del fuego y el flujo de calor en este caso es menos efectivo que en el anterior.

En el caso **ventilación 3** encontramos una situación muy diferente a los casos anteriores, aunque de nuevo el factor dominante es el viento y esta vez de forma muy significativa¹⁶. Se aprecia una disminución general de la intensidad de la reacción tanto en el interior del recinto como en el penacho de fuego, el cual se torna pequeño. Sin embargo, por efecto del fuerte flujo de viento a barlovento el penacho de fuego toma una apariencia de chorro¹⁷, el flujo de calor se concentra sobre el alero y la fachada a la altura de la P1 incidiendo de forma permanente (termopar 1). La reducción del penacho de fuego es tal que no hay incidencia alguna sobre la P2.

¹⁶ Una serie de experimentos llevados a cabo por The National Research Council of Canada en 1958 tenía como objetivo estudiar la transmisión de calor por radiación de edificaciones con contenido y materiales de revestimiento combustibles. Los resultados indicaron que la radiación emitida a través de las ventanas era fuertemente dependiente de las condiciones de viento. Esta variable resultó ser más influyente en la propagación del fuego que el propio material de revestimiento combustible (Harmanty, 1979: 147).

¹⁷ En situaciones de flujo forzado las llamas tienen un comportamiento de chorro, el cual por lo general tienen un flujo convectivo más disperso y por tanto menos intenso Siegel (1969) (citado por Nyuk, 2000: 18).

En las curvas comparativas de las temperaturas también se aprecia el comportamiento antes descrito. Según se observa en las gráficas, en el caso **ventilación 1** la incidencia del flujo de calor sobre la superficie de la fachada es muy leve, no reviste un riesgo apreciable. En los casos **ventilación 2** y **ventilación 3** el comportamiento de fuego es más variable, lo cual hace perceptible que la propagación es alterada por un fenómeno aleatorio como el viento. En el caso **ventilación 2** se hace evidente el comportamiento fluctuante del penacho de fuego. Se observa un pico brusco de temperatura que coincide con el evento *flashover* seguido por picos de temperaturas bajas sobre la P1, mientras que sobre la P2 la incidencia es más regular y sobresaliente en relación a los otros casos. En el caso **ventilación 3** es muy evidente la influencia de los flujos de viento y en particular del viento de intensidad alta a barlovento. Como consecuencia de éste, el penacho de fuego y el flujo de calor son arrastrados sobre la superficie de la fachada a la altura de la P1. En la P2 la incidencia del flujo de calor es casi nula.

El segundo grupo de casos ha sido probado en escenarios con alero de 60 cm, por tanto los escenarios son similares a los casos anteriores. Las condiciones de ventilación son las siguientes:

Ventilación 4		
Intensidad baja	Flujo a barlovento	1,0 m/s (3,6 k/h)
Intensidad baja	Flujo ascendente	1,0 m/s (3,6 k/h)

Ventilación 5		
Intensidad media	Flujo a barlovento	3,0 m/s (10,8 k/h)
Intensidad alta	Flujo ascendente	6,0 m/s (21,6 k/h)

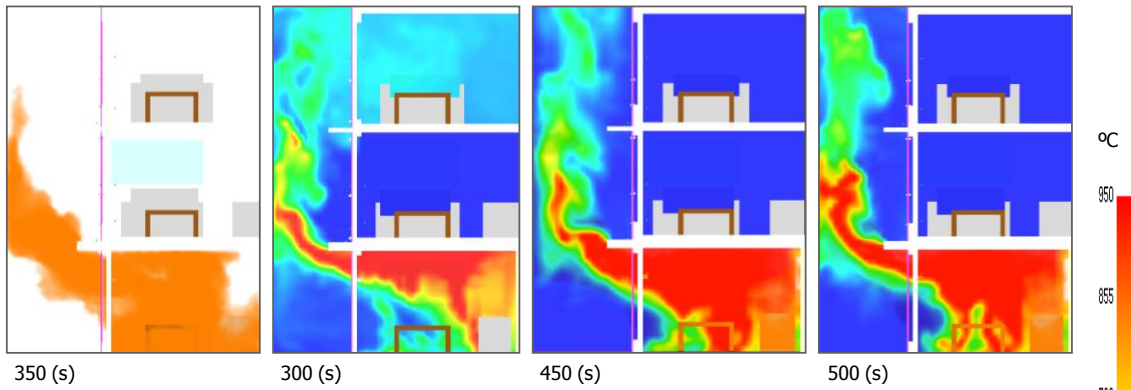
Ventilación 6		
Intensidad alta	Flujo lateral	4,0 m/s (14,4 k/h)
Intensidad media	-	-

Gráficos de la simulación	Figuras 6.82
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.83

Flujos de ventilación (Fig. 6.24 y tabla 6.3)

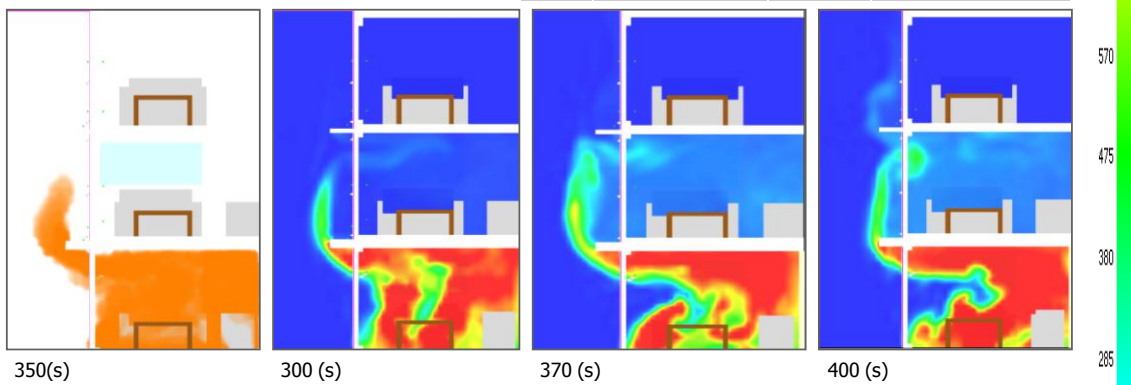
Ventilación 4 (Alero de 60 cm)

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Baja	Flujo a barlovento	→	1,0 m/s (3,6 k/h)
Humedad relativa %	50	Baja	Flujo ascendente	↑	1,0 m/s (3,6 k/h)



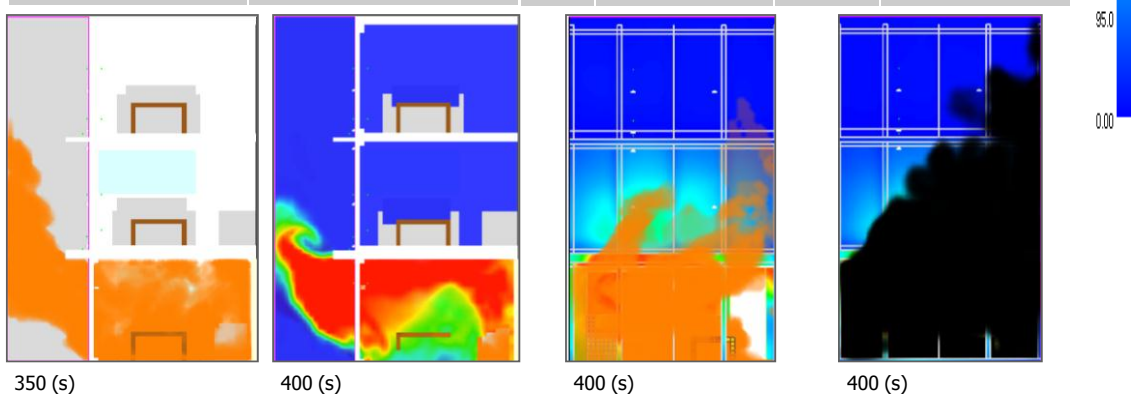
Ventilación 5 (Alero de 60 cm)

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Media	Flujo a barlovento	⇌	3,0 m/s (10,8 k/h)
Humedad relativa %	50	Alta	Flujo ascendente	↑	6,0 m/s (21,6 k/h)



Ventilación 6 (Alero de 60 cm)

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Alta	Flujo a barlovento	↺	4,0 m/s (14,4 k/h)
Humedad relativa %	50	Media	-	-	-

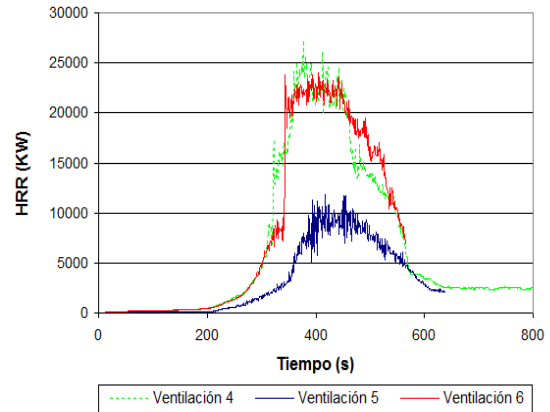
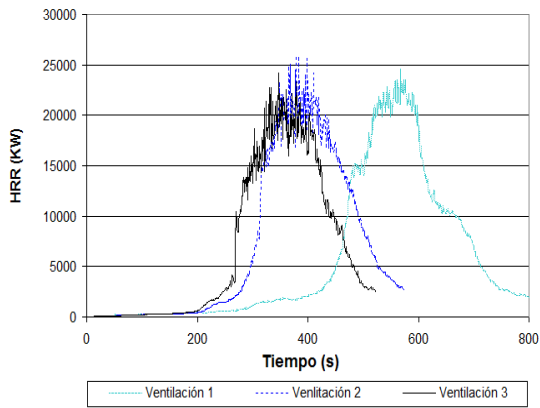
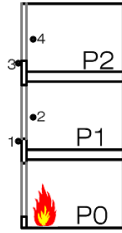


Comparativa de perfiles de distribución de temperaturas y extensión de las llamas en una fachada FOC con alero de 60 cm, con diferentes combinaciones de ventilación.

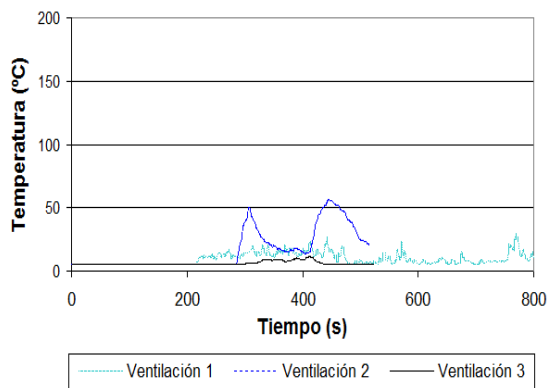
Fig. 6.82

Se puede observar la influencia de los diferentes flujos de ventilación aplicados a los escenarios.

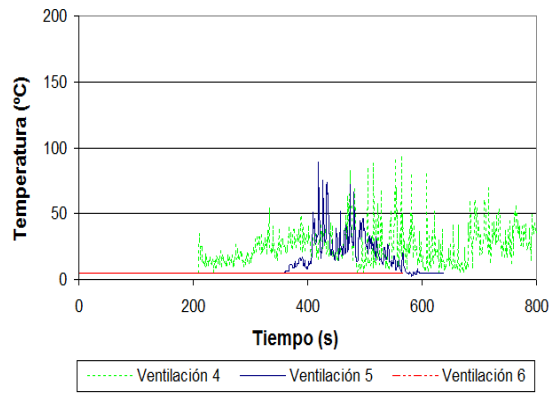
Flujos de viento



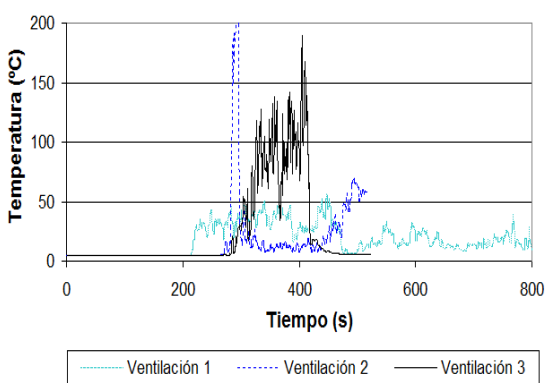
Evolución de temperaturas termopar 3
(zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 3
(zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 1
(zona exterior del antepecho P1)



Evolución de temperaturas termopar 1
(zona exterior del antepecho P1)

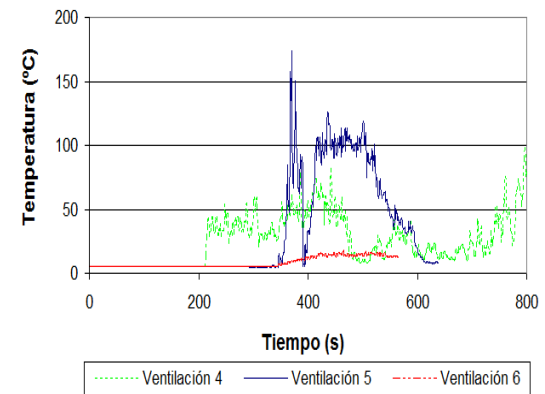


Fig. 6.83

Las curvas de temperatura reiteran lo observado en los gráficos de distribución de temperaturas. A mayor intensidad del viento menor intensidad del flujo de calor sobre la fachada.

En los gráficos de las simulaciones se aprecia que en el caso **ventilación 4** el penacho de fuego es fluctuante e intenso, pero el alero desvía su trayectoria hacia el exterior, por tanto su incidencia sobre la fachada es leve.

En el caso **ventilación 5** se aprecia un comportamiento similar al observado en el caso **ventilación 3**, sin embargo la diferencia principal radica en que el flujo de viento más intenso es ascendente y no a barlovento como en el caso anterior, por lo tanto en este caso no se observa que el viento arrastre el flujo de calor hacia la fachada, más bien se aprecia el efecto de chorro ascendente.

En relación al caso **ventilación 6** se puede observar una marcada influencia del flujo de viento lateral, por tanto la trayectoria del penacho de fuego es desviada fuera de la superficie de la fachada y la incidencia del flujo de calor sobre ésta es insustancial. Según se aprecia en las curvas de temperatura, el escenario en el cual se registran temperaturas de exposición más elevadas es el caso **ventilación 5**. Los flujos de viento combinados propician una mayor afectación del flujo de calor sobre la fachada. En el caso **ventilación 4** el penacho de fuego es más fluctuante e intenso, pero en este caso el alero desvía de forma efectiva el flujo de calor. El viento no ejerce una influencia importante sobre el flujo de calor.

El siguiente grupo de casos es una variante del primer grupo, solo que los flujos de viento han sido probados en escenarios con tipología **FOV** con el propósito de observar la influencia de los flujos de viento en sistemas con cámara ventilada.

Ventilación 1		
Intensidad baja	Flujo a barlovento	0,5 m/s (1,8 k/h)
-	-	-

Ventilación 4		
Intensidad baja	Flujo a barlovento	1,0 m/s (3,6 k/h)
Intensidad baja	Flujo ascendente	1,0 m/s (3,6 k/h)

Ventilación 7		
Intensidad baja	Flujo a barlovento	0,5 m/s (1,8 k/h)
Intensidad media	Flujo ascendente	2,0 m/s (7,2 k/h)

Gráficos de la simulación	Figuras 6.84
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.85

Según se aprecia en los gráficos, el viento es un factor que puede contribuir de forma importante en la intensidad de la propagación del fuego a través de la cámara ventilada. Por tanto las condiciones de flujo forzado tendrían que ser una variable a considerar en relación a esta vía de propagación del fuego.

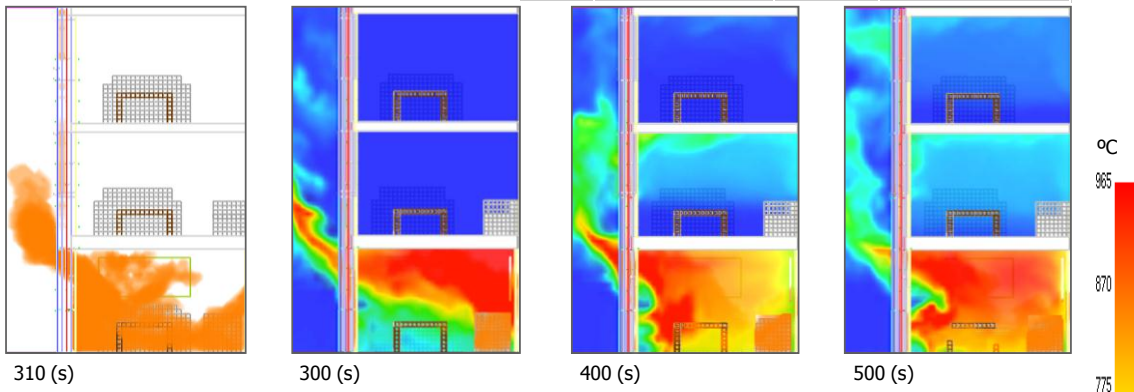
Al observar los tres casos se aprecia una progresión de menor a mayor intensidad en la propagación del fuego a medida que se incorpora un flujo de viento de mayor intensidad en el escenario. También se puede apreciar esta situación de forma muy clara en las curvas de velocidad de cesión del calor *HRR*.

De los tres casos considerados el que presenta la propagación menos intensa es el caso **ventilación 1** y el que presenta la propagación más intensa es el caso **ventilación 5**.

Flujos de viento (Fig. 6.24 y tabla 6.3)

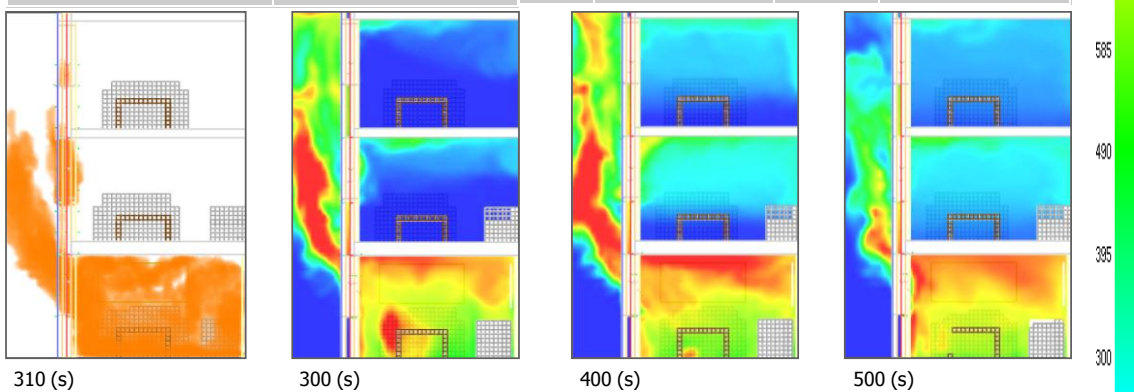
Ventilación 1 FOV

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Baja	Flujo a barlovento	→	0,5 m/s (1,8 k/h)
Humedad relativa %	50	-	-	-	-



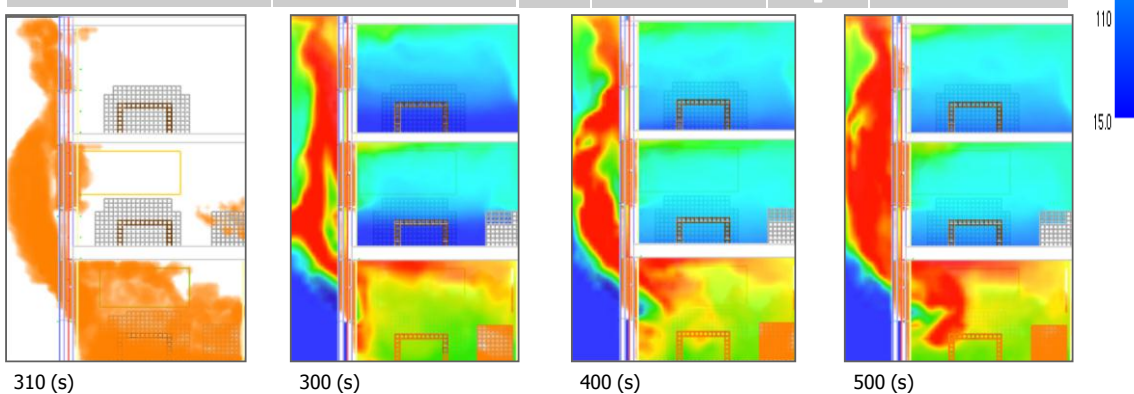
Ventilación 4 FOV

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Baja	Flujo a barlovento	→	1,0 m/s (3,6 k/h)
Humedad relativa %	50	Baja	Flujo ascendente	↑	1,0 m/s (3,6 k/h)



Ventilación 7 FOV

Parámetros generales		Intensidad del viento			
Temperatura °C	10	Baja	Flujo a barlovento	→	0,5 m/s (1,8 k/h)
Humedad relativa %	50	Media	Flujo ascendente	↑	2,0 m/s (7,2 k/h)

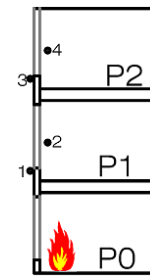
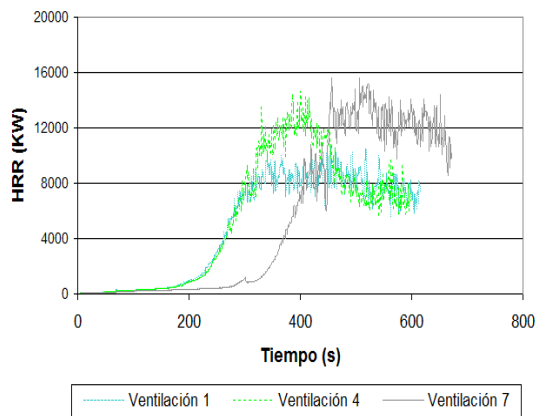


Nota: todas las fachadas FOV corresponden al caso 2 (cámara ventilada sin compartimentación). Según la tabla 6.1.

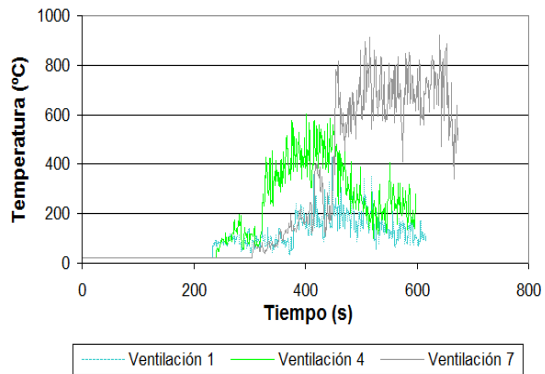
Fig. 6.84

Se aprecia el efecto de los diferentes flujos de ventilación en la propagación del fuego a través de la cámara ventilada. La propagación es más intensa con un flujo de ventilación medio.

Flujos de viento



Evolución de temperaturas termopar 3
(zona exterior del antepecho P2)



Evolución de temperaturas termopar 1
(zona exterior del antepecho P1)

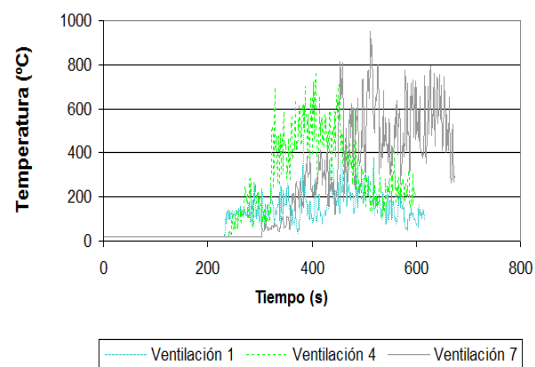


Fig. 6.85

De acuerdo a lo que muestran las curvas de temperatura se puede considerar que el viento es un factor que afecta de forma importante la propagación del fuego a través de las cámaras ventiladas.

Variables de temperatura y humedad

Estos factores aunque resultan menos influyentes que los flujos de viento, también tienen la capacidad de generar cambios en la evolución del fuego y su propagación. Según se ha explicado en la sección 4.1.6 el fenómeno del fuego es muy sensible a los factores atmosféricos y por esta misma razón determinar en qué forma pueden alterar su comportamiento resulta muy complejo, se tendría que estudiar considerando un amplio espectro de variables. Estos aspectos han sido estudiados a partir de dos condiciones climáticas básicas (Fig. 6.25 y tabla 6.4) y (Fig. 6.26 y tabla 6.5), correspondientes al invierno y al verano en dos tipos de escenarios diferentes:

FOC con alero de 15 cm

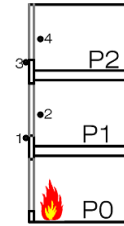
FOC con alero de 80 cm

Gráficos de la simulación	
Curvas comparativas de evolución de la temperatura y el HRR	Figuras 6.86

Los gráficos de simulación no se han tenido en cuenta pues se consideró que no aportan información relevante para los análisis. No obstante, las curvas de temperatura permiten realizar algunas consideraciones. En éstas se aprecia que en condiciones de flujo natural es decir, con unos flujos de viento leve. Una misma situación de propagación podría ser más intensa y ligeramente más rápida en las condiciones atmosféricas de verano. Esto se aprecia en el caso **condiciones climatológicas 1** en el cual la incidencia del flujo de calor sobre la fachada es más fuerte tanto en la P1 como en la P2 en las condiciones de verano.

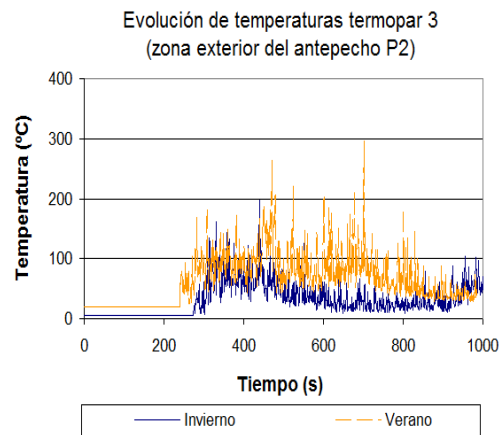
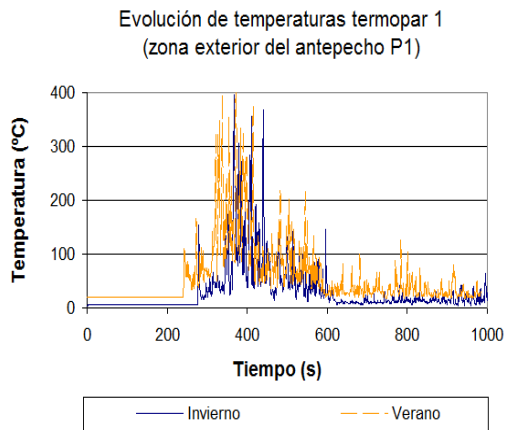
En el caso **condiciones climatológicas 2** se ha añadido una perturbación modificando las condiciones de ventilación. Aunque se ha pasado de unos flujos de viento de intensidad baja, a unos de intensidad media, los cambios que se aprecian en el comportamiento de fuego son significativos. El flujo de calor en ambas situaciones se torna fluctuante y por tanto resulta más difícil determinar cómo es el comportamiento de la propagación. De acuerdo a lo observado se ha podido comprobar la influencia que pueden ejercer los factores climatológicos sobre el comportamiento del fuego y en particular la importancia e influencia del factor de ventilación. Este factor puede eventualmente ser determinante en la trayectoria y evolución del fuego.

Condiciones de temperatura y humedad



Condiciones climatológicas 1 (Alero de 15 cm) (Fig. 6.25 y tabla 6.4)

	Verano	Invierno	Intensidad del viento			
Temperatura °C	25	5	Baja	Flujo a barlovento	→	1,0 m/s (3,6 k/h)
Humedad relativa %	90	70	Baja	Flujo ascendente	↑	1,0 m/s (3,6 k/h)



Condiciones climatológicas 2 (Alero de 80 cm) (Fig. 6.26 y tabla 6.5)

	Verano	Invierno	Intensidad del viento			
Temperatura °C	25	5	Baja	Flujo a barlovento	⇨	3,0 m/s (10,8 k/h)
Humedad relativa %	90	70	Baja	Flujo ascendente	↑	2,0 m/s (7,2 k/h)

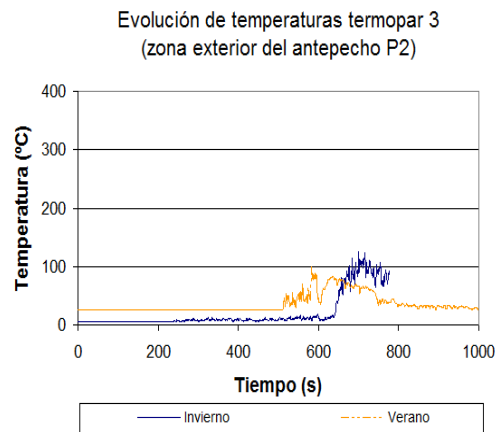
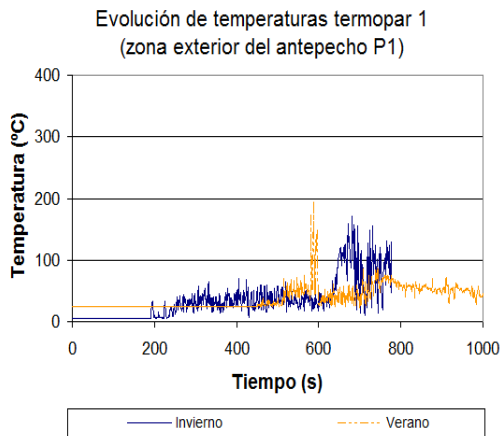


Fig. 6.86

El viento es un factor capaz de cambiar radicalmente el comportamiento del fuego. Este factor puede eventualmente ser determinante en la trayectoria y evolución del fuego.

6.6 Síntesis de la fase experimental

En este capítulo se han expuesto los resultados obtenidos a partir de las diferentes simulaciones de incendio realizadas y, de forma paralela, se han hecho las observaciones y los análisis correspondientes a cada caso estudiado.

Durante el desarrollo del capítulo se han explicado los criterios de evaluación propuestos, los parámetros definidos para los escenarios, así como las hipótesis planteadas para cada situación simulada. También se han realizado consideraciones en relación a la implementación de técnicas de simulación computacional de incendios para este caso de estudio en particular.

Los resultados se han de considerar aproximaciones con unos límites marcados por los parámetros de cada escenario. Las consideraciones realizadas en cada caso son fruto de la observación y contraste de resultados cualitativos y cuantitativos de los distintos escenarios probados. Para ello ha sido necesaria una fase previa de calibración de los mismos a fin de aproximarlos de forma razonable a una situación real. Durante este proceso ha sido de suma importancia el soporte técnico brindado por el personal experto del Laboratorio del Fuego de la EPSEB de la UPC.

El estudio no pretende ofrecer respuestas dogmáticas en referencia a la propagación exterior del fuego sino exponer un panorama de tendencias del comportamiento del fuego en relación a unas variables y parámetros determinados. Todo ello con el propósito de evaluar los posibles efectos del incendio, detectar situaciones de riesgo, considerar pautas de diseño orientadas a la prevención de la propagación exterior del fuego y evaluar algunas disposiciones de la normativa vigente CTE DB SI en relación a los casos tratados.

Tras analizar las simulaciones y contrastar los diferentes datos obtenidos se han podido realizar distintas consideraciones sobre el comportamiento del fuego en los distintos escenarios y constatar la importancia de algunos factores que, a priori, se asumieron como determinantes en las hipótesis de partida.

Esta síntesis del capítulo hace una rápida revisión de la fase experimental del estudio y recoge los aspectos más destacados de los resultados obtenidos. Según el esquema de la fase experimental del estudio (Fig. 6.1) este punto correspondería al paso

número 5. Se ha estructurado de acuerdo al orden definido en los aspectos de evaluación (apartado 6.3) y en los análisis presentados en la sección anterior, por tanto, se han agrupado en los tres grandes temas que estructuran los análisis y que a su vez contienen los distintos casos de estudio.

- (1) Configuración geométrica de las fachadas
- (2) Elementos constructivos de las fachadas
- (3) Factores climatológicos

❖ Configuración geométrica de las fachadas

Las deducciones más importantes de este estudio se derivan de la notable influencia de la configuración geométrica en el comportamiento del fuego. El factor geométrico es un concepto amplio, implícito en la configuración de las fachadas y de los elementos arquitectónicos que las componen; en este estudio ha sido considerado a partir de distintos planteamientos.

Geometría de las ventanas

- **Forma de las ventanas**

La configuración geométrica de las ventanas es un factor que puede influir significativamente en el tamaño, la trayectoria y la forma del penacho de fuego que se proyecta a través de las ventanas. También puede tener una influencia considerable en los procesos que intervienen en el desarrollo del incendio en el recinto como son: la velocidad de sesión del calor *HRR*, la velocidad de combustión y de pérdida de masa combustible. Tal influencia se explica por la importancia que tiene el factor de apertura o parámetro de ventilación (apartado 4.1.6), el cual está estrechamente relacionado con la configuración geométrica de las ventanas. La influencia de la geometría de las ventanas se ha estudiado a partir de tres formas distintas de ventana: ventana **Cuadrada**, ventana **PAV** y ventana **PAH** (Fig. 6.40 y Fig. 6.41).

Síntesis de resultados

Se ha podido observar un comportamiento diferenciado en relación a la trayectoria, forma y longitud del penacho de fuego, por lo tanto, se puede considerar que la forma que adoptan las llamas está directamente relacionada con la forma de la ventana por la cual se proyectan hacia el exterior.

En la ventana **cuadrada** se observa un penacho con una forma ligeramente curvilínea, que se ciñe a la superficie a intervalos irregulares. La ventana **PAV** presenta un penacho más alto, delgado e irregular; con menor tendencia a ceñirse a la superficie de la fachada. La ventana **PAH** genera un penacho con una forma inicialmente curvilínea y alejada de la fachada y posteriormente muy ceñida a ésta.

Consideraciones

De acuerdo a los resultados, la configuración **PAV** es la que presenta un penacho de fuego más alto y eventualmente más intenso; además, puede propiciar una propagación del fuego más rápida como consecuencia de su forma alargada. En esta misma configuración también se ha podido observar una mayor probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores a través de las ventanas, es decir, mediante el efecto *leap frog*. En contrapartida, la menor probabilidad de penetración a otras plantas ocurre con la configuración **PAH**, lo cual resulta razonable teniendo en cuenta que tiene una altura de apertura reducida y una franja de separación vertical mayor respecto a las otras configuraciones. Es importante resaltar que el factor de forma en el caso con ventanas **PAH**, aunque limita la altura de la propagación, no limita significativamente la descarga de las llamas y la masa de flujo de calor emitido.

- **Tamaño de las ventanas**

El tamaño de las ventanas es quizás uno de los aspectos que incide de forma más clara en la propagación del fuego a través de las fachadas. Tal como ocurre con la forma de las ventanas, su influencia sobre las condiciones del incendio y la propagación de las llamas está definida por el denominado factor de apertura. Es por esto que una buena parte de los estudios científicos de referencia en el tema (varios de estos mencionados en los capítulos 2 y 4) se centran en la comprensión de los aspectos involucrados en este factor y en la formulación de modelos para establecer coeficientes de ventilación de referencia. En general, la configuración geométrica de las ventanas (forma y tamaño) tiene un efecto importante sobre la descarga del penacho de fuego a través de las ventanas, no obstante, el contraste más marcado de dicha afectación se aprecia al considerar diferentes tamaños de ventanas.

El flujo de aire fresco que entra y los gases calientes que salen varían en función del factor de apertura o de ventilación, lo cual explica que el fuego proveniente de una ventana pequeña y una grande sean muy diferentes.

La influencia del factor de ventilación se puede apreciar de forma clara en la comparativa de los tres tamaños de ventana considerados: ventana **tipo**, ventana **grande** y ventana **corrida** (Fig. 6.42 y Fig. 6.43).

Síntesis de resultados

Se ha podido observar que en los recintos con las ventanas **grande** y **corrida** la evolución del fuego ocurre de forma más rápida e intensa, en especial con la configuración de ventana **corrida**. El tamaño del penacho de fuego es directamente proporcional al tamaño de las ventanas por las cuales emerge, por lo tanto, las fachadas con ventanas grandes representan un mayor peligro, tanto por el tamaño del penacho y la incidencia del flujo de calor sobre la fachada, como por la elevada probabilidad de propagación a las plantas superiores. Las temperaturas registradas en la configuración de fachada con ventana **tipo** muestran menor intensidad y rapidez de la propagación en comparación a lo que ocurre con las otras dos configuraciones. También en esta configuración de ventana el grado de probabilidad de propagación a las plantas superiores es notablemente inferior, aunque no es descartable.

Consideraciones

De lo anterior se derivan algunos aspectos importantes a tener en cuenta en relación a la seguridad de los ocupantes. En situaciones de incendio con reacciones rápidas, debidas a la gran aportación de oxígeno en el recinto (factor de apertura alto), la disipación térmica y la evacuación de humos es muy efectiva, pero la velocidad de combustión y de diseminación de las llamas es muy rápida. En una situación así, el principal problema para la seguridad lo constituye el corto tiempo del cual se dispone para la evacuación y rescate de víctimas. En un caso de incendio con menor nivel de ventilación (factor de apertura bajo) se da una velocidad de combustión más lenta, pero la disipación térmica y la evacuación de humos son más precarios, lo cual producirá una creciente acumulación de calor y humos en el interior del recinto. Si se consideran los efectos de la propagación del fuego sobre la superficie de la fachada y la probabilidad de propagación del fuego a las plantas superiores, se podría afirmar que conviene controlar el tamaño de las aperturas de las ventanas.

También es importante considerar que durante una situación de propagación exterior del fuego, las ventanas del recinto del incendio se convierten en grandes emisores de calor por radiación. Lo cual constituye un riesgo mayor si las ventanas son grandes. En este sentido la distancia entre edificaciones (apartado 3.5.1) es de suma importancia.

El calor transmitido a la superficie de la fachada depende tanto de la velocidad de cesión del calor HRR como de las dimensiones y la geometría de las ventanas.

- **Espesor de los muros de cerramiento**

Este aspecto geométrico podría pasar desapercibido, de hecho, dentro de la información de referencia recabada no se encontró ningún estudio que tratara este aspecto. No obstante se consideró importante, puesto que es una característica geométrica estrechamente relacionada con las ventanas, las cuales son fundamentales respecto al tema central del estudio. Además es un aspecto muy ligado al diseño de las fachadas y que podría variar no sólo en función de criterios estéticos y constructivos, sino también de protección y prevención contra la propagación del fuego. Los espesores de los muros de cerramiento que se han considerado son: $E=24$ cm y $E=41$ cm (Fig. 6.44 y Fig. 6.45).

Síntesis de resultados

De acuerdo a los gráficos en el escenario con muro de **24** cm la forma del penacho de fuego es alargada y ligeramente curvilínea y su trayectoria predominante es cercana a la fachada aunque no ceñida del todo a ésta. En el escenario de muro de **41** cm la forma del pecho de fuego describe una curva más pronunciada y por ello su trayectoria predominante es más alejada de la superficie de la fachada.

Esta situación también se aprecia claramente en los gráficos que muestran la distribución del flujo de calor sobre la fachada (vista frontal). La incidencia del flujo de calor sobre la fachada con muro de espesor de **24** cm es mayor a la que se da en la fachada con muro de **41** cm. Esto indica que en este último caso el capialzado de la ventana cumple una función de elemento deflector que desvía ligeramente la trayectoria de las llamas y esto repercute en una disminución del flujo de calor sobre la fachada.

Consideraciones

Algunos aspectos relacionados con el factor geométrico de la fachada son tan cotidianos que pueden que parecer poco influyentes en la propagación exterior del fuego. El espesor de los muros de cerramiento en apariencia no es una variable que permita sacar conclusiones muy rotundas, sin embargo los resultado que se han

observado son de interés y llevan a reflexionar sobre la importancia que pueden tener algunos aspectos simples del diseño de la fachada en la propagación del fuego.

Elementos salientes

Los elementos salientes de las fachadas constituyen uno de los factores geométricos que puede afectar de forma más clara la propagación exterior del fuego. Esto tiene especial sentido si se tiene en cuenta que el fenómeno del fuego se estudia desde la dinámica de fluidos, y por lo tanto, todo elemento o cuerpo saliente representa un obstáculo que condiciona de una u otra manera la difusión de las llamas y del flujo de calor. Esto tiene un particular interés al considerar las fachadas de los edificios, cuyo diseño en sí mismo, contiene elementos salientes de diferentes características, ya sean en forma de aleros, alféizares, balcones, retranqueos, elementos de control solar, elementos ornamentales, elementos estructurales etc.

En general, los elementos salientes se pueden considerar “deflectores” del flujo de calor y las llamas, en la medida que cambian la trayectoria del penacho de fuego que emerge a través de las ventanas. Esta situación podría ser más o menos favorable dependiendo del tipo de elemento saliente, de su ubicación respecto a las aberturas de las ventanas y de su tamaño.

- **Tipos de elementos salientes**

La configuración de los elementos salientes de las fachadas puede definir la tendencia de la propagación del fuego, para observar estas condiciones de propagación se han considerado los siguientes tipos de elementos salientes: **alero**, **parteluces** y **trama** (Fig. 6.46 y Fig. 6.47).

Síntesis de resultados

En relación a los tipos de elementos salientes se ha podido observar que los elementos salientes horizontales como el **alero** tienden a desviar el penacho de fuego hacia el exterior de la fachada, mientras que los elementos verticales tipo **parteluces** tienden a concentrarlo y canalizarlo, acumulando altas temperaturas sobre la superficie de la fachada. Los elementos que tienen los dos componentes y que se han denominado **trama** (en este estudio), no canalizan el flujo de calor como ocurre con los parteluces, pero tampoco lo desvían claramente hacia el exterior como ocurre con el **alero**. El penacho del fuego presenta un comportamiento más irregular y fluctuante.

Es importante considerar que las fluctuaciones pueden ser más acusadas en presencia de flujos de viento. Por tanto, se podría considerar que estos dan lugar a un mayor nivel de incertidumbre en el comportamiento del penacho de fuego.

Consideraciones

La presencia elementos salientes en la fachada, ya sean horizontales o verticales, pueden generar cambios en la trayectoria del fuego y a su vez influir en el régimen de su flujo y la velocidad de propagación. De manera que, pueden tanto evitar como facilitar la propagación del fuego dependiendo del tipo de elemento saliente y de su tamaño.

De acuerdo a los resultados los elementos que pueden presentar peor comportamiento son aquellos que actúan como “canales” debido a que facilitan la propagación del fuego. En el estudio se ha observado esta situación considerando dos elementos que sobresalen 40 cm de la fachada, uno a cada lado de las ventanas en toda su altura, no obstante, esta misma configuración geométrica puede ser recurrente en los diseños de las fachadas mediante retranqueos o por la proximidad de cuerpos salientes sobre la superficie de la fachada.

- **Ubicación de los aleros**

De los tres tipos de elementos salientes analizados antes, se ha tomado el **alero** para revisar la ubicación del elemento saliente, respecto a la franja de separación vertical entre ventanas de una planta a otra. Las opciones comparadas son: **A** (ubicado en el alfeizar de la ventana), **M** (ubicado en medio de la franja de 1 m) y **D** (ubicado en el dintel de la ventana) (Fig. 6.48 y Fig. 6.49).

Síntesis de resultados

De acuerdo a lo observado en los análisis se podría considerar que la ubicación **A** es la más desfavorable. La trayectoria de las llamas y del flujo de calor es desviada de forma leve y tardía y por lo tanto la superficie de la fachada queda sometida a una fuerte exposición de llamas y flujo de calor. El alero con ubicación **M** tiene un mejor comportamiento respecto al anterior, sin embargo la incidencia de las llamas sobre la superficie de la fachada continúa siendo importante. El flujo de calor es más fluctuante e irregular respecto a las otras dos opciones. Se podría considerar que la ubicación **D** es la más favorable, en los gráficos se puede apreciar como el alero en esta posición desvía de forma más clara y efectiva la trayectoria del fuego.

Consideraciones

El CTE en su documento básico SI 2 [4] hace referencia a la implementación de elementos salientes como opción complementaria a la franja de 1 m, la cual es exigida para limitar la propagación exterior y vertical del fuego. Sin embargo, no hace ninguna consideración sobre la ubicación que puede tener dicho elemento saliente respecto a la configuración de la fachada. Teniendo en cuenta lo que se ha podido observar en los resultados, la ubicación de los elementos salientes puede ser un aspecto relevante a considerar en una situación de propagación exterior del fuego.

En este mismo apartado del CTE (ver apartado 3.5.1) la normativa ilustra mediante un dibujo dicha exigencia de protección. El dibujo muestra un segmento de fachada con un elemento saliente ubicado en medio de la franja (ubicación **M**), teniendo en cuenta que en el texto de la norma no se hace referencia de este hecho, quizás se trate de un detalle fortuito, sin embargo se considera que este dibujo podría inducir a errores de interpretación.

Cabe añadir a estas consideraciones que el nivel de protección que puede ofrecer un elemento saliente frente a la propagación vertical del fuego también está relacionado con factores tales como: la carga de fuego del recinto del incendio, la velocidad de cesión del calor *HRR*, el tamaño y forma de las aberturas por las cuales emerge el fuego y muy especialmente del tamaño de vuelo del propio elemento saliente, de lo cual se hablará a continuación.

- **Tamaño de los aleros**

El tamaño de un alero es el parámetro que mejor define su capacidad para desviar la trayectoria de las llamas, por tal motivo se ha estudiado este aspecto comparando seis tamaños diferentes de vuelo: 15, 25, 40, 60, 80 y 150 cm (Fig. 6.50 a Fig. 6.53). Se ha realizado la “compensación” del alero respecto a la franja (a excepción de los aleros de 80 y 150 cm) de tal manera que la suma de ambos elementos sea siempre 1 m de acuerdo a lo estipulado por el CTE SI parte 2 [4].

Síntesis de resultados

Se ha podido observar que los elementos salientes de 15, 25 y 40 cm de tamaño desvían levemente hacia el exterior la trayectoria de las llamas, por tanto el flujo de calor transferido por el penacho de fuego permanece muy cercano a la superficie de la fachada. La incidencia del flujo de calor, pese al efecto causado por el elemento saliente en la trayectoria, es muy alta, por lo tanto, no se descarta que pueda propagarse el fuego a las plantas superiores mediante el efecto *leap frog*.

Los elementos salientes a partir de 60 cm de vuelo desvían con mayor efectividad el flujo de calor y las llamas, no obstante la superficie de la fachada podría estar expuesta a un elevado flujo de calor. Un elemento de 80 cm de vuelo o más, no solo puede desviar adecuadamente la trayectoria de las llamas, sino que puede reducir la exposición del flujo de calor y brindar una aceptable de protección, reduciendo también la probabilidad de rotura de las ventanas y penetración del fuego a las plantas superiores.

Consideraciones

Según se ha podido observar, los aleros pueden ser una excelente opción a considerar en el diseño de las fachadas como medida de protección pasiva. Es importante tomar en consideración que si los aleros no tienen un tamaño de vuelo suficiente para desviar con claridad la trayectoria del fuego, podrían generar perturbaciones en su flujo haciendo más imprevisible su trayectoria. En presencia de flujos de viento esta fluctuación puede ser más manifiesta.

Los aleros implementados con propósitos de protección frente a la propagación exterior deben cumplir con unas especificaciones en relación a su resistencia, la clasificación de reacción de los materiales y el tipo de fijación (si se trata de elementos exentos de la estructura principal del edificio) con el fin de que sean elementos aptos para desempeñar la función de protección frente al fuego. Aunque el tamaño de los aleros es uno de los aspectos determinantes de su capacidad para cambiar la trayectoria del fuego, es importante tener en cuenta que su capacidad como elemento de protección puede cambiar en función de los aspectos mencionados en las consideraciones del punto anterior y también de los factores climatológicos y los materiales de revestimiento de las fachada, tal como se ha podido observar en las simulaciones que consideran estos aspectos.

En referencia a los aleros de tamaño superior a 80 cm es importante tener en cuenta dos aspectos: (1) la disipación térmica del recinto del incendio podría ocurrir con mayor dificultad debido al efecto que causa el alero en la descarga de las llamas. (2) es conveniente considerar con atención la distancia con las edificaciones colindantes, el efecto del alero sobre el penacho del fuego puede poner en riesgo de propagación las edificaciones vecinas, en particular las ubicadas frente al edificio.

Disposiciones de la normativa relacionadas con la geometría de las fachadas

- **Separación horizontal**

El CTE en su documento básico SI sección 2 [3] contempla unas distancias mínimas entre aquellos elementos que no sean al menos EI 60 (aberturas de ventanas) para reducir el riesgo de propagación horizontal exterior del fuego entre sectores de incendio (apartado 3.5.1).

En referencia a la propagación horizontal del fuego se ha estudiado la opción que contempla una franja de separación entre sectores ubicados a 180° (uno al lado del otro). La distancia estipulada por la norma entre puntos de la fachada que no sean al menos EI 60 (aberturas de ventanas o puertas) es de 50 cm. Este caso se ha estudiado a partir de tres escenarios distintos, la variable principal en los tres casos ha sido el tamaño y forma de las ventanas. Uno de los escenarios se ha implementado con un sistema de fachada ventilada **FOV** con el propósito de evaluar, además de la posible propagación horizontal a través de las ventanas, la probabilidad de que ocurra una propagación a través de la cámara ventilada (Fig. 6.54 y Fig. 6.55).

Síntesis de resultados

Aunque se ha apreciado una propagación vertical del fuego considerable en los tres escenarios probados, ésta no ha sido suficiente para incidir en el alcance horizontal del flujo de calor sobre la fachada. En el caso de la fachada ventilada, pese a que se produce la propagación a través de la cámara, no propicia la propagación horizontal del fuego. Esto se explica a partir de los mecanismos que gobiernan el fenómeno de la propagación vertical (apartado 4.3).

Consideraciones

Según los resultados obtenidos se ha encontrado que la distancia de 50 cm propuesta por la normativa, que a priori se consideraba insuficiente, es efectiva en su propósito de evitar la propagación horizontal del fuego de un sector a otro.

- **Separación vertical** (franjas de 1 m)

El CTE DB SI sección 2 [4] estipula una medida generalizada de protección frente a la propagación vertical exterior del fuego, la cual consiste en interponer una franja de 1 m (EI 60) de separación de una planta del edificio a otra. Sin embargo, se trata de una medida muy general que no hace ninguna referencia a tipologías de fachada, configuraciones de ventanas, elementos arquitectónicos, etc. Además tiene repercusión en la configuración geométrica de las fachadas y en los métodos de construcción, por ello constituye un asunto de estudio con particular interés. La escasa información que ofrece la normativa en torno a este tipo de medidas de protección y las paradojas constructivas a las que puede dar lugar en ciertos casos representaron en su día una de las motivaciones principales para llevar a cabo este estudio (Fig. 6.56 y Fig. 6.57).

Consideraciones

De acuerdo a lo observado en los resultados, se puede considerar que aplicar una medida de protección genérica en relación a un fenómeno que evoluciona aleatoriamente en función de tantos factores puede no ser fiable en todos los casos. Por ello este estudio se permite plantear una duda respecto a la efectividad de la franja para controlar la propagación vertical del fuego.

Si consideramos las observaciones realizadas en torno al tamaño de las ventanas, (Fig. 6.42 y Fig. 6.43) tendremos una situación que relativiza en gran medida la efectividad de la franja de 1 m. En las fachadas cuyas ventanas no superan los 3 m² de superficie de apertura (ventanas **tipo** según este estudio), y por lo tanto su factor de apertura es reducido, la franja de 1 m se podría considerar una medida válida como atenuante de la propagación del fuego. Sin embargo en las fachadas cuyas ventanas son grandes o corridas, la franja podría pasar a ser un elemento insuficiente, puesto que en estos casos el flujo de calor y la propagación de las llamas son mucho más violentos.

En el mismo párrafo la normativa (CTE) añade que la franja de 1 m (EI 60) puede reducirse en la dimensión de un elemento saliente apto para impedir el paso de las llamas, es decir, que el elemento vertical (franja) puede ser compensado con uno horizontal (alero) siempre que la suma de ambos sea como mínimo 1 m [4]. Con esto la normativa nos sugiere que el elemento vertical y el horizontal tienen un comportamiento equivalente. De acuerdo a lo que se ha podido observar en los resultados de las simulaciones, considerar que estos dos elementos tienen un papel equiparable frente a la propagación exterior de fuego podría ser del todo incorrecto, y además puede inducir a errores de interpretación en el diseño arquitectónico de las fachadas. Un elemento horizontal (alero) puede considerarse un obstáculo capaz de cambiar la trayectoria del fuego, mientras que un elemento vertical tan solo puede atenuar la incidencia del fuego sobre la fachada.

La comparativa realizada para contrastar el papel de la franja de 1 m respecto al de los aleros de 15, 25 y 40 cm y también de 60, 80 y 150 cm, ha permitido observar que efectivamente el desempeño de uno y otro son muy distintos. (Fig. 6.56 y Fig. 6.57). Se aprecia que aun los aleros de 25 y 40 cm ofrecen un nivel de protección superior frente a la propagación del fuego que la franja de 1 m. Sólo que, debido a su tamaño, el nivel de protección que ofrecen estos elementos es insuficiente. Como se mencionó antes, los aleros que se podrían considerar apropiados para evitar la propagación del fuego deben tener un tamaño superior o igual a 80 cm de vuelo.

- **Ubicación de la franja respecto al forjado**

Continuando con aspectos sobre la franja de 1 m, se ha querido evaluar la repercusión que puede tener el cambio de posición de la franja respecto al forjado. Esta situación se ha estudiado a partir de tres posiciones diferentes: **posición 1** (la mayor parte de la franja como antepecho), **posición 2** (la franja repartida proporcionalmente como alféizar en una planta y antepecho en la planta siguiente) y **posición 3** (la mayor parte de la franja como capialzado) (Fig. 6.58 y Fig. 6.59).

Síntesis de resultados

Los resultados son menos rotundos de lo esperado. No obstante, en todas las simulaciones realizadas la **posición 1** se presenta como la más desfavorable, la propagación vertical a las plantas superiores podría ser más rápida e intensa. En los otros dos casos (**posición 2 y 3**) los resultados son muy similares, su principal característica está marcada por un penacho más irregular y con una forma marcadamente curvilínea, provocada por el obstáculo geométrico que constituye en capitalizado.

- **Soluciones singulares**

Para cerrar las pruebas de simulación relacionadas con la franja de 1 m se han probado dos interesantes soluciones de fachada basadas en la geometría, las cuales se han denominado soluciones singulares (Fig. 6.60 y Fig. 6.61). Se trata proyectos reales construidos en Barcelona y Madrid. Estas propuestas constructivas ejemplifican una manera de resolver la franja de 1 m estipulada por la normativa desde la coherencia y las buenas prácticas constructivas. A grandes rasgos estos dos ejemplos consisten en la implementación de elementos constructivos resistentes al fuego, los cuales mediante su forma geométrica actúan como deflectores integrados a la fachada. En ambos casos la fachada es tipo muro cortina **FV** (fachada de vidrio).

Síntesis de resultados

Los resultados obtenidos para los dos ejemplos estudiados son óptimos. La solución geométrica planteada como franja de 1 m y justificada debidamente ante los organismos competentes desvía convenientemente la trayectoria del flujo de calor evitando la propagación a las plantas superiores.

Consideraciones

Este tipo de ejemplos puede dar lugar a considerar opciones originales, estéticamente agradables, técnicamente óptimas y sin perder la perspectiva frente a la prevención y la protección contra la propagación exterior del fuego.

- ❖ **Elementos constructivos de las fachadas**

Estos análisis hacen referencia a las tipologías de fachada **FOV**, **FV** y **FV+BS**. En este tipo de fachadas los aspectos relacionados con altas temperaturas, fuego y propagación del incendio ponen en evidencia sus puntos más vulnerables.

Los análisis se han centrado en la configuración y disposición de los elementos constructivos en el sistema de fachada que conforman, lo cual en definitiva es un asunto relacionado con el factor geométrico. Se han considerado algunas hipótesis relacionadas con el desprendimiento de piezas y el fallo de elementos por efecto de las altas temperaturas con el propósito de observar eventuales rutas de propagación y las temperaturas a las que pueden quedar expuestos los elementos que componen la subestructura de las fachadas.

Cámara ventilada y subestructura de la fachada

- **Cámara ventilada sin compartimentar y cámara ventilada compartimentada**

Para estudiar estos aspectos relacionados con las fachadas ventiladas se han considerado cinco casos cuyas características se han especificado en la tabla 6.1 (Fig. 6.63 a Fig. 6.70).

Síntesis de resultados

En los **casos 1 y 2** (cámara sin compartimentación) los resultados observados ponen de manifiesto que la cámara ventilada sin compartimentación puede constituir una rápida vía de propagación vertical del fuego y de penetración de las llamas a las plantas superiores del edificio tanto si el aislamiento térmico alojado en la cámara es combustible o incombustible. No obstante, un material de aislamiento térmico combustible (Clasificación C o inferior) puede aumentar de forma significativa la intensidad del flujo de calor y la velocidad de propagación del fuego.

Otra situación que es importante atender respecto a este tipo de propagación es el peligro al que puede quedar expuesta la subestructura metálica de la fachada. Los termopares ubicados en los elementos estructurales de la fachada (en el interior de la cámara) han registrado para estos **casos 1 y 2** temperaturas con picos máximos en torno a los 1000 y 800°C respectivamente, lo que podría dar lugar a una situación de colapso de la estructura si se tiene en cuenta que los materiales empleados para este tipo de elementos estructurales son generalmente metales como el aluminio o el acero.

Los **casos 3 y 4** corresponden a casos de fachada ventilada con cámara compartimentada mediante dos sistemas diferentes: el **caso 3** mediante cortafuegos en el interior de la cámara en cada planta y el **caso 4** mediante elementos cortafuegos

en el telar de las ventanas. Los resultados muestran la gran importancia de la compartimentación de la cámara. En estas condiciones el problema de la propagación del fuego se reduce, pasa de presentar dos tipos de propagación (por efecto *leap frog* y a través de la cámara ventilada según clasificación sección 4.4) a uno sólo que reviste menor gravedad, el efecto salto de rana. Con ello, la probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores también disminuye notablemente.

El **caso 5** es una variante del **caso 3** con material de revestimiento combustible. En este escenario se aprecia que la propagación del fuego a través de los revestimientos combustibles reviste tanta peligrosidad como la propagación a través de la cámara ventilada. La capacidad de desprendimiento de calor y de llamas de un material combustible puede generar un alto riesgo de transmisión térmica a los edificios colindantes, a las plantas superiores del propio edificio y a la subestructura de la fachada.

Consideraciones

De acuerdo a los resultados se podría considerar que la propagación a través de la cámara ventilada y a través de los revestimientos combustibles son dos tipos de propagación que revisten gran peligrosidad. La propagación a través de la cámara ventilada es la que puede ocurrir con mayor rapidez y constituir una mayor probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores.

A parte de la cámara ventilada, uno de los mayores riesgos asociados a las fachadas ventiladas lo constituye el uso del aluminio en los elementos estructurales y las carpinterías de las ventanas. Teniendo en cuenta el débil comportamiento frente al fuego de este metal, su uso tendría que limitarse solo a fachadas debidamente compartimentadas o a edificaciones que contemplen medidas de protección complementarias para contrarrestar este riesgo.

Se ha podido observar que la compartimentación realizada mediante cortafuegos situados en el telar de la ventana (**caso 4**) puede ser una opción muy apropiada para limitar el riesgo de propagación a través de la cámara ventilada. Con la compartimentación mediante barreras cortafuegos dentro de la cámara (**caso 3**) el fuego penetra parcialmente, mientras que con esta opción el fuego no entra en la cámara ventilada. Se plantea como una interesante alternativa a explorar en futuras investigaciones pasando al campo experimental de laboratorio. Esta opción de compartimentación no solo puede ser interesante desde la perspectiva de la seguridad

contra incendios, sino que resuelve uno de los inconvenientes principales que plantea la incorporación de barreras cortafuegos en el interior de la cámara al impedir la circulación del tiro de aire natural cuyo funcionamiento es justamente la mayor virtud de las fachadas ventiladas.

- **Disposiciones en relación a los espacios ocultos** (cámaras ventiladas)

Teniendo en cuenta la importancia de la propagación a través de la cámara ventilada se han probado dos casos complementarios al punto anterior. Se trata de los **casos 1 y 3** (tabla 6.1) solo que esta vez se han probado en escenarios de seis plantas y 18 m de altura (escenario básico 3 apartado 6.4). El propósito es evaluar lo dispuesto en el CTE DB SI sección 1 [6] en referencia a la compartimentación de las cámaras ventiladas. La normativa determina que se debe limitar a tres plantas ó 10 m el desarrollo vertical de las cámaras ventiladas, pero sólo cuando los materiales de aislamiento térmico alojados en la cámara no sean (B-s3, d2, B_L-S3, d2) es decir, cuando tengan un importante grado de combustibilidad (Fig. 6.71 a Fig. 6.73).

Síntesis de resultados

De acuerdo a los resultados observados en el **caso 1** (cámara sin compartimentar) se podría considerar que la propagación del fuego a través de la cámara ventilada puede tener gran alcance vertical, representando un potencial peligro varias plantas por encima del recinto del incendio. Teniendo en cuenta que el material de aislamiento térmico en este caso no es combustible, se puede deducir que el mecanismo del tiro de aire natural constituye en sí mismo un riesgo importante de propagación del fuego.

En el **caso 3** la compartimentación se ha realizado cada 3 plantas de acuerdo a lo estipulado por el CTE. Los resultados llevan a considerar que es de suma importancia que la compartimentación de la cámara sea total (en cada planta del edificio) y no parcial (cada tres plantas) como lo determina la norma.

Consideraciones

En general, se consideran insuficientes las disposiciones del CTE en referencia al control de la propagación del fuego a través de la cámara ventilada. La compartimentación de la cámara cada tres plantas puede equivaler a proteger una parte del edificio, dejando otra parte expuesta al riesgo de propagación. Una cámara sin ningún tipo de compartimentación, como sería el caso de aquellas con material de

aislamiento térmico no combustible, equivaldría a descuidar una situación que reviste mucho interés en referencia a la seguridad del edificio.

Cuando entró en vigor el CTE (septiembre de 2006) la medida en cuestión disponía una compartimentación de la cámara ventilada cada tres plantas ó 10 m, sin importar el material de aislamiento térmico empleado. En el año 2010 el Real Decreto 173/2010 enmendó la norma. A partir de esta modificación la medida pasó a considerar la compartimentación cada 3 plantas ó 10 m pero sólo en el caso de que el material de aislamiento térmico no sea (B-s3, d2, B_L-s3, d2). Lo cual suscita cuanto menos una reflexión. Si la medida anterior no era suficiente, ahora pasa a ser permisiva, de modo que aun cuando se cumpla a pies juntillas la normativa, queda sin cubrir un riesgo importante de propagación del fuego en esta tipología de fachadas. Aunque resulta necesario considerar una mayor restricción en el uso de los materiales combustibles, en este caso en particular consideramos que sería importante atender con mayor rigor la compartimentación de la cámara ventilada, tal y como se realiza en otros países con mayor trayectoria en temas de seguridad contra incendios (apartado 3.6.2).

- **Disposiciones en relación a los materiales de revestimiento**

Dada la peligrosidad asociada a la propagación del fuego a través de los revestimientos combustibles se han realizado unas comprobaciones complementarias al **caso 5** (revestimientos combustibles) revisado antes. En esta ocasión se han considerado tres casos de fachadas tipo **FOC** con material de revestimiento combustible **RC** (ocupando el 10% de la superficie) según lo estipulado por el CTE DB SI sección 2 [5]. Estos tres casos se contrastan con otros tres casos de iguales características pero con materiales de revestimiento no combustibles **RNC**. Se han incorporado en los escenarios aleros de 40, 60 y 80 cm con el propósito de evaluar de forma paralela el papel de estos elementos en esta situación puntual. (Fig. 6.74 y Fig. 6.75).

Síntesis de resultados

Los resultados muestran con claridad los efectos del uso de materiales combustibles. Mientras en los escenarios con **RNC** los aleros de 60 y 80 cm ofrecen un nivel aceptable de protección a la superficie de la fachada, especialmente el alero de 80 cm, en los escenarios con **RC** ninguno de los tres aleros podría evitar una eventual ignición del material de revestimiento y su consecuente propagación.

Consideraciones

En los análisis realizados sobre el tamaño de los aleros se consideró que los aleros con 80 cm de vuelo o más pueden desviar convenientemente el penacho de fuego, ofreciendo un nivel de protección aceptable a la superficie de la fachada. No obstante, atendiendo a este aspecto es necesario matizar dicha afirmación y considerarlos insuficientes cuando los materiales de revestimiento son combustibles.

Teniendo en cuenta los factores de riesgo asociados a la combustibilidad de los materiales, se considera poco restrictiva la normativa vigente respecto al uso de materiales combustibles de revestimiento. El CTE DB SI sección 2 sólo exige el uso de materiales de revestimiento “seguros” (clasificación B o mejor) en toda la superficie de los edificios que superen los 18 m de altura (generalmente PB + 5), y en todo edificio sin importar su altura, pero sólo en zonas accesibles al público y en una franja de 3,50 m de altura. Lo que supone que un buen número de edificios de vivienda podrían tener fachadas de revestimientos combustibles y cumplir con lo estipulado por el CTE.

La restricción en el uso de materiales combustibles podría ser más amplia, incluyendo los edificios **EA** (edificios en altura) que de acuerdo con la clasificación del cuerpo de bomberos, comprende edificios desde los 10 m hasta los 22 m.

Soluciones constructivas del encuentro del forjado y la fachada

- **Elementos cortafuegos y franja de 1 m**

Uno de los puntos críticos de los muros cortina **FV** (fachadas de vidrio) lo constituyen los detalles constructivos para solucionar el encuentro entre el forjado y la fachada; los cuales, además, han de incorporar la franja de 1 m (EI 60) exigida por el CTE. Con el propósito de evaluar algunos aspectos en relación a este tema se han considerado tres casos, una solución de cortafuegos en el canto del forjado libre de franjas de 1 m, y dos casos que representan dos de las soluciones constructivas más empleadas para resolver la unión mediante cortafuegos integrados a la franja de 1 m. Estos son respectivamente: **SC** (sin franja), **Solución 1** (Cortafuegos acoplado al forjado) y **Solución 2** (cortafuegos integrado al panel de fachada) (Fig. 6.76 y Fig. 6.78).

Síntesis de resultados

Las principales observaciones se derivan de la violenta propagación del fuego que puede tener lugar a través de esta tipología de fachadas debido a la configuración geométrica de sus ventanas. Estas se caracterizan por ser de gran formato (**ventanas corridas** en este estudio), lo cual, según se ha visto antes en los análisis de los tamaños de las ventanas, constituye uno de los aspectos más relevantes de la propagación a través de la fachada.

En el caso **SF** se aprecia una propagación del fuego rápida a la planta superior con un claro salto del penacho de fuego por efecto *leap frog*. En los casos **solución 1 y 2** también se observa una fuerte propagación caracterizada por grandes llamas y amplias zonas de superficie expuesta al flujo de calor. En los dos casos se ubicaron termopares en los montantes de la subestructura para comprobar las temperaturas a la que podrían estar expuestos estos elementos. Los datos registrados han permitido considerar la peligrosidad asociada a los elementos metálicos (en este caso de acero) debido a eventuales situaciones de exposición directa a las llamas o por transmisión del calor a través de los delgados paneles del revestimiento.

Consideraciones

La problemática de esta tipología de fachadas frente al fuego se puede reducir a dos aspectos, por un lado el sistema en sí mismo es vulnerable frente al fuego. Cada elemento que lo conforma tiene un débil comportamiento frente a las altas temperaturas y el efecto de las llamas. Por otro lado, el factor de apertura definido por sus grandes ventanas determina unas características de peligrosidad en el desarrollo del incendio y en su propagación. Por tanto, aunque los detalles constructivos para solucionar los puntos críticos del sistema estén bien planteados y resueltos, estos no tienen la capacidad de atacar el problema de fondo. Anadir resistencia frente al fuego a elementos que por definición no la tienen resulta insuficiente vistos los argumentos antes expuestos.

Si se considera la problemática desde un punto de vista arquitectónico y conceptual entendemos contradictorio sobreponer a un sistema constructivo ligero, como lo son los muros cortina, tal cantidad de elementos para resolver los detalles requeridos. Sobre todo teniendo a mano opciones más simples y seguras como por ejemplo las fachadas tipo panel. Sería preciso considerar la problemática asociada a esta tipología de fachada desde el concepto del **PBD** (*Performance Based Design*) con el fin de determinar las medidas oportunas de acuerdo a cada situación.

- **Elementos de estructurales y de fijación**

Los elementos de fijación de los muros cortina **FV** (fachadas de vidrio) tienen la importante función de vincular la subestructura de la fachada (montantes) con la estructura principal del edificio y constituyen otro punto vulnerable del sistema. Se han considerado las dos opciones básicas de fijación: **Frontal** y **Apoyada** para determinar (mediante termopares) las temperaturas a las que podrían estar expuestas (Fig. 6.77 y Fig. 6.78).

Síntesis de resultados

De acuerdo a lo observado en las curvas de temperatura se podría considerar que los anclajes sujetos a la parte **Frontal** del forjado podrían quedar más expuestos ante una posible situación de propagación a través de la cavidad del muro cortina.

Consideraciones

Los detalles constructivos que ofrecen mayor garantía de protección a los elementos que conforman la subestructura de las **FV** se caracterizan por enmascarar cada elemento con placas idóneas para este fin. Los elementos de fijación **Apoyada** permiten cubrir de forma simple los elementos con placas de protección.

Elementos de protección solar

Piel exterior de *brise soleil* con un 75% y 92% abierto al exterior

Este aspecto de estudio se ha considerado como una variante de las **FV** en la cual el elemento de protección solar considerado, el *brise soleil*, conforma una segunda piel parcialmente abierta. Se han considerado dos niveles distintos de apertura de las lamas: **FV+BS 1** (abierto 75%) y **FV+BS 2** (abierto 92%) (Fig. 6.79 y Fig. 6.80).

Síntesis de resultados

Según se aprecia en los gráficos, el principal inconveniente que puede presentar la incorporación del *brise soleil sobre la FV* radica en el efecto chimenea que se genera en la interfaz de las dos pieles, el cual tiene la capacidad de canalizar las llamas y el flujo de calor generando una propagación ascendente rápida. Esta situación se aprecia tanto en el caso **FV+BS 1** como en el **FV+BS 2**, solo que en este último es menos acusado el efecto.

En esta situación de propagación también puede constituir un riesgo relevante la exposición directa de la subestructura (montantes) y las fijaciones del *brise soleil* a las llamas y el flujo de calor, teniendo en cuenta que si los materiales que lo constituyen son metálicos pueden alcanzar su punto crítico y poner en peligro la estabilidad del elemento.

Consideraciones

El CTE no hace referencia a este tipo de complementos arquitectónicos a pesar de que son muy utilizados como recurso para el control solar en todo tipo de fachadas. La OMB (Ordenanza Municipal de Barcelona) sí lo menciona en el apartado de sectorización Artículo 6º sección 6.4 y determina que este tipo de piel exterior debe tener un 75% de su superficie abierta de forma permanente.

De acuerdo a lo observado podría ser insuficiente tomar esta precaución puesto que aun así el efecto del tiro del aire puede ocurrir. Por tanto, las medidas para limitar este tipo de propagación deben pasar por la compartimentación e incluso a través de medidas de protección complementarias, si es preciso, medidas de protección activa contra incendios.

❖ Factores climatológicos

• Distintas condiciones de ventilación

Los factores climatológicos tales como el viento, la temperatura, la humedad y la presión son aspectos de suma importancia en los procesos de combustión y propagación del fuego. Quizás el más influyente de estos aspectos es el viento, el comportamiento del fuego puede cambiar de forma radical e imprevisible en presencia de flujos de ventilación.

La evaluación de este tipo de aspectos resulta difícil teniendo en cuenta que el número de variables posibles puede ser infinito. Por tal motivo se han considerado siete casos en los que se combinan diferentes orientaciones y velocidades de viento, así como algunas tipologías de fachada: **Ventilación 1 – Ventilación 7**. Las especificaciones de cada caso se pueden ver en la Fig. 6.24 y la tabla 6.3. Los resultados gráficos y curvas de temperatura se aprecian en las Fig. 6.81 a Fig. 6.85.

Síntesis de resultados

Se ha podido observar que tanto la intensidad del flujo de viento como la orientación condicionan significativamente el comportamiento del fuego. Ante un flujo de viento de grado bajo (**Ventilación 1**) el proceso de combustión se desarrolla regularmente. Si la ventilación aumenta hasta un grado medio (**Ventilación 2 y 5**) la intensidad del fuego y el alcance de su propagación pueden aumentar; también el comportamiento del penacho de fuego se torna más irregular. Ante un flujo de ventilación de grado alto (**Ventilación 3 y 6**) la intensidad del fuego tiende a decrecer, lo cual también se refleja en una considerable reducción del tamaño del penacho de fuego. La intensidad y orientación del flujo de viento afecta significativamente la trayectoria del penacho de fuego, según se aprecia especialmente en los casos **Ventilación 3 y 6**.

La propagación a través de la cámara ventilada también puede ocurrir de forma más rápida y eficaz en presencia de flujos de viento de intensidad media según se aprecia en el caso **Ventilación 7**.

- **Variables de temperatura y humedad** (Condiciones de verano e invierno considerando como localización Barcelona)

Este aspecto de estudio tiene relación con el punto anterior solo que las principales variables consideradas son la temperatura ambiente y la humedad relativa. Para estudiar estos factores se ha planteado contrastar el comportamiento del fuego en condiciones propias del verano y del invierno: **condiciones climatológicas 1**; también estas mismas dos situaciones (condiciones de verano e invierno) pero incorporando un cambio en el flujo de viento: **condiciones climatológicas 2** (Fig. 6.86).

Síntesis de resultados

Los resultados ponen de manifiesto que el viento puede ser un factor determinante en el comportamiento del fuego y su propagación exterior. Mientas en el caso **condiciones climatológicas 1** se aprecia con claridad que el fuego puede ser ligeramente más intenso en las condiciones de verano. En el caso **condiciones climatológicas 2** la perturbación añadida mediante los flujos de ventilación, cambia toda la situación. En esta última se aprecian picos de temperatura más altos en las condiciones de invierno, y algunos picos sobresalientes en las condiciones de verano.

Consideraciones

El estudio de este tipo de aspectos resulta difícil, teniendo en cuenta la aleatoriedad de un fenómeno como el fuego y lo sensible que puede ser ante los diferentes factores

que lo afectan. Además la cantidad de variables susceptibles de valoración puede ser infinita. Es innegable la enorme influencia que ejercen los factores climatológicos en el comportamiento del fuego y en particular la importancia e influencia del factor de ventilación. Este factor puede llegar a ser más determinante que cualquiera de los factores analizados a lo largo de este análisis.

Se plantea como una posible vía para futuros estudios investigar con mayor amplitud estos factores climatológicos, considerando las tipologías de fachada propuestas en el estudio y diferentes opciones de configuración geométrica.

6.7 Terminología usada en los análisis

Ver apartado 6.3

Palabra	Significado
FOC	Fachadas opacas convencionales
FOV	Fachadas opacas ventiladas
FV	Fachadas de vidrio (se refiere a los muros cortina)
FV+BS	Fachadas de vidrio + brise soleil (laminas de control solar)
PB	Planta baja
P1	Planta primera
P2	Planta segunda
Cuadrada	Se refiere a ventanas con forma cuadrada
PAV	Se refiere a ventanas con forma alargada vertical (ventanas alargadas verticales)
PAH	Se refiere a ventanas con forma alargada horizontal (ventanas alargadas horizontales)
Tipo	Se refiere a ventanas de tamaño regular
Grande	Se refiere a ventanas de tamaño grande
Corrida	Se refiere a grandes superficies acristaladas
E=24	Espesor del muro de cerramiento 24 cm (muros convencionales)
E=41	Espesor del muro de cerramiento 41 cm (muros tradicionales)
Alero	Elementos salientes horizontales
Parteluces	Elementos salientes verticales que recorren toda la altura de la fachada
Trama	Combinación de los dos elementos anteriores conformando una "trama"
A	Se refiere al alero ubicado en el alfeizar de la ventana
M	Se refiere al alero ubicado en medio de la franja de 1 m
D	Se refiere al alero ubicado en el dintel de la ventana
Prueba 1	Se refiere a uno de los casos para evaluar la propagación horizontal del fuego
Prueba 2	Se refiere a uno de los casos para evaluar la propagación horizontal del fuego
prueba 3	Se refiere a uno de los casos para evaluar la propagación horizontal del fuego
Posición 1	Se refiere a la posición de la franja vertical de 1 m respecto al forjado (arriba)
Posición 2	Se refiere a la posición de la franja vertical de 1 m respecto al forjado (en medio)
Posición 3	Se refiere a la posición de la franja vertical de 1 m respecto al forjado (abajo)
Ejemplo 1	Solución singular de fachada. Edificio Génova (Madrid)
Ejemplo 2	Solución singular de fachada. Edificio Diagonal 682 (Barcelona)
Caso 1	Se refiere a uno de los casos para evaluar las fachadas ventiladas (ver tabla 6.1)
Caso 2	Se refiere a uno de los casos para evaluar las fachadas ventiladas (ver tabla 6.1)
Caso 3	Se refiere a uno de los casos para evaluar las fachadas ventiladas (ver tabla 6.1)
Caso 4	Se refiere a uno de los casos para evaluar las fachadas ventiladas (ver tabla 6.1)
Caso 5	Se refiere a uno de los casos para evaluar las fachadas ventiladas (ver tabla 6.1)
RC	Fachada con revestimiento combustible
RNC	Fachada con revestimiento <u>no</u> combustible
SF	Cortafuegos en fachadas de vidrio sin franja (en fachadas de vidrio)
Solución 1	Cortafuegos acoplado al forjado con franja de 1 m (en fachadas de vidrio)
Solución 2	Cortafuegos integrado al panel de fachada con franja de 1 m (en fachadas de vidrio)
Fijación frontal	Ubicación de los elementos de fijación de la subestructura de fachada (en fachadas de vidrio)
Fijación apoyada	Ubicación de los elementos de fijación de la subestructura de fachada (en fachadas de vidrio)
FV+BS 1	Fachada de vidrio con brise soleil (segunda piel abierta en un 75%)
FV+BS 2	Fachada de vidrio con brise soleil (segunda piel abierta en un 92%)
Ventilación 1	Combinación de flujos de viento de intensidad leve (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Ventilación 2	Combinación de flujos de viento de intensidad media (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Ventilación 3	Combinación de flujos de viento de intensidad media (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Ventilación 4	Combinación de flujos de viento de intensidad leve (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Ventilación 5	Combinación de flujos de viento de intensidad alta (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Ventilación 6	Combinación de flujos de viento de intensidad alta y de costado (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Ventilación 7	Combinación de flujos de viento de intensidad media (ver Fig. 6.24 y tabla 6.3)
Cond. climatológicas 1	Combinación de parámetros climatológicos de verano e invierno (ver Fig. 6.25 y tabla 6.4)
Cond. climatológicas 2	Parámetros climatológicos de verano e invierno más perturbación de viento (ver Fig. 6.26 y tabla 6.5)

Bibliografía:

- [Alvear et al. 2007] D. Alvear, G. Rein, J. A. Capote Abreu, J. L. Torero, Modelado y simulación computacional de incendios en la edificación. Ediciones Díaz de Santos, Santander, 2007, ISBN 8479788321, 9788479788322.
- [Capote et al. 2005] J. A. Capote, D. Alvear, G. Herrera. Simulación Computacional de las Condiciones Ambientales y de Seguridad en los Vehículos Ferroviarios de Pasajeros en caso de Incendio. Universidad de Cantabria, 2005, ISBN 8481023930, 9788481023930.
- [Chow 1995] W. K. Chow, Use of Computational Fluid Dynamics for Simulating Enclosure Fires, *Journal of Fire Sciences*, vol. 13, nº 4, pp.300-334. 1995, doi: 10.1177/073490419501300405.
- [Chow 1996] W. K. Chow, Application of Computational Fluid Dynamics in Building Services Engineering, *Building and Environment*, vol. 31, Issue 5, pp.425-436, September 1996, doi: 10.1016/0360-1323(96)00012-1.
- [Colwell – Martin 2003] S. Collwell, B. Martin, Fire performance of external thermal insulation for walls of multi-storey buildings, Building Research Establishment BRE, London, 2003, ISBN 1 86081 622 3.
- [Drysedale 1996] D. Drysdale, Mechanisms of flashover: an overview, *Proceedings of the Seventh International INTERFLAM 96 Conference*, pp.155-117, 1996.
- [Ee H. Yii et al. 2007] Ee H. Yii, C. M. Fleischmann, A. H. Buchanan, Vent Flows in Fire Compartments with Large Openings. *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 17 no. 3, pp.211-237, August 2007, doi: 10.1177/1042391507069634.
- [Ferzinger – Peric 2002] J. H. Ferziger, M. Peric. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer 2002, ISBN 3540420746, 9783540420743.
- [Harmathy 1974], T.Z. Harmathy, Flame deflectors, Ottawa: National Research Council of Canada, Division of Building Research, 6p. Building Research Note N° 96, 1974.
- [Harmathy 1978] E. Smith, T. Z. Harmathy, Design of Buildings for Fire Safety, Annual Meeting of the American Society for Testing and Materials, Boston, Mass., 27 June 1978.
- [Harrison – Spearpoint 2006] R. Harrison, M. Spearpoint, Entrainment of Air into a Balcony Spill Plume, *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 16 no. 3 pp.211-245, August 2006.
- [Ingber 1928] S. H. Ingberg, Tests of the severity of building fires, *NFPA Quarterly Col.* 22, N° 1, Julio 1928.
- [Kawagoe et al. 1963] K. Kawagoe, T. Sekine, Estimation of Fire Temperature – Time Curve in Rooms, BRI Occasional Report N° 11, Building Research Institute, Japan, pp.3-4, 1963.
- [Klopovic – Turan 2001] S. Klopovic, O.F. Turan, A comprehensive study of externally venting flames – Part I: Experimental plume characteristics for through-draft and no-through-draft ventilation conditions and repeatability, *Fire Safety Journal*, 36, pp.99-133, 2001.

- [Law 1978] M. Law, Fire Safety of External Building Elements, The Design Approach. AISC Engineering Journal, second quarter, p.59-74, 1978.
- [López 2006] S. López Moreno, Estudio teórico experimental del comportamiento del fuego en sistemas cerrados. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México, 2006.
- [McGrattan et al. 2008] K. McGrattan, H. Baum, R. Rehm, Fire Dynamics Simulator Version 5, Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018-5, S. Hostkka VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, J. Floyd, Hughes Associates, Inc. Baltimore, Maryland, USA, 2008.
- [Migoya 2002] E. Migoya, Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases alientes en incendios: aplicación a túneles de carretera, Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Energética y Fluido mecánica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, pp.12-17, 2002.
- [NFPA 1993] NFPA National Fire Protection Association, Manual de protección contra incendios. Introducción a Confinamiento del fuego en edificios. Sección 6 Capítulo 6. John A. Campbell. Editor Arthur Cote, Editorial Mapfre, 1993, ISBN 8471006456.
- [Nyuk Poh Bong 1969] F. Nyuk Poh Bong, Fire spread on exterior wall. University of Canterbury, Fire Engineering Research Report, 2000.
- [Oleszkiewicz 1989] I. Oleszkiewicz. Heat Transfer from a Window Fire Plume to a Building Façade, Collected Papers in Heat Transfer, NRC Institute for Research in Construction; National Research Council Canada, pp.163-170, 1989.
- [Oleszkiewicz 1990a] I. Oleszkiewicz, Fire Exposure to exterior Walls and Flame Spread on Combustible Cladding, Fire Technology. Vol. 26, nº 4. pp. 357-375. 1990.
- [Oleszkiewicz 1990b] I. Oleszkiewicz, Fire and Combustible Cladding, Construction Canada, 32(4), pp.16-18, 20-21, July - August 1990.
- [Oleszkiewicz 1991] I. Oleszkiewicz. Vertical separation of Windows using spandrel walls and horizontal projections, Fire Technology, Vol. 27, Nº 4, pp.334-340, 1991, DOI: 10.1007/BF01039884.
- [Patterson 1993] J. Patterson, Simplified design for building fire safety. Editor: Wiley-IEEE, p.9, 1993, ISBN 0471572365, 9780471572367.
- [Sato et al. 1991] K. Sato, K. Kuwahara, A Numerical Study of Window-to-Window Propagation in High-Rise Building Fires. Fire Safety Science – Proceedings of the third international symposium, 1991.
- [Smith et al. 1979] E. E. Smith, T. Z. Harmathy, H. Smith, Design Of Buildings For Fire Safety Editor: ASTM International, Baltimore, p.147, 1979, ISBN 0803103204, 9780803103207.
- [Suzuki et al. 2000] T. Suzuki, A. Sekizawa, T. Yamada, E. Yanai, H. Sato, H. Kirioka, Y. Kimura An experimental study of ejected flames of a high-rise buildings. Effects of depth of balcony on ejected flames, Proceedings of the Fourth Asia-Oceania Symposium of Fire Science and Technology, Tokyo, Japan, pp.363-373, 2000.

[Thomas et al. 1967] P. H. Thomas, A. J. Heselden, M. Law, Fully-developed Compartment Fires Two Kinds of Behavior, Fire Research Technical paper N°18 Ministry of technology and Fire offices Committee, Joint Fire Research Organization HMSO, UK, pp.2-5, 1967.

[Tuhtar 1990] D. Tuhtar, Protección contra el fuego y explosiones, desarrollo de sistemas, Editorial Paraninfo, Madrid, 1990, ISBN 8428317666.

[Yee-Ping et al. 2007] L. Yee-Ping, M. A. Delichatsios, G.W.H. Silcocka, Heat fluxes and flame heights in façades from fires in enclosures of varying geometry, Proceedings of the Combustion Institute Vol. 31, Issue 2, pp.2521-2528, January 2007.

[Yii et al. 2003] E. P. Yii, A. J. M. Heselden, Modelling the effects of Fuel Types and Ventilation Openings on Postflashover Compartment Fires, Fire Engineering Research Report, University of Canterbury, New Zealand, pp.105-117, 2003.

[Yokoi 1960] S. Yokoi, Study on the Prevention of Fire Spread Caused by Hot Upward Current, Report of the Building Research Institute N° 34, Tokyo Japan, Nov. 1960.

Notas:

¹ Página del NIST en la cual se pueden encontrar distintos trabajos de investigación realizados con el FDS. <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/index.html>.

² Curso Concepción y Construcción de Fachadas. Colegio de Arquitectos de Galicia. Santiago de Compostela diciembre de 2004. Dr. Arquitecto Jaume Avellaneda.

³ **CTE DB SI 2 sección 1.1** Con el fin de limitar el riesgo de propagación exterior horizontal del incendio a través de la fachada entre dos sectores de incendio, entre una zona de riesgo especial alto y otras zonas o hacia una escalera protegida o pasillo protegido desde otras zonas, los puntos de sus fachadas que no sean al menos EI 60 deben estar separados la distancia d en proyección horizontal que se indica en el cuadro, como mínimo, en función del ángulo α formado por los planos exteriores de dichas fachadas. Para valores intermedios del ángulo α , la distancia d puede obtenerse por interpolación lineal. El cuadro que indica las distancias se puede ver en el apartado 3.5.1 de este documento.

⁴ **CTE DB SI 2 Sección 1.3** Con el fin de limitar el riesgo de propagación vertical del incendio por fachada entre dos sectores de incendio, entre una zona de riesgo especial alto y otras zonas más altas del edificio, o bien hacia una escalera protegida o hacia un pasillo protegido desde otras zonas, dicha fachada debe ser al menos EI 60 en una franja de 1 m de altura, como mínimo, medida sobre el plano de la fachada (véase la figura). En caso de existir elementos salientes aptos para impedir el paso de las llamas, la altura de dicha franja podrá reducirse en la dimensión del citado saliente. Los gráficos correspondientes se pueden ver en el apartado 3.5.1 de este documento.

⁵ **CTE DB SI 2 Sección 1.4** La clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen más del 10% de la superficie del acabado exterior de las fachadas o de las superficies interiores de las cámaras ventiladas que dichas fachadas puedan tener, será B-s3,d2 hasta una altura de 3,5 m como mínimo, en aquellas fachadas cuyo arranque inferior sea accesible al público desde la rasante exterior o desde una cubierta, y en toda la altura de la fachada cuando esta exceda de 18 m, con independencia de donde se encuentre su arranque.

⁶ **CTE DB SI 1 sección 3.1 y 2.** La compartimentación contra incendios de los espacios ocupables debe tener continuidad en los espacios ocultos, tales como patinillos, cámaras, falsos techos, suelos elevados, etc., salvo cuando éstos estén compartimentados respecto de los primeros al menos con la misma resistencia al fuego, pudiendo reducirse ésta a la mitad en los registros para mantenimiento. Se limita a tres plantas y a 10 m el desarrollo vertical de las cámaras no estancas en las que existan elementos cuya clase de reacción al fuego no sea B-s3, d2, B_L-s3, d2 ó mejor.

⁷ FDS es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio en recintos cerrados. Ha sido 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 in Finland.

⁸ El programa PyroSim es una interfaz gráfica específica para el FDS, ha sido creada por la empresa Thunderhead Engineering. Facilita la elaboración de los escenarios de incendio ya que permite modelarlos gráficamente en una malla tridimensional. Es compatible con dibujos de CAD los cuales pueden ser importados con extensión dwf. El archivo de entrada de datos que el FDS emplea consiste en un archivo de texto creado por el usuario. En este se incorpora la información requerida mediante líneas de mando. Es indispensable conocer los comandos para introducir correctamente la orden que se requiere dar.

¹⁰ Los valores de los parámetros han sido tomados de la librería de referencia de la versión 4 del Fire Dynamics Simulator (NIST). Cada material empleado contiene los datos de sus propiedades térmicas y algunas reacciones químicas, todas ellas extraídas de ensayos de laboratorio.

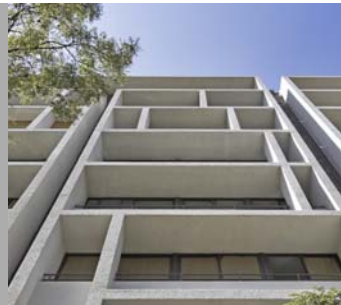
¹¹ Valores de densidad de carga de fuego variable característica según el uso previsto. Recogidos en la tabla B.6 del DB SI del CTE. La fuente original usada por la norma es: "Design Guide. Structural Fire Design" (Workshop CIB W14), publicado por "Fire Safety Journal" Vol. 10 N° 2, March 1996.

¹² Barcode Housing System. Proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de I+D+I 2005-2008. Sistema asistido por ordenador para el diseño y construcción de bloques de viviendas con métodos industrializados. Investigador principal del proyecto: Dr. Arquitecto Leandro Madrazo. Coordinador del sub proyecto para la evaluación de la envolvente: Dr. Arquitecto Jaume Avellaneda. La autora de la presente tesis colaboró en este sub proyecto realizando una actividad de investigación sobre la evaluación del comportamiento del fuego en fachadas ventiladas.

¹³ El NIST National Institute of Standards and Technology ([USA](#)) pone a disposición información variada en relación al FDS, documentos como la guía del usuario y la guía técnica. Adicionalmente ofrece ejemplos de modelos realizados por el equipo del NIST que sirven de base para la aplicación del programa en distintos contextos. En particular para este estudio han sido de interés los ejemplos correspondientes al *Room fire*. También existe un foro de usuarios donde es posible hacer consultas relacionadas con el funcionamiento del programa.

7

CONCLUSIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN



7.1 Conclusiones finales del estudio

La investigación que se ha llevado a cabo en esta tesis nació del interés de abordar distintos aspectos relacionados con la propagación del fuego a través de las fachadas, pues es uno de los temas menos explorados sobre este segmento de la edificación. Desde el inicio de este estudio, cobró gran importancia el configurar una base de conocimiento suficiente para evaluar de forma crítica las medidas contempladas por la normativa española para el control de la propagación exterior del fuego.

A lo largo del estudio ha sido posible acercarse a los objetivos trazados y ampliar la perspectiva en aquellos aspectos que han tomado mayor fuerza durante el proceso de investigación, en especial, con la fase experimental. Se considera que la información analizada y el conjunto de temas tratados han permitido alcanzar dichos objetivos satisfactoriamente.

El contenido de estas conclusiones responde a los objetivos planteados al inicio del documento, los cuales se han dividido en: objetivos principales y objetivos secundarios. Comenzaremos por estos últimos para luego ocuparnos con más detalle de las conclusiones de mayor relevancia de la investigación.

Los dos primeros objetivos secundarios, referentes al contexto normativo, fueron ganando importancia durante la investigación, por ello las conclusiones derivadas de este aspecto se exponen dentro de las conclusiones principales del estudio.

Los objetivos 3 y 4 se centraron en definir un marco teórico que permitiera situar cada tema relacionado con el estudio en el área del conocimiento correspondiente antes de vincularlo con el ámbito de aplicación. Ello teniendo en cuenta que tanto la combustión y la dinámica del fuego, como las técnicas de modelado y simulación computacional de incendios pertenecen a ámbitos del conocimiento lejanos al arquitectónico, en el cual se sitúa esta investigación. La experiencia en este sentido ha sido muy positiva, puesto que el tema central de la investigación ha servido de hilo conductor entre los temas asociados a la dinámica del fuego y el diseño arquitectónico de las fachadas. Justamente una de las conclusiones más significativas del estudio es la enorme influencia que tiene el factor geométrico en el comportamiento físico del fuego. Además, no se puede pasar por alto que salvo los incendios que ocurren en zonas boscosas o tanques de combustibles, los incendios se desarrollan en espacios diseñados y construidos por arquitectos.

Considerando la amplitud y complejidad de los fenómenos asociados a la combustión y la dinámica del fuego, el capítulo 4 de este estudio se ha centrado sólo en aquellos aspectos relacionados con el tema de la investigación, es decir, la propagación exterior del fuego en las edificaciones. También se ha hecho un breve recorrido por algunos temas generales con el fin de aportar una mejor comprensión de los resultados obtenidos en la fase experimental.

Por otro lado, el capítulo 5 se ha centrado en la definición de un marco teórico sobre las técnicas de modelado y simulación computacional de incendios con la intención de explicar el funcionamiento de los programas de dinámica computacional de fluidos CFD (*Computational Fluid Dynamics*), y a partir de ello situar apropiadamente los resultados obtenidos con su aplicación. Se ha pretendido explicar con claridad los límites en los que se mueve la fase experimental y también exponer el porqué de estos límites. En el capítulo 5 se ha abordado el tema de la simulación computacional desde un ámbito general para llegar al tema particular de la simulación computacional de incendios. Una vez explicados los detalles del funcionamiento del programa empleado, en este caso, el modelo de campo de dinámica computacional de fluidos *FDS (Fire Dynamics Simulator)* se ha procedido a explicar los parámetros de simulación de los escenarios y los factores que definen las variables del estudio.

Se ha procurado aproximar de forma razonable la descripción de los fenómenos simulados a una situación real y representar en los escenarios las distintas variables consideradas. No hay que perder de vista que se trata de herramientas informáticas y por ello se trata de representaciones simplificadas de las situaciones que se dan en la realidad. Por tanto, los resultados derivados de las simulaciones son de carácter orientativo. Lo cual en ningún caso resta valor al uso de las técnicas de simulación, puesto que se trata de herramientas potentes que permiten estudiar, comprender y eventualmente llegar a realizar una predicción del comportamiento de un escenario determinado. Numerosas disciplinas profesionales y científicas se sirven de las ventajas que ofrece el empleo de la simulación para abordar el estudio de diversos procesos complejos. En algunos campos de estudio como la ciencia del fuego y la investigación de incendios su uso se ha ido extendiendo, debido a que es una opción frente a los ensayos de fuego reales, los cuales demandan un gran esfuerzo en infraestructura y costes económicos. En EEUU y Nueva Zelanda las técnicas de modelado y simulación computacional pueden ser empleadas para estudiar determinadas estrategias de protección contra incendios y justificarlas ante las autoridades competentes.

Aunque los estudios realizados mediante ensayos reales ofrecen unos resultados más fiables que los obtenidos mediante la simulación, es importante tener en cuenta que los ensayos de fuego no están exentos de incertidumbre, si se tiene en cuenta que las condiciones bajo las cuales se realizan los ensayos de laboratorio pueden ser muy diferentes a las que se dan en un incendio real.

Las diferentes simulaciones realizadas han permitido obtener datos cualitativos y cuantitativos útiles para deducir ciertas tendencias del comportamiento del fuego en cada situación planteada. El uso de este tipo de instrumento informático ha hecho posible realizar este estudio de investigación que de otro modo hubiese sido inabarcable e inviable económicamente.

El esfuerzo de emplear estas técnicas de simulación computacional para abordar un tema eminentemente arquitectónico como el que se propone en el estudio encontramos que ha sido retribuido con los resultados obtenidos. Se considera que el modelo empleado FDS ofrece una aproximación muy válida del fenómeno del fuego en los casos de estudio planteados.

Conclusiones principales de la investigación

Las deducciones más importantes de la investigación se han desarrollado en torno a dos ámbitos distintos, son estos:

- El contexto normativo español, en lo referente a la propagación exterior del fuego.
- La fase experimental del estudio en la que se han evaluado distintos aspectos relacionados con la influencia del diseño y la configuración geométrica de las fachadas en el comportamiento del fuego.

• Contexto normativo español

En el capítulo 3 se realiza una panorámica del contexto normativo con el fin de responder a la cuestión ¿en qué punto se sitúa el contexto normativo español? Para ello se ha realizado un recorrido por la evolución de la normativa española. Se ha considerado la influencia que ha ejercido la armonización con las metas del Comité Europeo de Normalización (CEN), las tendencias de la normativa en países del entorno europeo y finalmente se ha considerado el contexto normativo de países que son ampliamente reconocidos como referentes a nivel mundial en materia de seguridad contra incendios. Las conclusiones parciales del capítulo 3 recogen distintas

apreciaciones que han permitido ir encontrando respuestas a la cuestión inicial. A continuación destacamos las conclusiones más relevantes:

- Uno de los aspectos que más llama la atención es que la normativa no ha presentado cambios sustanciales respecto a las medidas para el control de la propagación exterior del fuego desde el año 1996, lo que sugiere que en varios años no se ha evolucionado en este aspecto. Sin embargo, las fachadas y en general la envolvente de los edificios ha ido experimentando evidentes cambios incorporando nuevas funciones, nuevos dispositivos tecnológicos y nuevos materiales.
- La franja de 1 m exigida como medida de control de la propagación vertical del fuego constituye uno de los aspectos más discutibles de la normativa. El problema no radica en la franja en sí misma, sino en su planteamiento como medida generalizada a implementar en todas las tipologías de fachadas sin considerar los detalles constructivos requeridos en cada caso. Este tipo de planteamientos da lugar a un amplio margen de interpretación que puede derivar en una inadecuada definición de los requerimientos de protección contra incendios.
- La normativa no hace referencia a las tipologías de fachadas ligeras, tales como: las fachadas ventiladas, los muros cortina y las fachadas de doble piel. Tampoco hace referencia a la configuración geométrica de las ventanas o de los elementos constructivos. Se percibe un vacío generalizado de pautas y orientaciones respecto a las medidas de protección a adoptar en las fachadas, esta situación traslada una enorme responsabilidad a los profesionales e industriales involucrados en los proyectos debido a que son estos los que finalmente proponen y aplican las soluciones constructivas de protección.

Una de las consecuencias de esta falta de orientación de la normativa es que resulta difícil establecer el grado de seguridad que se alcanza mediante las medidas exigidas en diferentes casos. La justificación de las diferentes soluciones constructivas aplicadas (en muros cortina, fachadas ventiladas, etc.) puede convertirse más en un fin para cumplir con lo que la normativa exige y no un medio para alcanzar un grado de seguridad aceptable en la edificación.

- Según se ha visto en el apartado 4.4.3 las fachadas ventiladas suponen un potencial peligro de propagación del fuego a través de las cámaras ventiladas, sin embargo la normativa sólo realiza una rápida referencia a este aspecto (DB SI 1 sección 1 apartado 3) y su contenido no aporta información suficiente para prevenir este riesgo. Una parte de los análisis se ha dedicado a evaluar este aspecto (apartado 6.5.2). Adicionalmente faltan normas de ensayo que permitan evaluar las características técnicas de los elementos constructivos que conforman las fachadas ventiladas, en especial, para probar las barreras cortafuegos. Cuando se precisa realizar algún ensayo de este tipo de elementos se suele acudir a normativas de ensayo de otros países, como las normas británicas.
- Las disposiciones referentes a los muros cortina tuvieron un cambio parcial desde el año 2003 con la entrada en vigor de la UNE EN 13830 y la obligatoriedad del marcado CE para los muros cortina. Sin embargo, estas exigencias sólo se aplican en los sistemas de muro cortina comercializados como un “kit”, un conjunto de componentes que una vez ensamblados proporcionan un producto acabado. En todos los demás casos prevalecen los requisitos establecidos por la normativa nacional, es decir, la franja de protección de 1 m. Teniendo en cuenta la debilidad termo mecánica de los elementos que componen la subestructura de la fachada y el tamaño de las ventanas que las caracteriza, una franja resistente de 1 m puede resultar insuficiente para controlar la propagación del fuego y evitar el colapso parcial o total de los elementos que lo conforman.

Si bien las medidas referentes a los distintos aspectos citados no están en los documentos básicos, podrían estar incluidas como referencias a documentación técnica complementaria que oriente a los proyectistas en la manera de abordar ciertos aspectos de riesgo asociados a cada tipología constructiva. En algunos países como Alemania, Reino Unido y Francia la normativa hace referencia a documentos técnicos de apoyo realizados por centros de investigación reconocidos. Éstos resultan de gran utilidad para solucionar temas específicos de las fachadas ligeras y las fachadas de doble piel, como por ejemplo, los sellos o las barreras cortafuegos según sea el caso.

- En la mayoría de países predomina la aplicación de normativas prescriptivas, pero se aprecia una creciente tendencia hacia el enfoque basado en prestaciones y con ello un aumento paulatino de profesionales especializados en ingeniería de protección contra incendios. Algunos países como Holanda, Dinamarca, Reino Unido y los países escandinavos vienen desarrollando este concepto desde hace

varios años, mientras que países como Bélgica, Francia y España se encuentran en una fase preliminar. Cabe destacar que en general, los países con un mayor desarrollo en la aplicación del enfoque basado en prestaciones también tienen un conjunto de normas prescriptivas o funcionales muy detallado. En el caso de EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda sus normas prescriptivas y funcionales establecen unos objetivos de seguridad y plantean diferentes opciones para alcanzarlos mediante cuadros en los que se relacionan distintas variables según el uso del edificio, la altura, la superficie, el tipo de construcción, la ubicación, etc. Es un instrumento útil para aplicar las medidas de protección contra incendios en edificaciones convencionales. Mientras que el enfoque basado en prestaciones es ideal para abordar los problemas y retos que plantea un proyecto singular.

- Una de las grandes reflexiones recae en lo que se ha denominado en el apartado 3.7 cultura de la seguridad, lo cual es algo que han desarrollado apropiadamente los países más avanzados en protección contra incendios. Ello involucra aunar esfuerzos tanto a nivel social, cultural y educativo como de formación especializada en ingeniería de protección contra incendios. Es primordial la concienciación frente al peligro del incendio por parte de usuarios y profesionales involucrados en la edificación. Por ello se estima importante fomentar diversas iniciativas encaminadas al desarrollo de una cultura de la seguridad, dirigidas a la sociedad en general y a los profesionales implicados en el sector de la edificación. Las campañas de prevención y de concienciación sobre el peligro del incendio, la publicación de estadísticas de siniestros y un mayor apoyo a la labor de los grupos de rescate y extinción forman parte de los frentes que se deben cubrir. La dispersión administrativa es otro aspecto que mina el funcionamiento de los distintos organismos responsables. Se considera recomendable la creación de una figura única y especializada que ejerza como autoridad competente en la SCI a todos los niveles, como pueda ser el *Fire Marshall* en EEUU.

Se puede concluir en referencia a este aspecto que las normas, en este caso de protección contra incendios, reflejan aspectos de la sociedad en que son aplicadas, más allá de los aspectos técnicos hay aspectos sociológicos que requieren ser revisados para plantear el problema del incendio en su verdadera dimensión y desde allí implementar las medidas necesarias en cada caso, ya sean de tipo prescriptivo o prestacional. También es importante contar con especialistas en ingeniería de

protección contra incendios y equipos multidisciplinares para abordar cada problemática particular desde la fase de proyecto de los edificios.

- **Fase experimental del estudio**

En esta se desarrollan los aspectos que configuran la razón de ser principal de esta investigación. Las deducciones más significativas del estudio se derivan de la fase experimental, realizada mediante técnicas de modelado y simulación computacional de incendios. Esta fase del estudio ha dado lugar a una serie de resultados cuantitativos y cualitativos que han permitido analizar y contrastar diversos aspectos de interés para esta investigación. En la sección 6.6 se recogen todos estos en una síntesis de resultados que sigue el mismo orden usado en los análisis con el propósito de facilitar su lectura.

Tal como se señaló en la síntesis de resultados de la fase experimental (apartado 6.6), este estudio no ha pretendido dar respuestas dogmáticas sobre la propagación del fuego, sino exponer una serie de tendencias del comportamiento del fuego en función de unas variables y parámetros determinados. Todo ello con el propósito de evaluar los posibles efectos del incendio, detectar situaciones de riesgo, considerar pautas de diseño orientadas a la prevención de la propagación exterior del fuego y evaluar algunas disposiciones de la normativa vigente CTE DB SI en relación a los casos tratados.

Uno de los aspectos más relevantes de la investigación se centra en el efecto del factor geométrico de la fachada en el comportamiento del fuego. Según se ha dicho, la geometría hace parte de la configuración de las fachadas en un sentido muy amplio; que incluye no solo la forma y tamaño de las ventanas, balcones, aleros etc., sino también la disposición, forma y configuración de los diferentes elementos que conforman los sistemas de las fachadas ligeras, como la fachada ventilada o los muros cortina. Esta influencia de la geometría sobre el comportamiento del fuego lleva a reflexionar sobre la importancia que puede tener cualquier decisión que se tome sobre el diseño de las fachadas, incluso, respecto a temas aparentemente simples, como el tamaño y la forma de las ventanas o la disposición de elementos salientes tales como un alero, un balcón, el tamaño de los montantes de un muro cortina, un cuerpo saliente, la elección de un material, etc. En el diseño de las fachadas no solo tendrían que ser tenidos en cuenta los aspectos estéticos, estructurales, de iluminación natural, de control solar etc., sino que además los aspectos relacionados con la protección

pasiva frente al fuego tendrían que tomar un lugar destacado en la fase de diseño. Algunas decisiones de diseño que aparentemente carecen de importancia podrían eventualmente generar situaciones de riesgo en caso de incendio, o por el contrario, minimizarlo o evitarlo.

A continuación destacamos algunos de los resultados más importantes:

- La configuración geométrica de las ventanas es un factor que puede influir significativamente en el tamaño, la trayectoria y la forma del penacho de fuego que se proyecta a través de las ventanas. Se puede considerar que la forma que adoptan las llamas está relacionada con la forma de las ventanas por las cuales se proyectan hacia el exterior. Así, una ventana alargada **PAV** es la que puede presentar un penacho de fuego más alto. Además, se ha podido observar una mayor probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores a través de las ventanas, es decir, mediante el efecto *leap frog*. En contrapartida la menor probabilidad de penetración a otras plantas ocurre con la configuración horizontal **PAH**, lo cual resulta razonable teniendo en cuenta que tiene una altura de apertura reducida y una franja de separación vertical mayor respecto a las otras configuraciones.
- El tamaño de las ventanas es probablemente uno de los aspectos que incide de forma más clara en la propagación del fuego a través de las fachadas. Este factor afecta no sólo la propagación del fuego sino el desarrollo del incendio en el recinto de origen del fuego. Por tanto, en los recintos con grandes ventanales (**grande y corrida**) la evolución del fuego ocurre de forma más rápida e intensa, en especial con la configuración de ventana **corrida**. El tamaño del penacho de fuego es directamente proporcional al tamaño de las ventanas por las cuales emerge, por lo tanto, las fachadas con ventanas grandes representan un mayor peligro, tanto por el tamaño del penacho y la incidencia del flujo de calor sobre la fachada, como por la elevada probabilidad de propagación a las plantas superiores.

La influencia del tamaño y la forma de las ventanas se debe a la importancia del factor de apertura, que condiciona la cantidad de aire frío que entra y flujos de calor que salen a través de ésta.

- En general, los elementos salientes se pueden considerar “deflectores” del flujo de calor y las llamas, en la medida que cambian la trayectoria del penacho de

fuego que emerge a través de las ventanas. Los elementos salientes horizontales como el alero tienden a desviar el penacho de fuego hacia el exterior de la fachada, mientras que los elementos verticales tipo parteluces tienden a concentrarlo y canalizarlo. Los elementos que tienen los dos componentes y que se han denominado trama no canalizan el flujo de calor como ocurre con los parteluces, pero tampoco lo desvían claramente hacia el exterior como ocurre con el **alero**.

- Se considera que los elementos salientes a partir de 60 cm de vuelo desvían con cierta efectividad el flujo de calor y las llamas, no obstante la superficie de la fachada podría estar expuesta a un elevado flujo de calor. Un elemento de 80 cm de vuelo o más puede desviar adecuadamente la trayectoria de las llamas y además reducir la exposición del flujo de calor, aportando un aceptable nivel de protección.

Cabe añadir a estas consideraciones que el nivel de protección que puede ofrecer un elemento saliente frente a la propagación vertical del fuego puede variar en función de factores como: la carga de fuego del recinto del incendio, la velocidad de cesión del calor (*HRR*), *la combustibilidad del material de revestimiento* y el tamaño y la forma de las aberturas por las cuales emerge el fuego.

Respecto a las disposiciones contempladas por el CTE para el control de la propagación del fuego se puede deducir:

- De acuerdo a los resultados obtenidos se ha encontrado que la distancia de 50 cm propuesta por la normativa para prevenir la propagación horizontal es adecuada, siempre que los materiales de revestimiento sean no combustibles.
- La franja de separación vertical de 1 m es un asunto controvertido de la normativa, debido a la forma en que está planteado. Se puede considerar que aplicar una medida de protección genérica para contrarrestar los efectos de un fenómeno que evoluciona aleatoriamente en función de tantos factores puede no ser fiable en todos los casos. El tamaño de las ventanas puede ser un aspecto determinante a la hora de considerar el nivel de protección que puede ofrecer una franja. Otro aspecto cuestionable derivado del planteamiento de la normativa es que sugiere que los elementos salientes horizontales y las franjas cumplen una función similar o equivalente, lo cual puede considerarse

incorrecto. Un elemento horizontal (alero), dependiendo de su tamaño, constituye un obstáculo capaz de cambiar la trayectoria del fuego, mientras que un elemento vertical tan solo puede atenuar la incidencia del fuego sobre la fachada.

- De acuerdo a los resultados se podría considerar que la propagación a través de las cámaras ventiladas y a través de los revestimientos combustibles son dos tipos de propagación que revisten gran peligrosidad. La propagación a través de la cámara ventilada es la que puede ocurrir con mayor rapidez y constituir una mayor probabilidad de penetración del fuego a las plantas superiores. Se estima conveniente compartimentar la cámara en cada planta del edificio. Los elementos cortafuegos dispuestos en torno al telar de las ventanas se consideran muy apropiados para evitar el paso de fuego a la cámara ventilada sin alterar el funcionamiento del tiro de aire natural de la cámara. Los materiales de aislamiento térmico combustible no deberían usarse bajo ninguna circunstancia en las cámaras ventiladas. Aunque el solo mecanismo del tiro de aire facilita la propagación del fuego, la contribución de un material combustible al tamaño e intensidad del incendio puede ser muy significativa.
- La problemática de los muros cortina frente al fuego se puede reducir a dos aspectos:
 - (1) La vulnerabilidad frente a altas temperaturas de los elementos que los conforman. Cada elemento que constituye el sistema, tanto la subestructura metálica como los paneles opacos y los vidrios tiene un débil comportamiento al fuego.
 - (2) El diseño característico de los muros cortina en el que predominan grandes superficies acristaladas.

Ante esta situación conviene verificar desde un análisis de riesgos si la protección del muro cortina debe ser abordada desde la protección pasiva: pretendiendo añadir resistencia y protección a elementos constructivos que de por sí son débiles frente al fuego, o mediante protección activa: asumiendo la debilidad de dichos elementos y en consecuencia implementando rociadores de ventana o cortinas de agua que en caso de incendio mantengan su integridad durante un tiempo determinado.

- Los factores climatológicos tales como el viento, la temperatura, la humedad y la presión son aspectos de suma importancia en los procesos de combustión y propagación del fuego. Quizás el más influyente de estos aspectos es el viento, el comportamiento del fuego puede cambiar de forma radical e imprevisible en presencia de flujos de ventilación. Conviene por tanto aplicar con más rigor las medidas de protección oportunas en aquellas zonas donde los vientos son un factor dominante.

Todos los escenarios probados en la fase experimental han sido implementados de acuerdo a las medidas estipuladas por el CTE, considerando, según el caso, las distancias de separación horizontal (0,50 m) y vertical (franja de 1 m), el uso de materiales no combustibles y la compartimentación de las cámaras ventiladas. Según se ha podido observar, en algunas situaciones, la aplicación de las medidas exigidas por el CTE podría no ser una garantía para alcanzar un nivel de seguridad aceptable, debido a que se trata de requerimientos muy generales que permiten un amplio rango de interpretación. Por ejemplo, la franja de 1 m podría ser un elemento de protección suficiente en una fachada convencional con ventanas pequeñas, pero ser insuficiente en el mismo tipo de fachada con ventanas grandes.

En este sentido sería importante no conformarse solo con interpretar los códigos y adaptar sin más las exigencias de la normativa a los diferentes diseños de las fachadas, sino considerar previamente los posibles riesgos asociados y en función de ello evaluar si las medidas son suficientes o no. En todo proyecto, independiente de su magnitud, tendría que considerarse la realización de un análisis de riesgos de acuerdo a los requerimientos de cada caso en particular.

Se considera que uno de los logros del estudio es que los aspectos analizados pueden ser llevados al ámbito práctico. El factor geométrico es algo que se puede controlar desde el diseño arquitectónico, lo cual equivale a intervenir en uno de los factores que condiciona el comportamiento fuego. Los otros factores físicos que pueden ser determinantes en el desarrollo del fenómeno tales como: el viento, la temperatura, la humedad etc., son aspectos aleatorios e incontrolables. Otro factor que puede ser controlado es la carga combustible de los recintos, sin embargo este aspecto no ha formado parte de los propósitos del estudio, salvo en las consideraciones referentes a los materiales de revestimiento y de aislamiento térmico combustibles (apartado 6.5.2).

7.2 Futuras líneas de investigación

De forma ideal los estudios realizados con técnicas de modelado y simulación computacional de incendios han de someterse a un proceso de validación, el cual consiste en realizar un ensayo real de lo que se está estudiando, para contrastar los resultados y determinar el nivel de aproximación alcanzado con la simulación. No obstante, ante la inviabilidad de realizar esta parte del proceso dentro de esta investigación, debido a las dificultades que comporta realizar ensayos de tipo destructivo como el fuego, se plantea como una posible línea de investigación futura validar alguno de los casos probados en esta investigación.

En el estudio se ha pretendido abarcar el mayor número de variables posible considerando los aspectos de interés y teniendo en cuenta que fueran abarcables dentro de esta investigación. Sin embargo, un estudio de estas características puede ser tan amplio como se quiera, si se tiene en cuenta que un incendio puede ocurrir en una inmensa variedad de escenarios. Por ello se estima que algunos aspectos pueden ser abordados con más amplitud considerando un mayor número de variables o de casos, por tanto esta posibilidad también se identifica como una futura línea de investigación.

EPÍLOGO
REFLEXIONES PERSONALES



Reflexiones personales

Quisiera terminar este documento expresando algunos pensamientos, que si bien no forman parte directa del estudio realizado, han ido tomando lugar durante este largo proceso de investigación que me ha acompañado durante los últimos años.

Sin duda, una de las situaciones que más ha llamado mi atención es el escaso interés que, en general, suscita el tema de la protección contra incendios y la poca información que tenemos a mano los arquitectos en referencia a este complejo fenómeno, pese a que diseñamos y construimos espacios en los que potencialmente podría tener lugar un incendio. Me ha sorprendido encontrarme con pocas fuentes bibliográficas disponibles en las bibliotecas de arquitectura, y comprobar que en diferentes libros técnicos sobre fachadas los párrafos dedicados a la protección contra incendios fueran casi simbólicos, mientras se tratan con amplitud temas (no menos importantes) como la carga de viento, el control solar, el aislamiento térmico, la durabilidad, los sistemas constructivos, etc. Este panorama de escasez de información se convirtió en una motivación más para continuar adelante con la investigación, pues significaba que mi aporte podría tener un mayor alcance en el ámbito del conocimiento de las fachadas de los edificios, las cuales han acaparado mi interés desde hace muchos años.

Puedo decir que este proyecto ha influido poderosamente en mi manera de observar la arquitectura. En mi aproximación a los espacios, y en particular a las fachadas, siempre está presente esta nueva conciencia por la prevención, la protección contra el fuego, los riesgos asociados a los materiales y diseños, etc. Insistir en estos conceptos también me ha llevado a reflexionar sobre la utilidad de la tesis y el compromiso del diseño y la geometría frente a la propagación del fuego. Este es un aspecto que a menudo suele ser motivo de crítica hacia nuestro colectivo por parte de otros profesionales de campos técnicos, porque en la concepción arquitectónica muchas veces prima la estética sobre aspectos técnicos de gran importancia. Sin embargo, considero que no tiene por qué reñir la seguridad con el diseño. En este sentido, estimo de mucho interés las conclusiones derivadas de la investigación sobre la importancia del diseño de las fachadas frente a la propagación exterior del fuego. Es interesante desde el punto de vista arquitectónico tener presente que las decisiones más simples o cotidianas relacionadas con la configuración de las fachadas pueden tener una repercusión significativa en la seguridad de la edificación.

Durante estos años también he aprendido que la problemática de la seguridad contra incendios es un asunto amplio y complejo, que debe ser visto de forma holística. La fachada en términos de estrategias de protección contra incendios en la edificación forma parte de un todo en el cual cada elemento tiene su propia función. Cada edificio tiene sus propios riesgos asociados y por ende sus propios requerimientos en materia de seguridad. Los sistemas de protección por encima de todo deben ser lógicos, coherentes y tener un alto contenido de conciencia sobre el peligro. El arquitecto tendría que hacer el ejercicio de identificar y analizar los riesgos inherentes al diseño de cada proyecto y tomar las consideraciones oportunas. Y en virtud de la complejidad o singularidad del proyecto estar en capacidad de llevar a cabo una labor en estrecha colaboración con otros profesionales y expertos en ingeniería de protección contra incendios. Si esta investigación sugiere una reflexión sobre los riesgos, las prácticas de diseño y despierta la atención sobre la importancia de la seguridad en la edificación podré dar por bueno el trabajo realizado.

Una parte importante de mi proceso de investigación ha estado marcado por el enorme desafío personal que me ha supuesto abordar información relacionada con la dinámica del fuego y la combustión, y el modelado y simulación computacional de incendios; disciplinas no sólo lejanas a la arquitectura, sino complejas. Confieso que ha significado un verdadero reto en el que por momentos me sentí abrumada y estime inalcanzables las metas propuestas, pero doy gracias a Dios por la motivación que encontré primeramente en mi director de tesis y luego en los distintos profesionales que fui contactando a lo largo de los años y que tuvieron a bien compartir conmigo su conocimiento y transmitírmelo de una manera clara. Hoy pienso que valió mucho la pena persistir en ello.

Considero que en este recorrido han sido importantes algunas experiencias profesionales relacionadas con esta investigación como: la colaboración que realicé en el proyecto Barcode Housing System (2009). En el cual llevé a cabo la evaluación del comportamiento del fuego en fachadas ventiladas. Los escenarios de fachadas ventiladas **FOV** que forman parte de esta tesis sirvieron de base para dicho estudio. También merece la pena mencionar un proyecto de investigación sobre “propagación del fuego en recintos” en el que tuve la oportunidad de colaborar con personal del Laboratorio del Fuego de la EPSEB de la Universidad Politécnica de Cataluña UPC como personal de soporte a la investigación del Departamento de Física Aplicada. Al final, ha sido de gran utilidad para este largo proceso de investigación asumir cada reto que se iba presentado en el ámbito del tema, y ha servido para definir la

importancia del enfoque arquitectónico que se ha pretendido dar al estudio. Los últimos años me han servido para madurar este conocimiento adquirido, ampliarlo y aplicarlo en mi vida profesional como investigadora del Institut Calatà de la Fusta (INCAFUST) y finalmente, dar el paso hacia la culminación de mi doctorado.

Esta investigación me ha abierto un camino hacia una nueva dimensión profesional, centrada en la investigación del comportamiento del fuego y su propagación en distintos escenarios. El principal proyecto de investigación lo estoy realizando en el INCAFUST, mi actual lugar de trabajo. Se trata de un proyecto sobre la propagación del fuego en edificaciones de madera que cuenta con el aval de una beca de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación del gobierno de España. También he tenido la oportunidad de colaborar con algunas clases para el máster en Tecnología en la arquitectura, dar conferencias sobre temas relacionados con la propagación del fuego a través de las fachadas en México, Colombia y Barcelona. Participé con una publicación en el Congreso Internacional “Combustion and Fire Dynamics” 2010 organizado por el grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria. Uno de los eventos internacionales más importantes sobre la dinámica del fuego y el modelado y simulación computacional de incendios. Actualmente cuento con tres publicaciones aprobadas para presentar en diferentes eventos. Las tres tienen como tema central la dinámica del fuego.

Quiero hacer una mención anecdótica pero significativa en relación al tema. Se trata de dos ejemplos de diseño de fachadas que me ha sorprendido gratamente encontrar en dos de los edificios más emblemáticos de la ciudad de Barcelona, ambos obra del genial arquitecto Antoni Gaudí. Me estoy refiriendo a la casa Milà, popularmente conocida como “la Pedrera” y a la casa Batlló. La configuración de estas fachadas define un juego geométrico muy apropiado para cambiar la trayectoria de las llamas en una hipotética situación de incendio. Desconozco si Gaudí pensó en la problemática que aquí nos ocupa, pero tratándose de un genio como él, no lo descartaría.

Luego de tantos aspectos positivos quiero también exponer un pero. Es una reflexión menos optimista ya que temo que el fuego seguirá siendo el gran olvidado dentro de los temas relacionados con la construcción y la arquitectura. El hecho de que se trate un suceso eventual, de un “accidente” genera una actitud de indiferencia que espero con los años vaya cambiando de tendencia. Aunque parezca una utopía, intentar

poner de nuestra parte puede ayudar a cambiar el “nunca ha pasado nada”, esgrimido por la mayoría, al “las cosas nunca pasan hasta que pasan”.

Voy cerrando estas reflexiones personales diciendo que me quedo con la satisfacción de haber cumplido de forma amplia con los objetivos de partida del estudio y poder responder a los interrogantes que surgieron en la parte inicial de la investigación. Lo que comenzó como una inquietud por resolver un tema poco explorado y con un mar de dudas sobre la normativa, ha derivado en respuestas muy concretas. En esta parte debo subrayar la importancia que ha tenido introducirme en el ámbito de la simulación computacional de incendios, pienso que sin esta fase experimental del estudio no habría sido posible tener esta aproximación al tema de la propagación exterior del fuego con los diferentes aspectos de interés que engloba. Por esto considero muy valioso tener una mente abierta a las posibilidades que ofrece la tecnología para explorar nuevos campos del conocimiento, o insistir en temas ya explorados pero desde nuevos enfoques.

Para finalizar, sirva también este documento para destacar y agradecer la labor importantísima de los cuerpos de bomberos. Desempeñan una tarea que valoro y admiro hoy más que nunca, luego de haber podido consultar e intercambiar impresiones con varios de estos profesionales durante mi investigación y conocer de primera mano el trabajo que realizan y las situaciones que enfrentan en su lucha contra el fuego.

Glosario

Agente extintor: Conjunto del o de los productos contenidos en el extintor y cuya acción provoca la extinción [CEN,EN 3-4, 82].

Aislamiento térmico: Propiedad de un elemento de construcción, componente, equipo o estructura, de asegurar la estabilidad al fuego [UNE, 23-026-80].

Altura de evacuación: Máxima diferencia de cotas entre un origen de evacuación y la salida de edificio que le corresponda. A efectos de determinar la altura de evacuación de un edificio no se consideran las plantas en las que únicamente existan zonas de ocupación nula.

Arder: Encontrarse en estado de combustión [UNE, 23-026-80].

Área de inicio del fuego: Zona del escenario del incendio donde se origina el mismo y que por el tipo de combustible presente y/o la fuente de calor, no es posible determinar el punto o lugar concreto de inicio: el foco primario.

Calor de combustión: Es la cantidad máxima de calor liberada por la combustión completa de una unidad de masa de material combustible [NFPA 921,96].

Calor de fusión: de un sólido, es la cantidad de calor que debe suministrarse a la unidad de masa de dicho sólido, para hacerlo pasar al estado líquido a la temperatura de fusión.

Calor de ignición: Energía calorífica que produce la ignición [NFPA 901,95].

Calor específico: Calor específico c de un cuerpo a la temperatura T , es la cantidad de calor en kJ que debe suministrarse a la unidad de masa del cuerpo (kg), para elevar su temperatura en 1 °C.

Carbonizar: Reducir a carbón, más o menos puro, un cuerpo orgánico por la acción de una combustión incompleta [UNE, 23-026-80].

Carga calorífica. Carga de fuego: Suma de las energías caloríficas que se liberan en la combustión de todos los materiales combustibles existentes en un espacio (contenidos del edificio y elementos constructivos) [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Cenizas: Residuo inorgánico pulverulento resultante de una combustión completa [UNE, 23-026-80].

Colapso, criterio de: Según este criterio, se considera que se produce el estado límite de agotamiento bajo la acción del incendio, cuando la pieza o estructura en cuestión, sometidas a los incrementos de temperatura derivados de la exposición al incendio, agota su máxima capacidad resistente.

Comburente: Sustancia rica en oxígeno que actúa como sustento de la combustión.

Combustible: Sustancia susceptible de arder, bajo condiciones de ensayo determinadas [UNE, 23-026-80].

Combustión: Reacción exotérmica de una sustancia, llamada combustible, con un oxidante, llamado comburente; el fenómeno viene acompañado generalmente por una emisión lumínica en forma de llamas o incandescencia con desprendimiento de

productos volátiles y/o humos, y que puede dejar un residuo de cenizas [UNE, 23-026-80].

Combustión incandescente: Combustión sin llama de un material con emisión de luz visible [UNE, 23-026-80].

Comportamiento al fuego: Conjunto de las transformaciones físicas y químicas de un material o de un elemento de construcción sometido a la acción destructiva del fuego [UNE, 23-026-80].

Curva normalizada tiempo-temperatura: Curva nominal que representa un modelo de fuego totalmente desarrollado en un sector de incendio [UNEEN 1991-1-2:2004].

Curvas tiempo-temperatura: Temperatura del aire en la proximidad de las superficies de un elemento, en función del tiempo. Pueden ser:

- a) Nominales: curvas convencionales adoptadas para clasificar o verificar la resistencia al fuego, por ejemplo, la *curva normalizada tiempo-temperatura*, la curva de fuego exterior o la curva de fuego de hidrocarburos;
- b) Paramétricas: determinadas a partir de modelos de fuego y de los parámetros físicos específicos que definen las condiciones del *sector de incendio* [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Deflagración: Onda de combustión que se propaga a velocidad subsónica [UNE, 23-026-80]. Todo incendio cuya velocidad de propagación transcurre entre 1 m/s y la velocidad del sonido, 330 m/s. Arder una sustancia súbitamente con llama y sin explosión.

Densidad de carga de fuego: Carga calorífica por unidad de superficie [UNE, 23-026-80]. Carga de fuego por unidad de superficie construida q_f , o por unidad de superficie de toda la envolvente, incluidas sus aberturas, q_t (UNE-EN 1991-1-2:2004).

Densidad de carga de fuego de cálculo: Densidad de carga de fuego considerada para determinar las acciones térmicas en el cálculo en situación de incendio. Su valor tiene en cuenta las incertidumbres [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Detector de calor: Detector sensible a una elevación de temperatura [CEN,EN 54-1, 76].

Detector de humo: Detector sensible a las partículas de los productos de combustión y/o de pirólisis en suspensión en el aire [CEN,EN 54-1, 76].

Detonación: Explosión que se propaga a velocidad supersónica y que lleva asociada una onda de choque [UNE, 23-026-80].

Encender: Iniciar una combustión [UNE, 23-026-80].

Espacio exterior seguro: Es aquel en el que se puede dar por finalizada la evacuación de los ocupantes del edificio, debido a que cumple las siguientes condiciones:

- 1 Permite la dispersión de los ocupantes que abandonan el edificio, en condiciones de seguridad.
- 2 Se puede considerar que dicha condición se cumple cuando el espacio exterior tiene, delante de cada salida de edificio que comunique con él, una superficie de al menos $0,5P \text{ m}^2$ dentro de la zona delimitada con un radio $0,1P \text{ m}$ de distancia desde la salida de edificio, siendo P el número de ocupantes cuya evacuación esté prevista por

dicha salida. Cuando P no exceda de 50 personas no es necesario comprobar dicha condición.

3 Si el espacio considerado no está comunicado con la red viaria o con otros espacios abiertos no puede considerarse ninguna zona situada a menos de 15 m de cualquier parte del edificio, excepto cuando esté dividido en sectores de incendio estructuralmente independientes entre sí y con salidas también independientes al espacio exterior, en cuyo caso dicha distancia se podrá aplicar únicamente respecto del sector afectado por un posible incendio.

4 Permite una amplia disipación del calor, del humo y de los gases producidos por el incendio.

5 Permite el acceso de los efectivos de bomberos y de los medios de ayuda a los ocupantes que, en cada caso, se consideren necesarios.

6 La cubierta de un edificio se puede considerar como espacio exterior seguro siempre que, además de cumplir las condiciones anteriores, su estructura sea totalmente independiente de la del edificio con salida a dicho espacio y un incendio no pueda afectar simultáneamente a ambos.

Estabilidad al fuego: Aptitud de un elemento de construcción, portante o no, de permanecer inalterado en su función mecánica bajo la acción del fuego por un determinado periodo de tiempo [UNE, 23-026-80]. A partir de la nueva clasificación europea este término ha sido reemplazado por: Capacidad portante (R).

Estanquidad al fuego: Aptitud de un elemento de construcción de impedir el paso de llamas o gases calientes a través de él, por un determinado periodo de tiempo [UNE, 23-026-80]. A partir de la nueva clasificación europea este término ha sido reemplazado por integridad al fuego (E).

Flashover: Es el proceso de extensión súbita de un incendio confinado a todo el recinto o dominio a partir de un fuego localizado en un entorno del origen.

Flotabilidad: Se denomina así al efecto ascendente provocado por la diferencia de densidades, que ocurre como consecuencia de la diferencia de temperaturas.

Foco primario: Lugar en el escenario del incendio, donde se origina el incendio. Puede haber uno o varios.

Foco secundario: Lugar en el escenario del incendio, donde por diferentes causas se originan otros frentes de propagación del fuego, dando la sensación de ser focos primarios, cuando en realidad son una consecuencia de la trayectoria seguida por el incendio, de la distribución y clase de combustible y de la geometría del escenario del incendio.

Frente de llamas: El borde de los gases ardiendo procedentes de una reacción de combustión [NFPA, 921,96].

Fuego: Manifestación del fenómeno de la combustión caracterizada por una emisión de calor acompañada de humo o de llamas o de ambos. Calor y luz producido por la combustión [UNE, 23- 026-80].

Fuego clase A: Fuego de materiales sólidos, generalmente de naturaleza orgánica, donde la combustión se realiza normalmente con formación de brasas [CEN,EN 2, 72].

Fuego clase B: Son los fuegos de líquidos o sólidos licuables [CEN,EN 2,72].

Fuego clase C: Son los fuegos de gases [CEN,EN 2,72].

Fuego clase D: Son los fuegos de metales [CEN,EN 2,72].

Fuego latente: Combustión lenta de un material sin poder apreciarse luz y generalmente revelado por un aumento de temperatura o por el humo [UNE, 23- 026-80].

Fuego de cálculo: Desarrollo de fuego específico adoptado a efectos de cálculo [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Fuego totalmente desarrollado: Estado en el que todas las superficies combustibles existentes en un determinado espacio participan en el fuego [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Fuego localizado: Fuego que sólo afecta a una zona limitada de la carga de fuego del sector de incendio [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Humo: Conjunto visible de partículas sólidas y líquidas en suspensión en el aire, o en los productos volátiles, resultantes de una combustión o pirólisis [UNE, 23-026-80].

Ignición: Acción y efecto de iniciarse una combustión.

Ignifugación: Aplicación de un tratamiento a un material haciendo uso de sustancias ignífugas.

Ignífugo: Sustancia que tiene la cualidad de suprimir, disminuir o retardar la combustión de ciertos materiales. Que protege contra el fuego.

Incendio: Fuego que se desarrolla sin control en el tiempo y el espacio [UNE, 23-026-80].

Incombustible: No susceptible de arder, bajo condiciones de ensayo determinadas [UNE, 23-026-80].

Inflamable: Susceptible de entrar y de continuar en estado de combustión con desprendimiento de llamas durante o después de ser sometido a una fuente de calor, bajo condiciones de ensayo determinadas. Que se enciende con facilidad y desprende inmediatamente llamas.

Intumescentes: Productos que en contacto con el calor, sufren una transformación debida a reacciones químicas, formándose una “espuma” que evita la transmisión del calor al elemento a proteger. Los productos de este tipo más utilizados son pinturas [NFPA, 921,96].

Límite inferior de inflamabilidad: Es la mínima concentración combustible/comburente por debajo de la cual no se produce la inflamabilidad (*Lower Flammable Limit*).

Límite superior de inflamabilidad: Es la máxima concentración combustible/comburente por arriba de la cual no se produce la inflamabilidad (*Uper Flammable Limit*).

Llama: Zona de combustión en fase gaseosa con emisión de luz [UNE, 23-026-80].

Modelo informático de dinámica de fluidos: Modelo de fuego que permite resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales que relacionan a las variables

termodinámicas y aerodinámicas de cada punto del sector de incendio considerado [UNE-EN 1991-1-2:2004].

No inflamable, ininflamable: No susceptible de entrar en combustión en fase gaseosa durante o después de ser sometido a una fuente de calor, bajo condiciones de ensayo determinadas [UNE, 23-026-80].

Opacidad: Medida de la absorción luminosa. Es el cociente del flujo luminoso emitido y del flujo transmitido [UNE, 23-026-80].

Origen de evacuación: Es todo punto ocupable de un edificio, exceptuando los del interior de las viviendas y los de todo recinto o conjunto de ellos comunicados entre sí, en los que la densidad de ocupación no exceda de 1 persona/10 m² y cuya superficie total no exceda de 50 m², como pueden ser las habitaciones de hotel, residencia u hospital, los despachos de oficinas, etc. Los puntos ocupables de todos los locales de riesgo especial y los de las zonas de ocupación nula cuya superficie exceda de 50 m², se consideran origen de evacuación y deben cumplir los límites que se establecen para la longitud de los recorridos de evacuación hasta las salidas de dichos espacios, cuando se trate de zonas de riesgo especial, y, en todo caso, hasta las salidas de planta, pero no es preciso tomarlos en consideración a efectos de determinar la altura de evacuación de un edificio o el número de ocupantes.

Parallamas: Propiedad de un elemento de construcción, componente, equipo o estructura, de asegurar simultáneamente la capacidad portante, la integridad y la no emisión de gases inflamables. Por su cara no expuesta al fuego [UNE, 23-026-80].

Peligro: Lo que puede producir un daño o deterioro en la calidad de la vida individual o colectiva de las personas.

Pirólisis: Descomposición química irreversible de un material debida exclusivamente al calor, generalmente en ausencia de oxígeno [UNE, 23-026-80].

Propagación de llama: Desplazamiento del frente de una llama [UNE, 23-026-80].

Potencial calorífico: Energía calorífica que la unidad de masa de un material, compuesto o no, es capaz de desprender durante su combustión completa [UNE, 23-026-80].

Punto de ignición: Temperatura mínima que debe alcanzar una sustancia para empezar a arder en condiciones específicas de laboratorio [NFPA. 921,96].

Punto de inflamación: La más baja temperatura de un material a la cual se puede iniciar una combustión persistente, bajo condiciones de ensayo determinadas [UNE, 23-026-80].

Quemar: Destruir por combustión o pirólisis. Abrasar o consumir con fuego.

Radiación térmica: La transmisión de la energía térmica sin necesidad de un soporte material [UNE, 23-026-80].

Reacción al fuego: Respuesta de un material al fuego medida en términos de su contribución al desarrollo del mismo con su propia combustión, bajo condiciones específicas de ensayo [DPC - DI2]. Hace referencia al ensayo definido en la Directiva de Productos de la Construcción.

Resistencia al fuego: Aptitud de un elemento de construcción, componente, equipo o estructura, de conservar durante un tiempo determinado la capacidad portante, la integridad, el aislamiento térmico requerido y la no emisión de gases inflamables, especificados en los ensayos de resistencia al fuego [UNE, 23-026-80].

Resistente al fuego o cortafuego: propiedad de un elemento de construcción, componente, equipo o estructura, de asegurar la resistencia al fuego. Cortafuego sólo es aplicable a los elementos de separación [UNE, 23-026-80].

Retardador de llama: producto o tratamiento aplicado a un material que tiene la propiedad de retardar la propagación de la llama [UNE, 23-026-80].

Riesgo: La proximidad a un daño. Probabilidad de que ante un determinado peligro se produzca un cierto daño.

Sector de incendio: Espacio de un edificio separado de otras zonas del mismo por elementos constructivos delimitadores resistentes al fuego durante un período de tiempo determinado, en el interior del cual se puede confinar (o excluir) el incendio para que no se pueda propagar a (o desde) otra parte del edificio (DPC - DI2, ensayo definido en la Directiva de Productos de la Construcción). Los locales de riesgo especial no se consideran sectores de incendio.

Sistema de alarma de incendios: Sistema que permite emitir señales acústicas y/o visuales a los ocupantes de un edificio [UNE 23007-1:1996, EN 54-1:1996].

Sistema de detección de incendios: Sistema que permite detectar un incendio en el tiempo más corto posible y emitir las señales de alarma y de localización adecuadas para que puedan adoptarse las medidas apropiadas [UNE 23007-1:1996, EN 54-1:1996].

Spalling del hormigón: Explosión con proyección que experimentan los hormigones al ser sometidos a altas temperaturas. El *spalling* más severo se manifiesta en el hormigón de alta resistencia.

Superficie quemada: Superficie de un material destruida por combustión o pirólisis, excluyendo cualquier zona dañada por contracción del mismo [NFPA, 921,96].

Tiempo de exposición: El periodo de tiempo durante el cual se expone un material a una llama o a una fuente de calor [UNE, 23-026-80].

Tiempo equivalente de exposición al fuego: Es el tiempo de exposición a la curva normalizada tiempo-temperatura que se supone que tiene un efecto térmico igual al de un incendio real en el sector de incendio considerado [UNE-EN 1991-1-2:2004].

Tiempo de ignición: Tiempo transcurrido entre la aplicación de una fuente de ignición a un material y el inicio de una combustión auto-mantenida [NFPA 921,96].

Tiempo de propagación de llama: El tiempo que tarda un frente de llamas para propagarse una distancia determinada sobre un material en combustión, bajo condiciones de ensayo determinadas [UNE, 23-026-80].

Tiempo de respuesta: Se denomina tiempo de respuesta, t_r , al tiempo que transcurre desde que se recibe la llamada hasta que llegan al lugar de los hechos los primeros efectivos de intervención.

Trayectoria del incendio: Camino seguido por el incendio durante su evolución en condiciones normales. La trayectoria se representa por las coordenadas espaciales [NFPA, 921,96].

Transmisión de calor por conducción: Es el paso de calor a través de un cuerpo, de molécula a molécula, sin desplazamiento visible de sus partículas.

Transmisión de calor por convección: Es el paso de calor en el interior de un líquido o gas, por mezcla de las porciones a distintas temperaturas. Si el movimiento del fluido se debe enteramente a las diferentes densidades originadas por la variación de temperaturas, se dice que la convección es natural. Cuando se activa mecánicamente el movimiento, se dice que la convección es forzada.

Transmisión de calor por radiación: Es el calor que emite un cuerpo caliente en todas direcciones en forma de energía radiante. El calor transmitido de este modo no necesita de un medio material como vehículo. Cuando esta energía incide sobre otro cuerpo, es reflejada en parte, mientras que otra parte se transmite a su través, y el resto se absorbe transformándose cuantitativamente en calor.

Velocidad de desprendimiento de calor: Cantidad de calor emitida por un material en estado de combustión en la unidad de tiempo [UNE, 23-026-80]. Muy conocido como HRR del inglés *Heat Release Rate*.

Velocidad de propagación de la llama: Distancia recorrida en la unidad de tiempo por un frente de llama durante su propagación, bajo condiciones de ensayo determinadas [UNE, 23-026-80].

Ventilación natural: Extracción de humos basada en la fuerza ascensional de éstos debida a la diferencia de densidades entre masas de aire a diferentes temperaturas [CTE, Anejo SI A].

Volatilidad: Tendencia de una materia líquida o sólida a pasar al estado de vapor. Entre 100 y 500 mmHg., se encuentran las sustancias volátiles. Más de 500 mmHg., son muy volátiles.

